

# fizikai szemle



2010/9

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
havonta megjelenő folyóirata.  
Támogatók: A Magyar Tudományos  
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,  
a Nemzeti Erőforrás Minisztérium,  
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:

Messier 33, azaz a Triangulum-galaxis.  
A felvétel az MTA Konkoly Thege  
Miklós Csillagászati Kutatóintézet  
Pizskéstetői Observatóriumában, a  
60/90 cm-es Schmidt-távcsővel, illetve  
a teleszkóp frissen üzembe állított új  
CCD-kamerájával – Apogee Alta U16  
CCD, 4k×4k pixel – készült.  
(kép: Kelemen János, Mező György,  
Regály Zsolt, Benkő József)

## TARTALOM

<i>Szabó M. Gyula:</i> Ütközések a Naprendszerben	289
<i>Vető Balázs:</i> Gravitáció és gravitomágnesség	296
<i>Radnai Gyula:</i> Nobel-díjas családok I.	300

### A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Beke Tamás:</i> Elektromosan fűtött Rijke-cső termoakusztikus modellje	305
<i>Jubász Nándor, Ósz György, Vida József:</i> A XX. Öveges József Fizikaverseny országos döntője	311
<i>Vannay László, Fülöp Ferenc:</i> A Fizika OKTV harmadik fordulója az első kategória részére	318

### HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>Füstöss László:</i> „száraz halból készült máját ehetsz” 225 éve halt meg Sajnovics János	322
---	-----

*M. J. Szabó:* Collisions in the Solar system

*B. Vető:* Gravitation and gravitomagnetism

*J. Radnai:* Nobel-laureate families – I.

### TEACHING PHYSICS

*T. Beke:* Thermoacoustic model of an electrically heated Rijke tube

*N. Jubász, G. Ósz, J. Vida:* The final round of the XX. Öveges József Contest in physics

*L. Vannay, F. Fülöp:* The 3rd round (1st category) of the secondary school pupils' contest in physics – 2010

### EVENTS

*L. Füstöss:* 225 years since the decease of astronomer and linguist János Sajnovics

*M. J. Szabó:* Zusammenstöße im Sonnensystem

*B. Vető:* Gravitation und Gravitomagnetismus

*J. Radnai:* Nobelpreisgekrönte Familien – I.

### PHYSIKUNTERRICHT

*T. Beke:* Thermoakustisches Modell einer elektrisch geheizten Rijke-Röhre

*N. Jubász, G. Ósz, J. Vida:* Endrunde des XX. Öveges-József-Wettbewerbs in Physik

*L. Vannay, F. Fülöp:* Die dritte Runde (erste Kategorie) des Schüler-Wettbewerbs in Physik – 2010

### EREIGNISSE

*L. Füstöss:* 225 Jahre nach dem Ableben des Astronomen und Sprachwissenschaftlers János Sajnovics

*М. Д. Сабо:* Столкновения в солнечной системе

*Б. Ветё:* Гравитация и гравитомagnetизм

*Д. Раднаи:* Семьи, премированные Нобелевской премией – I.

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

*Т. Бэке:* Термоакустическая модель трубы Рийке

*Н. Югас, Г. Ёс, Й. Видя:* Итоги XX. Физического Конкурса им. Эвегеша

*Л. Ваннай, Ф. Фюлёп:* Третий раунд конкурса учеников средних школ по физике – 2010

### ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

*Л. Фюштётт:* 225 лет со дня смерти астронома и лингвиста Я. Шайнович

**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



**nka**  
Nemzeti Kulturális Alap

**mym**  
paksi atomerőmű

**NCA**  
Nemzeti Civil Alaprogram



# 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

LX. évfolyam

9. szám

2010. szeptember

## ÜTKÖZÉSEK A NAPRENDSZERBEN

Szabó M. Gyula  
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet  
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Az emberiség újkori történetét végigkíséri annak vizsgálata, hogy az égitestek leeshetnek-e a Földre, illetve ütközhetnek-e egymással. A közelmúltban a földközeli kisbolygók felmérése és általában a Naprendszer minden képzetet felülmúlóan részletes megismerése helyezte új megvilágításba a kérdést. Az elmúlt évtizedben betekintést nyertünk más csillagok bolygórendszereinek kialakulásába és szerkezetébe. Az új ismeretek két évtized alatt alapjában változtatták meg az ütközésekről alkotott képünket. Ez tendenciájában az ütközések szerepének háttérbe szorulásával járt: mivel korábban kevés, jobbra égi mechanikai jelenség szerepét ismertük föl a bolygórendszerek keletkezésében, olyan hatásokat is égi mechanikai eredetűnek véltünk, illetve ütközések hatásának tulajdonítottunk, amelyeket lényegében egészen más (pl. hidrodinamikai, termodinamikai, elektromos) folyamatok okoztak. Az új ismeretek fényében át kellett értékelnünk az ütközések szerepét a naprendszerek formálásában és fejlődésében.

### Becsapódásokra utaló megfigyelések

A mai Naprendszerben a becsapódások nem gyakoriak. Két égitest ütközésének első, rekonstruálhatóan dokumentált megfigyelése 1178. június 18-áról származik, *Canterbury Gervasius* krónikájából. Ezen a napon öt szerzetes volt szemtanúja, hogy kevéssel napnyugta után a Hold sötét oldalán fényzarvak jelentek meg. A szarvak leírt helyzete alapján valószínű, hogy a 22 km átmérőjű Giordano Bruno nevű kráter kialakító becsapódást figyelték meg – ez a kráter az

űrszondák megfigyelése szerint valóban rendkívül fiatal. Ma hasonló megfigyeléseket számos amatőr csillagász készít videokamerával, a Hold árnyékos oldalán felvillanó tranziensek tucatjait örökítve meg. A tranziensek korrelációja az ismert meteorzáporokkal bizonyított, kapcsolata új kráterek keletkezésével pedig rendkívül valószínű. A tranziensek tehát minden bizonnyal kráterképződéssel járó mikrobecsapódások nyomai. Földbe csapódó égitestekről több híres értesítés tudósít, elegendő csak a Kr. e. 2597-ben lezuhló meteoritot(?) említeni, amely *Huang Ti* kínai császár halálát okozta; illetve az 1908-as Tunguz eseményt, amely egy légkörben fölrobbant üstökös vagy kisbolygó környezeti hatását illusztrálja. 1994. június 16. és 22. között volt megfigyelhető a már korábban darabokra hullott Shoemaker–Levy 9 üstökös maradványainak becsapódása a Jupiterbe, látványos légköri alakzatokat hozva létre. 2009 júniusában egy 500 méteres kisbolygó Jupiterbe csapódásának eredményeképpen hasonló felhőalakzatokat figyeltek meg, míg 2010 júniusában egy még kisebb aszteroida Jupiterbe csapódásának folyamatát is sikerült két videófelvételen rögzíteni.

A becsapódások közvetett megfigyelése – az eredményen keresztül – lényegesen könnyebb. Már *Galilei* megfigyelte a Hold krátereit, azonban a XIX. század legvégéig ezeket vulkanikus eredetűnek hitték. A becsapódásos eredet elleni fő érv az volt, hogy a becsapódó törmelék pályája várhatóan „lapos szögben” érkezik, és elnyúlt krátereiket kellene létrehoznia. Csak 1960 körül vált elfogadottá a becsapódásos eredet, amikor laboratóriumi kísérletekkel igazolták, hogy a szögben érkező törmelék is kör alakú krátereket formál. Ebben az időben váltak ismertté a Merkúr, Vénusz, Mars bolygók krátermezői is.

A közelmúlt megfigyelései szinte áttekinthetetlen mennyiségű további érvvel támasztották alá a nagy-

A szerző köszöni az MTA Bolyai Posztdoktori Ösztöndíj, az MTA Lendület Fiatal Kutatói Program és a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj támogatását.





1. ábra. A korai Mars ütközése egy 934 km-es méretű aszteroidával. A roncsolódás és a kidobódó anyag szerkezete egzakt numerikus szimuláció eredménye (R. Lamb/NASA).

bolygók felszínét érő nagy becsapódások meghatározó szerepét. A talán legfontosabb bizonyíték a víz, amely a Földön kívül a Holdon, a Marson, a Merkúron és a Vénuszon is jelen van, ahová valószínűleg szintén óriási üstökösök becsapódási korszaka szállította a korai Naprendszer külső tartományaiból. A Vénusz fordított irányú – retrográd – forgása is egy korábbi hold jelenlétére utalhat esetleg, amelynek árapályereje fordította meg a forgásirányt, majd végül a Vénuszba csapódott. Az Uránusz, amely hidegebb légkörű bolygó, mint a Naptól távolabb keringő Neptunusz, légköre egészen más termodinamikai fejlődést követett, mint a Neptunuszé. Ennek oka szintén egy óriás becsapódás lehetett, és talán ennek hatására billent ki a bolygó mágneses tengelye is.

A *kisbolygók* sűrűn kráterezett felszínét az 1990-es évek közepétől figyelték meg űrszondás megközelítések alkalmával. A becsapódások jellegéről árulkodik a kisbolygók alakja is: a Vesta kisbolygó pólusához közel eső középponttal egy óriási kráter borítja a kisbolygó majdnem felének felszínét. Az ütközéskor kirepült töredékekből pedig jellegzetes színképű égitestek alkotta, bazaltos anyagú törmelékfelhő, kisbolygócsalád alakult ki, és kering a Vestához hasonló pályán. A kisbolygócsaládok vizsgálata során kiderült, hogy számos másik kisbolygócsalád is színképi homogenitást mutat, azt sugallva, hogy az azonos pályán keringő kisbolygók egy közös égitest szétredézésével jöttek létre. Az első színképi szegregációra mutató megfigyelést 1978-ban közölte Zellner. A mai legjobb adattár a Sloan Digitális Égboltfelmérés Mozgó Objektumok katalógusa, amelyben négyszázezer bejegyzés szerepel kisbolygók ötszín-fotometriai adataiból.

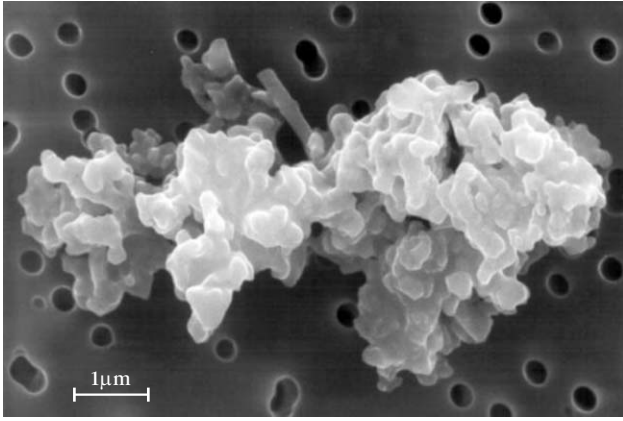
Az ismert és kevésbé ismert *meteoritkráterek* is tanúskodnak a becsapódások meglétéről a földi történelem során; elegendő a 65 km átmérőjű Chicxulubkráterre utalni, amely a dinoszauruszok kihalásával egyidős, és talán e nagy kihalási korszak közvetlen okozója. Hozzánk legközelebb Poznan mellett figyelhetünk meg 20–100 méter méretű meteoritkráterekben tavakat. A meteoritok is fontos információt szolgáltatnak a kozmikus ütközésekről. A legtöbb ismert meteorit különböző kisbolygócsaládok anyagával rokonítható. Ám ismerünk olyan meteoritot is, amely a Marsról származik, ékesen bizonyítva, hogy a külső bolygósomszédunkat is érték olyan erősségű bombázások, amelyek a helyi szökési sebességnél gyorsabb törmelék keletkezésével jártak, és beszennyezték a Naprendszert marsi anyaggal (1. ábra).

## Egy ütközés lefolyása

Az ütközések során két test találkozik egymással, majd kisebb-nagyobb darabok leválása és összetapadások után számos apró és néhány nagyobb test hagyja el az esemény színhelyét. A pontos kimenetelt nagyban meghatározza az ütköző testek tömege, szilárdsága és az ütközés energiája. Ha az ütköző testek szilárdsága kicsi, például *kozmosz kőrakás* szerkezetűek, az ütközés energiájának egy része az anyag átrendezésére fordítódik. Ekkor átmeneti jellegű anyagkidobódások történnek az ütközés után, amelyek darabjai azonban később visszahullnak a nagyobb égitestekre. Nagyobb energiájú ütközés esetén lehet, hogy a kidobódó anyag egy része nem hullik vissza, az anyagcsomó saját legsűrűbb pontja felé kezd hullani, és egy holdat hoz létre az ütközést elszenvedett kisbolygó körül. Még nagyobb energia esetén a kidobódó anyag szétszóródik, vagyis végleg elhagyja az ütközés helyszínét. Kedvező kezdeti paraméterek esetén a két ütköző égitest össze is tapadhat, ekkor egy nagy égitest (és esetleg néhány szétszóródó fragmentum) lesz az ütközés végeredménye. Ha az ütköző test szilárdsága nagy, például monolitikus testről van szó, az ütközés a szilárd kőzet összetörésével, fragmentálódásával jár.

Az ütközés energiája meghatározza az érintett térfogat mértékét is. Nagy energiájú ütközések esetén a két égitest tömegének nagy része szétszóródik vagy fragmentálódik, ekkor katasztrofális eseményről beszélünk. Közepes testek becsapódása szeizmikus hullámokat generál az égitestben, ekkor az anyag átrendeződéséről, megcsuszamlásáról lehet szó. Egészen kis testek becsapódása esetén pedig csak lokális hatások, például kráterképződés, a felszín lokális elszíneződése következik be.

Homogén égitestek ütközése és szétszóródása nyomán homogén anyagi összetételű törmelék keletkezik. A nagyobb méretű testek belseje azonban differenciálódhat (elsősorban olvadás következtében), az ilyen égitest szétszóródásakor a törmelék anyagi összetétele aszerint változik, hogy az égitest mely ré-



2. ábra. Egy kozmikus porszem mikroszkopikus képe. Megfigyelhető a kondenzációk fokozatos összeállásával kialakult, összetett szerkezet (Science Daily, 2008. szeptember 2.).

széből származik. Májig eldöntetlen kérdés, hogy a kisbolygócsaládok jellegzetes anyagi összetételének kialakulásában mekkora szerepet játszott a már differenciálódott égitestek szétszóródása, például az, hogy a fémből (vas-nikkel ötvözetből) álló kisbolygók bolygócsírák szétszóródott vasmagjai-e, vagy egyéb módon magyarázhatjuk kialakulásukat.

Numerikusan jól modellezhető néhány nagyobb kezdeti monolit vagy kórkás szerkezetű égitest szétszóródása és a létrejövő kisbolygó-populáció méreteloszlása. Fő szabály szerint egy egyensúlyi helyzetben lévő populáció (amikor az eloszlás jellege már nem változik tovább) méreteloszlása hatványfüggvényt követ, körülbelül  $-2,5$  hatványkitevővel (kisebb égitestből jóval több van). A Naprendszerben ez a kitevő a néhány méternél nagyobb égitestek esetén  $-2$  körüli érték (kisbolygócsaládonként kissé változik), míg a kis méretű törmelék és por bizonyos mérettartományokban – űrszondás detektorok adatai alapján – a  $-7$  értékét is megközelíti. Ebből a megfigyelésből következik, hogy a Naprendszer kis égitestjeinek populációja jelenleg nem lehet ütközési egyensúly állapotban.

## Az ütközések szerepe a naprendszerek kialakulásában

Az ütközések szerepe egyértelműen a fiatal naprendszerekben a legfontosabb. A bolygórendszerek kialakulását korábban sikeresen magyarázták az összeálló *bolygócsírák* (planetezimálok) modelljével. A fiatal csillagok a csillagközi anyag sűrűsödéseiből alakulnak ki, a perdületmegmaradás miatt általában olyan konfigurációban, hogy a fiatal csillagot egy sűrűbb anyagkorong, a protoplanetáris korong is körbeveszi. Az ütköző bolygócsírák elmélete onnan indul ki, hogy a fiatal csillag sugárzása az anyagkorongból kifújja a könnyű elemeket, a lehűlő közegben pedig a nehezebb elemek kondenzálódnak. A szilárd törmelék-szemcsék egymással ütközve egyre nagyobb testeket formálnak, amelyek végül bolygótestekké állnak össze. Az elmélet sikere, hogy egyszerű magyarázatot

ad a Naprendszer kisbolygóira (ezek olyan planetezimálok, amelyek a Jupiter hatásai miatt nem tudtak bolygókká összeállni), továbbá látszólag sikeresen magyarázza a Naprendszerben a bolygók jellegét (a belső bolygók kőzetből, a külső bolygók talán kőzetmagból, de főleg gázokból, túlnyomórészt hidrogénből, héliumból és illékony szerves molekulákból állnak); és nem utolsósorban teljesen konzisztens azzal a ténnyel, hogy a Naprendszerben a bolygók közel egy síkban (ekliptika), a Nap forgástengelyére nagyjából merőleges síkban, a Nap forgásával megegyező értelemben keringenek.

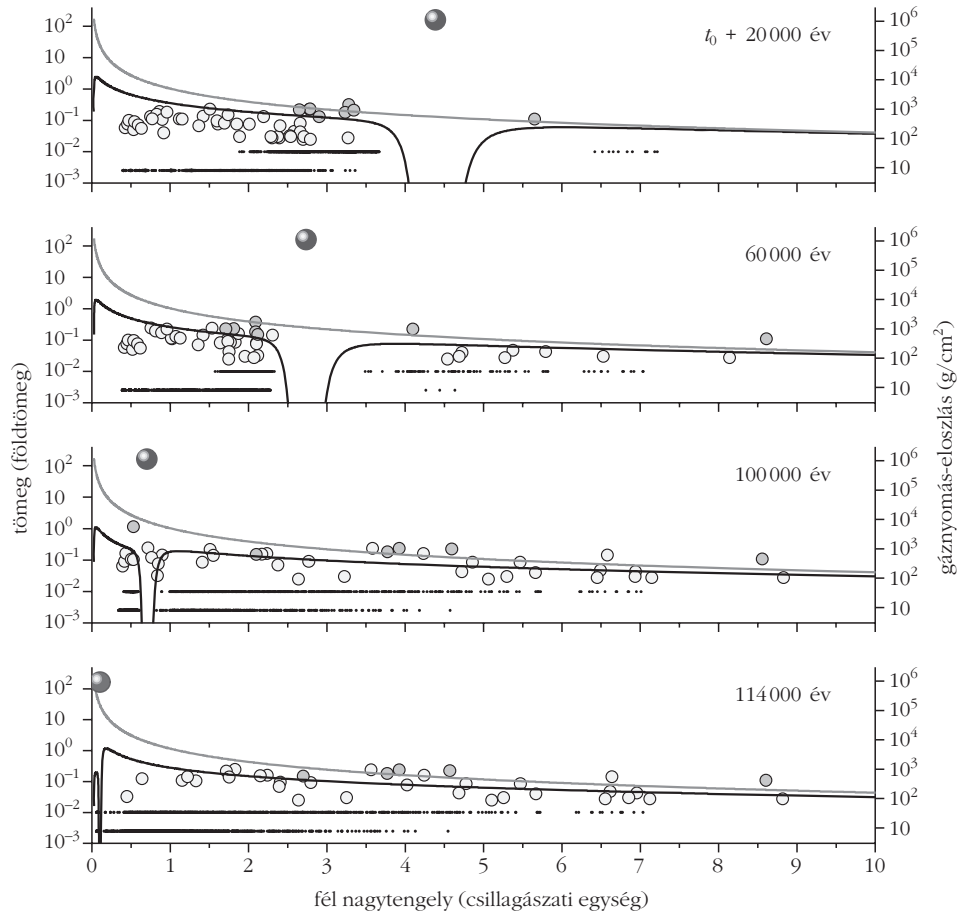
Az elmélet egyik gyengéje, hogy nem tudja megmagyarázni a centiméternél kisebb méretskálájú törmelékek (2. ábra) összeállását 100 m méretskálájú planetezimálokká. A kis mérettartományban az adhézió és az elektromos erők, a nagyobb mérettartományban a gravitáció hatékonyan tudja összetapasztani a kis sebességgel rugalmatlanul ütköző törmelékdarabokat, viszont nem ismerünk olyan fizikai folyamatot, amely a közbülső 4 nagyságrend áthidalásában hatékonyan szerepelhetne. Váratlan nehézséget jelentett a távoli naprendszerek szerkezetének megismerése is. Egyrészt kiderült, hogy a gázbolygók eloszlása általában nem követi a Naprendszerben megismert szerkezetet, sőt, a csillaghoz egészen közel is keringhetnek gázbolygók (ezek a *forró Jupiter*ek). Másrészt az exobolygók pályája az esetek jelentős részében (akár felében, de a kis minta miatt az arány még eléggé bizonytalan) keringhetnek a csillag forgástengelyére nagy szögben hajló pályán, és akár a csillag forgásával ellentétes irányban. Mivel a csillag egyenlítői síkja és a bolygópályák a megfigyelt rendszerek mintegy 30%-ában szembe fordítottak egymástól, a bolygórendszerek kialakulása nem lehet szabályszerűen kvázi-egyensúlyi folyamatok eredménye. Az „összevissza” irányban keringő bolygók magyarázatához heves szórási történetet, általában hosszan tartó kaotikus dinamikát szokás feltételezni, amelyekben nagy tömegű bolygókat veszít a naprendszer. Mivel ezeknek a folyamatoknak egyikéről sem tud számot adni, az ütköző bolygócsírák elmélete átfogó revízióra szorult.

Az új paradigma a diszk hidrodinamikai instabilitásának elmélete, amit *migráló bolygókeletkezés* névvel is szokás illetni. Maga az elmélet három migrációs fázist tartalmaz, és ezeket teljesen külön tárgyalja. Modellszámítások alkalmával azonban az egész folyamat egyetlen átfogó numerikus szimulációval kezelhető, így a migrációs fázisok átmenete *in silico* is hasonlóan simán megy végbe, mint a valóságban. Az első migráció a leglényegesebb. Az öngravitáló gázkorong instabillá válik, amint lehűl egy – sűrűségfüggő – hőmérséklet alá. Először turbulenciák jelennek meg benne, amelyek hamarosan látványos, a korongot globálisan meghatározó spirális szerkezetűvé állnak össze. (A szerkezet kialakulásához vezető folyamat egyébként analóg a galaxisok spirálszerkezetének magyarázatában fellépő hidrodinamikai jelenséggel.) A lokális turbulenciák helyén sűrű, kollabált magvak keletkeznek, amelyek bonyolult, örvénylő szerkeze-

ten keresztül nagyon gyorsan (millió éves időskálán) óriási mennyiségű anyagot nyelnek el, és kialakul a bolygók első generációja: mindegyik nagy tömegű gázbolygó. A második migrációs fázisban a kialakult bolygók a korong viszkozus közegében keringve egyre beljebb sodródnak, míg – egyelőre nem tisztázott arányban, de minden bizonnyal túlnyomórészt – a csillag légkörébe csapódnak. A harmadik migrációs fázisban a korong anyaga egyre ritkábbá válik, ahogy azt „végleg elnyelik” a gázbolygók, ekkor a gázbolygók tömegének lassú növekedése és a pályák stabilizálódása jellemző. (A naprendszer képe még jelentősen módosulhat, ha lassú perturbációk miatt ismét kaotikussá válik a rendszer, ám a bolygók kialakulását ez a fázis már nem érinti.) A bolygókeletkezés végső fázisában a maradék bolygócsírák kiszóródnak a rendszerből.

Eközben létrejönnek a *kisbolygóövek*, ahol a stabilizálódott pályájú planetezimálokat találjuk. Ezek egymással is ütköznek, eleinte jellemzően összetapadnak, majd a nagyobb darabok a további ütközések alkalmával szétaprózódnak – létrehozva így a kis égitesteket. A hasonló pályán keringő, közös anyagból származó törmelékdarabok alakítják ki a *kisbolygócsaládokat*. A szétaprózódási fázis kezdetén voltak a legnagyobbak az ős-kisbolygók, ezek számát száz-as nagyságrend körül szokás becsülni. A jellemző méret széles skálán változik különböző szerzők álláspontja szerint, három jónévvű kisbolygókutató becslése: 50 km (*Oort*), 120 km (*Pravec*) és 500–1000 km (*Farinella*). A szétaprózódás korszaka után becsapódási korszakok alakító munkáját figyelhetjük meg a bolygók, holdak felszínén. Árnyalja a képet a kisbolygócsaládok eltérő kora: a mai, családtagként azonosított törmelék pályáját időben visszafelé követve megállapítható az az időpont, amikor a család tagjai szétrepültek. A legidősebb családok 2-3 milliárd évesek, ám ismerünk néhány százmillió éves kisbolygócsaládot is.

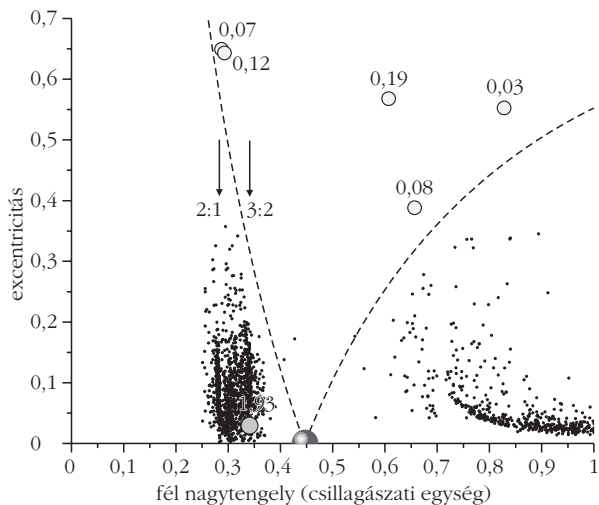
A bolygócsírák természetes ütemű fogyásának korszakához társul a *korai bombázás* korszaka. Perturbációs hatások következtében (rezonáns bolygópályák kialakulása, közeli csillag elhaladása a naprendszer



3. ábra. Migráló bolygókeletkezés numerikus szimulációja. Egy kezdetben 1 jupitertömegű bolygó indul a csillagtól 5,2 csillagászati egység távolságra, majd 115 ezer év alatt a csillagba csapódik. A korong kezdeti sűrűségprofilját a halvány, az aktuális profilt a fekete vonal ábrázolja. 0,01 és 1 földtömeg közötti bolygócsírák jönnek létre, amelyeknek egy része elhagyja a naprendszert, más részük pedig bolygóvá alakul. A panelek fentről lefelé a gázbolygó kialakulása után 20, 60, 100 és 114 ezer évvel megfigyelhető állapotot mutatják (Fogg, Nelson, 2007, *Astron. & Astroph.* 461, 1195 alapján).

mellett) ugyanakkor a relaxálódott rendszerben is instabillá válhatnak a pályák, és a kisbolygóövekből kiszóródó törmelék újabb, látványos becsapódási korszakhoz vezet (késői bombázás). A kisbolygóütközések során kiszóródó por az ekliptika síkjában szétterül, és az ekliptika síkjában szétterülő porkorongot hoz létre.

A migráló bolygókeletkezés elméletében a kőzetplanetezimálok a második migrációs fázisban jönnek létre, és a harmadik migrációs fázisban állnak össze bolygótestekké a naprendszer olyan tartományaiban, amelyeket dinamikailag is megengednek az óriásbolygók (3. és 4. ábra). Az elmélet rendkívül sikeres és általánosan elterjedt, azonban még legfontosabb jóslata megerősítésre vár: a migráló bolygókeletkezés szerint egymillió év alatt kialakulnak a gázbolygók, míg a bolygócsírák elmélete szerint a folyamat jóval tovább tart. Ha egymillió éves csillag körül gázbolygót találnánk, az perdöntő bizonyítékul szolgálna a migráló bolygókeletkezés modellje mellett. Ennyire fiatal gázbolygót még nem ismerünk (bár folyik a keresése), de a már megtalált, néhány millió éves bolygók mindenképpen a migráló keletkezést támasztják alá.



4. ábra. A 3. ábra szimulációjának állása 105 ezer éves időpontban, a fél nagytengely-excentricitás síkban ábrázolva. A planetezimálok tömegét a feliratok jelzik. A kialakuló belső kisbolygóövben megfigyelhetjük a 2:1 és 3:2 rezonáns űröket. A külső kisbolygóövben is létrejön az 1:2 rezonanciaűr 0,71 csillagászati egység fél nagytengelynél.

## Az ütközések szerepe a mai Naprendszerben

### Érvek az ütközések nagy szerepe mellett

Az 1990-es évtizedben futott csúcstra a naprendszerbeli ütközések szerepét hangsúlyozó értelmezés, amely számos bizonyítékot vonultatott föl. Ez a korszak esett egybe az első űrszondás kisbolygó-megfigyelésekkel, amikor szembesültünk a kisbolygók teljesen kráterezett felszínével, a kráterek méret szerinti eloszlásával és általában a kisbolygók egzotikus alakjával. Részben e látványos eredmények hatására elindult a Földre veszélyes kisbolygókat kereső kutatómunka, a leghíresebb, Föld közeli kisbolygókat kereső távcsövek a NEAT és a LINEAR programokhoz tartoztak.

Az egyik fontos érv, amely szerint az ütközések szerepe a mai Naprendszerben is meghatározó, a kisbolygók forgási statisztikájára épült. A tengelyforgások eloszlása a nagy égitestek esetében Maxwell-Boltzman jellegű, amelynek kialakulása ütközésekkel jól magyarázható. Ezenkívül meglepően nagy számban találtak kis méretű aszteroidákat, amelyek olyan gyorsan forognak, amennyire ez dinamikailag egyáltalán lehetséges. A forgásban lévő kisbolygón centrifugális erő lép fel, amely a gravitációs és a szilárdsági erőkkel nagyjából ellentétes irányú; a pontos numerikus értékek és irányok a kisbolygó alakjától és felépítésétől függenek. A lényeges momentum az, hogy a túl gyors forgás egyszerűen kettészakítja a kisbolygót. Egy adott kisbolygóhoz tehát tartozik egy maximális forgási periódus, amely mellett az égitest egyben maradhat, és a megfigyelések szerint a kisbolygók számottevő hányada ehhez a periódushoz közeli értékkel forog.

Erre a tényre egyszerű magyarázatot kínál az a modell, amelyben a kisbolygók katasztrofális szétvetések láncolatával keletkeznek, fejlődnek. A nagy energiájú ütközés általános esetben nem centrális helyzetű,

ezért a két test lendületének gyors megváltozásán túl a perdület is ugrásszerűen változik, általában jelentős értékre növekedve. Emiatt az ütközésből kikerülő égitestek túl gyorsan forognak, és olyan fokú fragmentációt szenvednek el, amely az ütközéssel járó „ütésből”, a testek belsejében terjedő lökéshullámok roncsoló hatásából nem feltétlenül következne. A forgás miatt fellépő darabolódás mindaddig folytatódik, amíg a keletkező törmelék már a forgás dinamikája szempontjából is stabillá válik. Amikor a további aprózódás folyamata leáll, az égitestek még mindig gyorsan forognak, a kritikus értékhez közeli, de már azt nem meghaladó forgási sebességgel; így a modell az erre vonatkozó megfigyelésekkel összhangban áll. Megemlítendő azonban, hogy néhány aszteroida forgási periódusa nagyon hosszú, több száz napos periódusok is ismertek, ez a megfigyelés nem magyarázható ütközési modellek segítségével.

Egy másik fontos megfigyelés, hogy a kisbolygók eltérése a gömbalaktól annál nagyobb, minél kisebb az égitest. A néhány kilométer átmérőjű kisbolygók között a nagyon elnyúlt, akár 1:10 tengelyarányú szilánkok sem ritkák, és ezeket a formákat a legkönnyebben ütközésről lepattant valódi szilánkokként lehet elképzelni.

A Földet jelentősen megközelítő kisbolygók is az ütközések nagy fontosságát sugallták. Ezeket az égitesteket az 1990-es években kezdték nagy számban fölfedezni, kifejezetten azzal a céllal, hogy megismerjük a veszély mértékét, amely a néhány száz méter átmérőjű égitestek becsapódásával fenyeget. A meglepő eredmény az volt, hogy relatíve nagyszámú égitest fölfedezésével járt az észlelési kampány. Ahhoz képest mindenképpen jelentős számú égitest kering a Földhöz közeli pályán, hogy mennyire nehéz (szinte lehetetlen) klasszikus égi mechanikai folyamattal egy fővbeli kisbolygót közel „juttatni” a Föld pályájához. Magyarozatképpen az ütközési elmélet szolgált: a legnagyobb energiájú ütközésekből esetleg akkora sebességgel szakadhatnak ki szilánkok, hogy a Földhöz közeli pályára lökődnek, ahol később a bolygók, immár elsősorban a Mars és a Föld dinamikai környezetében valamennyi időre stabilizálódnak.

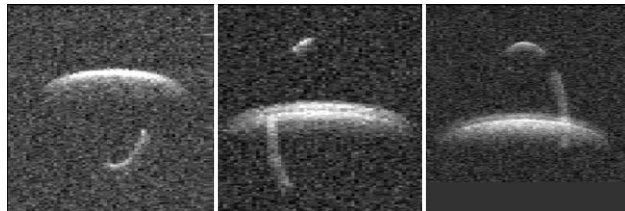
A kilencvenes évek második felében, elsősorban a kisbolygókat megközelítő űrszondák pályaváltozásának vizsgálatából következtetve kiderült, hogy a kis égitestek nem lehetnek monolit szerkezetűek, a sűrűségük ehhez egyszerűen túl kicsi. Elterjedt tehát a kozmikus kőrákás hipotézis, amely szerint a kis égitestek porozitása nagy: kisebb méretű, de összességében jelentős térfogatú üres térrészek vannak a belsejükben. Ez az érv teljesen átírta a kisbolygókkal kapcsolatos spekulációk sodorvonalát: egyrészt csökkentette a testekben fellépő gravitációt és a szilárdsági erőket, ezzel még exponáltabbá tette a már tárgyalt tengelyforgás problémáját. Másrészt viszont új lehetőséget kínált az elnyúlt alakok magyarázatául: a gyors forgás közvetlenül okozhat elnyúlt alakot, a centrifugális erő hatékonyan képes az alak ellapítására, ha a test nyírószilárdsága kellőképpen kicsi. Sőt, napvilá-

got láttak az elnyúlt alakok magyarázatát a bolygók megközelítésekor föllépő árapályerőkben kereső elméletek is, amelyek nem egyszer azzal is alátámasztották érveiket, hogy a nagyon elnyúlt kis égitestek aszimmetriái egyfajta – szó szerint megkövült – „árapálycsapot” látszanak formázni.

Szintén az elmúlt másfél évtizedben kezdtek el tucatszámra fölfedezni a kettős és többszörös kisbolygókat, amelyek körül egy vagy több kísérő kering stabil pályán (5. ábra). A felfedezéshez használt módszerek szerteágazóak: lehetséges a hold közvetlen megfigyelése űrszondával vagy földi bázisú interferometriával; a hold kimutatása kölcsönös fedések alapján, ha a fedési kettőscsillagokhoz hasonló fénymenet figyelhető meg; a hold kimutatása csillagfedések megfigyelésével (többszörös elhalványodás látszik) stb. A megdöbbentő adat a kettős kisbolygók relatíve nagy száma, amely mindenképpen magyarázatot igényel. Egy lehetséges, becsapódás-orientált magyarázatot a katasztrofális ütközésből szétrepülő törmelék nagyobb része egy centrális égitestre visszahullik (létrejön egy porózus szerkezetű domináns kisbolygó), míg egy másik része egy vagy több kisebb csomóba tapadhat össze, ezek lesznek a kísérők. (A törmelék egy része egyszerű dinamikai okokból természetesen végleg elhagyja az ütközés helyszínét.) Ily módon tehát a kettős kisbolygók magyarázata is szorosan kapcsolódik össze az ütközésekkel.

Az ütközés numerikus modelljének fontos speciális esete a bolygótest méretű planetezimálok ütközése. Az ilyen eseményekben is megfigyelhető a nagy mennyiségű törmelék szétrepülése és a darabok nagy részének újbóli összeállása két égitestté, amelyek egy bolygó-hold párosként folytatják életüket. Valójában a Föld Holdjának kialakulására a mai napig a legsikeresebb magyarázatot az Ős-Föld és egy Mars méretű bolygócsíra ütközése szolgáltatja; egyedül ez a modell képes olyan finomságok megmagyarázására, mint a Hold elemgyakoriságainak és ásványainak hasonlósága a Földhöz, miközben a Hold életkora és a test sűrűsége kisebb a Földénél (hiszen a Föld kialakulása után keletkezett, jórészt a felső köpeny anyagából).

Az ütközések gyakoriságára és mai jelentőségére egy lehetséges végső érvet szolgáltat az *állatövi fény* léte. A főleg tavaszi napkelték előtt, őszi napnyugták után szabad szemmel is látható fénylés az ekliptika mentén az infravörös égbolt egyik leglátványosabb komponense, amely nem más, mint a Naprendszer síkjában keringő meleg por szórt fénye (az optikai tartományon) és hősugárzása (az infravörösben). Az állatövi porral kapcsolatos fontos ismeret, hogy a por-korong nem lehet stabil képződmény. A porszemcséket folyamatosan erodálja, aprítja a Nap elektromágneses sugárzása, különösen az ultraibolya és a röntgenkomponens; illetve a kis porszemcsék elég gyorsan örökre elhagyják a Naprendszert, hiszen a rájuk ható fénynyomás (a méret második hatványával, a keresztmetszettel arányos, anyagi jellemzőktől és mágneses orientációtól is függ) kis testek esetén a



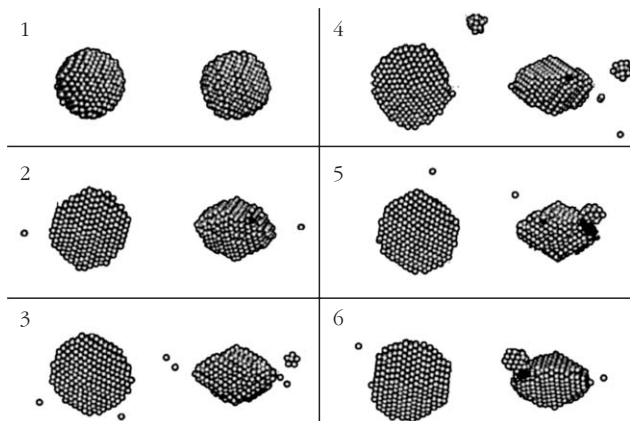
5. ábra. Az 1994 KW4 kisbolygó radarképe az 1999-es földközelség alkalmával. Az alak erősen elnyúlt, a test kistengelye mentén pedig egy kísérő keringését láthatjuk (a hold elmozdult a mérés alatt, ezért mosódik ívvé a képe).

gravitációval összemérhető erővé válik (ez utóbbi a térfogattól, tehát a méret harmadik hatványától függ), és a fénynyomás hatékonyan „fújja ki” a kis porszemcséket. A közepes porszemcsék élete nem ennyire egyszerű, ezek a később tárgyalandó Poynting–Robertson-effektus miatt belespiráloznak a Napba. A tanulság az, hogy a meglévő állatövi por néhány tízmillió éves időskálán elfogy a Naprendszerből, tehát ha jelenleg látunk port, az arra utal, hogy a por folyamatosan működő forrása jelen van a Naprendszerben. Az egyik lehetséges jelölt a kisbolygók ütközése, illetve az ütközésekben fölszabaduló mikroszkopikus méretű por.

### Érvek az ütközések kisebb szerepe mellett

Az utóbbi években a Naprendszer kis égitestjeiről óriási mennyiségű információhoz jutottunk, másrészt megfigyelhettük kis égitestek övezetét más csillagok körül, harmadrészt pedig olyan egzotikus fizikai folyamatokra derült fény, amelyek végül jelentősen átalakították a naprendszerek dinamikájáról alkotott képünket. A megfigyelési anyag gyűjtésében élen járt a Sloan Digitális Égboltfelmérés (SDSS), amely csak a Naprendszer kis égitestjeiről (Sloan-os kifejezéssel élve: mozgó objektumairól) közel félmillió mérést végzett. A legfontosabb újdonság a kis égitestek méreteloszlásával kapcsolatos: kiderült, hogy a kisbolygók eloszlásában a 3-5 km mérettartomány körül látványos letörés következik be, a kritikus méretnél kisebb égitestek száma jelentősen elmarad attól, amit az 5 km-nél nagyobb tartomány lineáris extrapolációja sugallt. A kisbolygócsaládok részletes vizsgálata szerint a letörési pont és a letörés mértéke kismértékben változik a különböző családok között, de jellemzően azzal az eredménnyel jár, hogy a 100 méter körüli méretű égitestek darabszáma mintegy tízszer kisebb, mint a lineáris illesztés, vagy akár az egyensúlyi ütközési fejlődés sugallaná. Ez a mindennapi élet szempontjából is fontos információ, hiszen éppen a 100 méter nagyságrendű égitestek azok, amelyek a Földre leginkább veszélyt jelentenek: a Föld pályájához közel alig néhány ennél lényegesen nagyobb égitest kering; a 100 méteres méret elegendően nagy pusztítást tud véghezvinni becsapódás esetén, viszont ez a méret még éppen elég apró ahhoz, hogy az égitest nagyon sokáig észrevétlen maradhasson, sőt a becsapódás akár teljesen váratlanul érje az emberiséget. Ha a kisbolygók méreteloszlása olyan, hogy ebből a fajtá-





6. ábra. Kisbolygó alakjának fejlődése és hold kialakulása YORP effektussal (Walsb, Michel, 2008). Az égitestet a teljes szimuláció hat állapotában látjuk a forgástengely felől (a képpárok bal oldalán) és oldalról (a jobb oldalán). A teljes szimuláció animálva megtekinthető a youtube videomegosztón (<http://www.youtube.com/watch?v=nzyettXklqY>)

ból tízszer kevesebb van, mint azt korábban gondoltuk, az azt jelenti, hogy a közepes méretű becsapódások jelenkori gyakorisága egy nagyságrenddel marad el a korábban érvényes becsléstől. Ettől persze még nem alhatunk tízszer nyugodtabban, mint tíz éve...

Váratlanul sikeresnek bizonyult a forgó testek felszínén jelentkező hőszugárzási anizotrópia felismerése. Az elmélet egyszerre volt képes megmagyarázni a nagyszámú kisbolygót a Föld pályájához közel, a kisebb aszteroidák elnyúlt alakját, a sok kettős kisbolygót, a nagyon lassan forgó égitesteket és a kritikus sebességgel forgó kisbolygók nagy számát. A hőszugárzási anizotrópia oka a test hőtehetetlensége: a belső rétegek hűtési mechanizmusa miatt a felszín nem akkor a legmelegebb, amikor a Nap a lokális zenitben jár, hanem valamivel később: amikor a belső rétegek is átmelegedtek kissé, a felszíni hő elvezetése már kevésbé hatékony, viszont a besugárzás még mindig elegendően nagy. Ezt a jelenséget a Földön is észlelhetjük, egyszerűen megfogalmazva úgy, hogy kora délután melegebb van, mint délben. A kisbolygók felszínén a folyamat rendkívül bonyolult, jellegzetesen egyenetlen hőterképet hoz létre, ahol egy „délutáni” pontra esik a mindenkor legmelegebb terület. A felszín saját hőszugárzása ezért anizotróp, a délutáni oldal erősebben sugároz. A sugárzási anizotrópia miatt a hőszugárzás által elvitt összes lendület nem nulla, a délutáni oldal felől egy rendkívül kis mértékű, ám folyamatosan ható erő tolja el a pályán keringő égitestet. Ez az erő a *prográd*, keringéssel azonos forgású égitesteket egyre nagyobb, a *retrográd*, fordított forgási irányú testeket egyre kisebb sugarú pályára sodorja, és végül milliárd éves időskálán a teljes Naprendszer képét átalakítja (Jarkovszkij-jelenség). A Naprendszer földközeli égitestjeit is ez az erő terelte különleges pályára, ami annak fölfedezésekor derült ki, hogy ezek a kisbolygók túlnyomórészt retrográd irányban forognak! A helyzetet bonyolítja, hogy valójában rögtön kétféle Jarkovszkij-jelenséggel kell számolnunk: a napi komponens, amely a délutáni oldal

felmelegedésével kapcsolatos, míg az éves Jarkovszkij-jelenség a nyári félteke erősebb felmelegedése miatt lép föl.

Az állatövi porra is hat egy hasonló erő, de ott nem a hőtehetetlenség, hanem a fény aberrációja okoz aszimmetriát. A keringő porszem saját vonatkoztatási rendszerében a beeső napsugarak aberrációt szenvednek, olyan értelemben, hogy saját vonatkoztatási rendszerében a porszem mindig kicsit „előlről” kapja a napfényt. A fotonok ezért lassítják a porszemcsék keringését, amelyek a Napba spiráloznak (Poynting–Robertson-jelenség).

A Jarkovszkij-jelenségnél fellépő sugárzási anizotrópia forgatónyomatékokat is kifejt a forgó égitestre, amely százmillió éves időskálán képes jelentős mértékben „fölpörögni”: ez a YORP (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack) jelenség. Ennek hatása az, hogy az alkalmas formájú kisbolygók forgása képes a test szétszakadásának határáig gyorsulni, aminek következtében a test szélsőségesen elnyúlttá válik, és megjelennek a jellegzetes „szilánk” alakzatok. Extrém esetben a test szabályosan kettéválik középen, a kisbolygó alakja „kutyacsont” formában deformálódik, vagy a leszóródó anyag újbóli összeállása után kisméretű kísérők, holdak jelennek meg a domináns égitest körül (6. ábra). Maga az effektus bonyolult viselkedéshez vezet, az alak elnyúltsága és forgási periódusa a kiinduló paramétereiktől és az égitest pályájának jellegétől függően akár monoton módon, akár periodikusan, akár kaotikusan változhat. Ellentétben a Jarkovszkij-jelenséggel, a YORP működésére közvetlen bizonyítékot nehéz találni, ám a forgási sebességek eloszlását összességében jól magyarázza, és az is kézenfekvő, hogy ha a Jarkovszkij-jelenség föllép a Naprendszerben, ott a YORP is szükségképpen fontos szerepet játszik.

Az ütközéses elméletek jelentős sikert értek el a Hold kialakulásának magyarázatában. Azonban úgy tűnik, más naprendszerekben ritkán zajlanak hasonló óriási ütközések. Egy ilyen ütközéshez ugyanis szükséges, hogy a fiatal naprendszerekben nagy mennyiségű törmelék legyen jelen, amelyből a bolygó méretű becsapódó testek összeállhatnak. A becsapódás után néhány tízmillió évig pedig magának a becsapódásnak az egyre oszló törmelékfelhőjét kellene megfigyelünk – ez jól látszana az infravörös tartományon. Azonban a megfigyelések szerint kevés olyan fiatal, távoli naprendszer van, amelyben jelentős mennyiségű törmelék van jelen, tehát föltételezhetően kevés naprendszerben alakul ki nagyobb hold valamelyik bolygó körül.

A becsapódások jelentősége melletti érvek közül utolsóként említettük az állatövi port, amelynek folyamatos forrására a kisbolygók ütközései nyújthatnak alkalmas magyarázatot. A múlt évben végeztek egy vizsgálatot a Spitzer-űrtávcsővel, amelyben az állatövi por ekliptikai eloszlását vetették össze a nagyobb kisbolygócsaládokkal és az üstökösökkel. Az összevetés eredménye meglepő: nincs olyan kisbolygócsalád, amelyhez egyértelműen köthető lenne az állatövi por

szerkezete. Viszont a Jupiter üstökös családjá, a rövid periódusú üstökösök pályaeloszlása pontosan követi az állatövi por eloszlását; kézenfekvő magyarázat tehát, hogy az állatövi por nagy részben, legalább 85%-ban, az üstökösökből származik, a normális anyagtermelés eredményeként, ütközési folyamatok közbeiktatása nélkül.

## Kitekintés

A naprendszerek ütközési korszakának közelmúltbeli átértékelése egy napjainkig zajló folyamat, amelynek tendenciája nyilvánvaló. Ennek ellenére nem beszélhetünk klasszikus paradigmaváltásról, talán még versengő paradigmákról sem (talán egyedül a sugárzási anizotrópiák elméletei illenének ebbe a fogalomkörbe). A jelenségek összetett voltát tekintve inkább hangsúlyeltolódásról kell beszélnünk: az ütközések szerepe kisebb súllyal jelenik meg a mai Naprendszerünk, tehát általánosságban fogalmazva, az öreg naprendszerek esetében, viszont sokkal tisztábban körvonalazódik szerepük a fiatal naprendszerekben és a bolygórendszerek korai fejlődésében. Ha csak az állatövi por üstökös eredetére gondolunk, eszünkbe

kell, hogy jusson az a jó néhány fiatal naprendszer, amelyben ezerszer, tízezerszer több meleg port detektálhatunk, mint a mai Naprendszerben. Lehetséges, hogy ott valóban tízezerszer akkora üstökös populáció kering, mint a Jupiter mai üstökös családjá? Ha arra gondolunk, hogy a Föld felszínére a vizet üstökösök (vagy jeges kisbolygók) becsapódása szállíthatta, a fiatal naprendszerek óriási üstökös populációjának elképzelése sem jelent áthidalhatatlan nehézséget, és egy ilyen üstökösfelhő detektálása sem reménytelen a mai legjobb műszerekkel.

Az elmúlt években a csillagászati kutatások valójában olyan dologgal szembesültek, amely egyáltalán nem volt váratlan: nem meglepő, hogy a korai naprendszerekben sokkal jelentősebb volt a becsapódások és az ütközések hatása, mint a fejlődés kései fázisában. Hogy mégis a mi Naprendszerünkben kellett föl kutatni az ütközések nyomát, annak egyszerűen az volt az oka, hogy szinte lehetetlen volt távoli, fiatal naprendszereket megfigyelni. Az obszervációs technikák gyors fejlődésének köszönhetően néhány éve már számos távoli naprendszerbe nyerhetünk bepillantást, és immár a legmegfelelőbb környezetben, a kialakuló naprendszerekben is tanulmányozni tudjuk az ütközések hatását.

# GRAVITÁCIÓ ÉS GRAVITOMÁGNÉSSÉG

Vető Balázs

ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék

*A testek közötti gravitációs, illetve az elektromos töltések között fellépő Coulomb-kölcsönhatás erős formai hasonlóságot mutat. Mozdó töltések kölcsönhatása során a Coulomb-erő mellett mágneses, úgynevezett Lorentz-erő is fellép. Kevésbé közismert, hogy mi történik két mozgó tömeg kölcsönhatása esetén. A cikkben áttekintjük, mit mond a mozgó tömegek kölcsönhatásáról a klasszikus fizika, a speciális és az általános relativitáselmélet.*

A klasszikus fizika kísérleti tapasztalat alapján ismerte meg az elektromos töltések között fellépő elektromos, vagy Coulomb-kölcsönhatást (1785) és a mágneses testek között fellépő mágneses kölcsönhatást. Oersted kísérlete (1820) óta tudjuk, hogy a mágneses kölcsönhatást is elektromos töltések idézik elő. A kizárólag mozgó töltések között fellépő mágneses kölcsönhatást úgy értelmezzük, hogy a mozgó töltések (áramok) maguk körül mágneses teret hoznak létre, és ebben a térben mozgó elektromos töltésekre mágneses, vagy más néven Lorentz-erő hat.

A testek közötti tömegvonzás törvénye is kísérleti alapon született. Newton 1666-ban a hold mozgásából és a testek földfelszíni szabadesése alapján felállított törvényét Cavendish híres kísérlete csak 1798 körül igazolta. Kizárólag mozgó tömegek között fellépő kölcsönhatásra utaló kísérleti megfigyelést vagy el-

méleti előrejelzést a klasszikus fizika nem mutatott fel. Meg kell jegyezni, hogy 1870 környékén Holzmüller és Tisserand felvetették, hogy a Merkúr perihélium-elfordulásának a klasszikus égi mechanika által nem magyarázható részét mozgó tömegek között fellépő erő okozza. Egy ilyen erő a mozgó töltések között fellépő Lorentz-erő gravitációs hasonmása lenne. Ez az elképzelés, elméleti és kísérleti alátámasztás híján, kidolgozatlan hipotézis maradt.

Az alábbiakban áttekintjük azt, hogyan kezeli mozgó tömegek kölcsönhatását a klasszikus fizika, a speciális, illetve az általános relativitáselmélet.

## A gravitáció klasszikus leírása

A klasszikus fizika a tömegvonzás törvényét két tömegpont gravitációs kölcsönhatásának mennyiségi leírásával adja meg:

$$\mathbf{F}_G = -\frac{G m_1 m_2}{r^3} \mathbf{r}. \quad (1)$$

Az  $\mathbf{F}_G$  jelenti az  $m_1$  által az  $m_2$  tömegpontra kifejtett gravitációs vonzóerő vektorát,  $\mathbf{r}$  pedig az  $m_1$  tömegpontból az  $m_2$ -be mutató vektort. Az  $m_1$  tömegpont gravitációs térerősségét a

$$\mathbf{g} = -\frac{G m_1}{r^3} \mathbf{r} \quad (2)$$

egyenlettel bevezetve  $\mathbf{g}$  jelenti az  $m_1$  tömegpont által az  $\mathbf{r}$  helyen létrehozott gravitációs teret. A  $\mathbf{g}$  gravitációs térerősségvektorral kifejezve az  $m_2$  tömegpontra ható gravitációs vonzóerő felírható  $\mathbf{F}_G = m_2 \mathbf{g}$  alakban is.

A gravitációs törvény szerint a két tömegpont által egymásra kifejtett gravitációs erő csak azok tömegétől és távolságától függ és nem függ a kölcsönható testek sebességétől. A gravitációs kölcsönhatás ebben erős formai hasonlóságot mutat az elektromos kölcsönhatással, mivel két pontszerű,  $q_1$  és  $q_2$  töltésű,  $\mathbf{v}_1$  és  $\mathbf{v}_2$  sebességgel mozgó test egymásra kifejtett elektromos hatása,

$$\mathbf{F}_C = \frac{k q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (3)$$

sem függ a töltött testek sebességétől. A hasonlóság mellett létezik egy lényeges eltérés két tömegpont gravitációs, illetve két ponttöltés elektromos kölcsönhatása között. Ellentétben a mozgó tömegekkel, mozgó töltések között fellép egy

$$\mathbf{F}_L = \frac{\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{F}_C)}{c^2} \quad (4)$$

mágneses Lorentz-erő is. A klasszikus fizika a mágneses kölcsönhatást az elektromos kölcsönhatástól függetlenül, önálló jelenségként kezeli, annak ellenére, hogy a (4) egyenlet kapcsolatot teremt két ponttöltés közt fellépő Coulomb- és Lorentz-erő között.

A klasszikus tárgyalás nem ismer mozgó tömegek gravitációs kölcsönhatásakor fellépő, sebességfüggő gravitomágneses erőt. Az elektromos és gravitációs kölcsönhatás formai hasonlósága elektromágneses mintára sugallhatta egy

$$\mathbf{F}_{GL} = \frac{\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{F}_G)}{c^2} \quad (5)$$

alakban felírható gravitomágneses „Lorentz-erő” létét, de egy ilyen erő felvetése csak spekuláció, mivel az elmélet ilyen erőt nem jósol, és annak létét (ellentétben az elektromágneses Lorentz-erővel) kísérleti tapasztalat sem igazolja. Megjegyezzük, hogy ilyen gyenge kölcsönhatás a 19. században kísérletileg nem volt kimutatható.

## A speciális relativitáselmélet – a gravitáció Lorentz-invarianciája

A speciális relativitáselmélet kimondja az inerciarendszerek egyenértékűségét, miszerint a fizikai jelenségek bármely két inerciarendszerből nézve azonosan mennek végbe. A speciális relativitáselmélet szerinti leírásban elvárjuk, hogy a gravitáció épp úgy, mint az elektromos

vagy a mágneses kölcsönhatás, azonosan menjen végbe bármely inerciarendszerben. Vizsgáljuk meg, hogyan teljesül az egyenértékűség az előbb felsorolt három jelenségre. Kezdjük az elektromos kölcsönhatással.

A mozgó testek mozgásirányú méretének rövidülése (Lorentz-kontrakció) következtében a speciális relativitáselmélet szerinti felírásban módosul a mozgó töltések elektromos és mágneses terének klasszikus fizikában felírt alakja. Míg a klasszikus fizika nem tett különbséget a nyugvó és mozgó töltés tere között, a speciális relativitáselméletben módosul a mozgó töltések tere. Eltérően viselkedik a térerősség sebességgel párhuzamos, illetve arra merőleges komponense.

Az elektromos és mágneses kölcsönhatás relativisztikus leírása azzal a figyelemre méltó tulajdonsággal rendelkezik, hogy két töltés között fellépő elektromos és mágneses erő csak együttesen tesz eleget a Lorentz-invariancia feltételnek, vagyis annak, hogy bármely két inerciarendszerből megfigyelve azonos jelenséget mutatnak. Ez a felismerés a speciális relativitáselméletben elválaszthatatlanná teszi az elektromos és mágneses kölcsönhatást, csak együtt léteznek, és egyetlen jelenséget, az elektromágneses kölcsönhatást képezik. Egy korábbi cikkben [1] megmutattam, hogy a mágneses kölcsönhatás léte következik az elektrosztatikából és a speciális relativitáselméletből.

A mozgó tömegek gravitációs tere is módosul a speciális relativitáselméletben. A  $\mathbf{v}_1$  sebességgel mozgó  $m_1$  tömegpont gravitációs terének sebességre merőleges, illetve párhuzamos komponensei:

$$\mathbf{g}_\perp = \gamma_1^2 \mathbf{g}_{0\perp}, \quad \text{illetve} \quad \mathbf{g}_\parallel = \gamma_1 \mathbf{g}_{0\parallel}, \quad (6)$$

ahol a  $\mathbf{g}_0$  a nyugvó  $m_1$  tömegpont gravitációs terét jelöli és

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}.$$

Ezek után vizsgáljuk meg a mozgó  $m_1$ ,  $m_2$  tömegpontok relativisztikus gravitációs kölcsönhatását. A  $v_1$  sebességgel mozgó  $m_1$  tömegpont a (6) egyenlettel felírt  $\mathbf{g}$  relativisztikus gravitációs terében  $v_2$  sebességgel mozgó  $m_2$  tömegpont kinetikus energiájának tömege is részt vesz a kölcsönhatásban, tehát a relativisztikus gravitációs erő:

$$\mathbf{F}_G = \gamma_2 m_2 \mathbf{g}. \quad (7)$$

Egyszerű Lorentz-transzformációval megállapítható, hogy a (7) egyenletben felírt gravitációs kölcsönhatás nem Lorentz-invariáns. A speciális relativitáselmélet viszont előírja, hogy az inerciarendszerek egyenértékűek, tehát ha érvényes a speciális relativitás, akkor a gravitáció jelenségének is Lorentz-invariánsnak kell lenni. Tegyük Lorentz-invariánssá a gravitációt! Az eljárás lényege, hogy kiegészítjük a gravitációs kölcsönhatást egy  $\mathbf{F}_R$  ismeretlen additív taggal és ezzel felírjuk az  $\mathbf{F}_{RG}$  Lorentz-invariáns gravitációs kölcsönhatást az új taggal bővített formában:

$$\mathbf{F}_{\text{RG}} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_R. \quad (8)$$

A kapott erőt Lorentz-transzformáció segítségével egyenlővé tesszük  $m_2$  nyugalmi rendszerében mért gravitációs erővel. Az így kapott egyenletből az ismeretlen erőtag meghatározható. A számolást és a transzformációt elvégezve az ismeretlen erőtagra kapott eredmény  $v_1 v_2 / c_2$  első hatványa szerinti közelítésben:

$$\mathbf{F}_R = 2 \frac{\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{F}_G)}{c^2}. \quad (9)$$

A kapott eredmény fontos. Azt jelenti, hogy az inerciarendszerek csak akkor egyenértékűek a gravitációra nézve, ha létezik egy, a mozgó tömegek között fellépő erőhatás, amit az elektromágnességgel mutatott formai analógia miatt nevezhetünk gravitációs, vagy gravitomágneses Lorentz-erőnek. A (9) egyenletben kapott, a gravitáció Lorentz-invarianciáját biztosító erő éppen kétszerese az (5) egyenletben, a klasszikus fizikában az elektromágneses analógia alapján felvetett gravitációs Lorentz-erőnek. Ennek oka, hogy a gravitációs kölcsönhatásban szerepet játszik a mozgó test mozgási energiájának tömege is, míg az elektromos kölcsönhatásban a mozgási energia nem játszik szerepet. A (9) egyenletben bemutatott eredménnyel megegyező gravitomágneses Lorentz-erő létét a speciális relativitáselmélet alapján, más módszerrel vezeteli *Karlsson* [2].

A (9) egyenletben kapott eredmény értékelésekor nem szabad elfelejteni, hogy a speciális relativitáselmélet nem írja le pontosan a gravitáció jelenségét, így a fenti eredmény is pontatlan egy kettes faktor mértékben – bár jobb a klasszikus fizikai leírásnál. Ez a legfőbb oka annak, hogy a speciális relativitáselmélet által jóslott gravitomágneses Lorentz-erő nem került a tankönyvekbe. A fenti gondolatmenetben bemutatott gravitomágneses Lorentz-erő inkább módszertani értékű és az eredményt a klasszikus fizikához történő összehasonlításra, annak pontatlanságával együtt kell kezelni. A gravitomágnesség pontosabb közelítése az általános relativitáselméletből származtatható.

## Az általános relativitáselmélet és a gravitomágnesség

A gravitáció jelenségének merőben új felfogását hozta az 1915-ben megjelent általános relativitáselmélet. A négydimenziós sík téridőt a benne lévő tömegek „meggörbítik” és a gravitáció jelenségét az általános relativitáselmélet a görbült téridő hatásaként értelmezi. A görbült téridő szemlélet szerint a testek nem fejtenek ki egymásra gravitációs erőt. A görbült téridőben az erőhatásmentes testek úgynevezett geodetikus görbék mentén mozognak. Két test gravitációs kölcsönhatásakor az egyik test a másik által meggörbített téridő egy geodetikusa mentén mozog. Ebben a

szemléletben nincs helye a gravitációs erőt kiegészítő gravitomágneses kölcsönhatásnak sem.

Az általános relativitáselméletben a görbült téridő szemlélet mellett, gyenge gravitációs tér és kis sebességek ( $\Phi, v \ll c^2$ ) esetén,  $\Phi/c^2$ , illetve  $v^2/c^2$  tagok magasabb kitevőjű hatványainak elhanyagolásával tartható az erőszemlélet is. Ebben az esetben a négyes ívhossz integráljának segítségével felírt, közelítő Lagrange-függvény deriválásával juthatunk a mechanikában megszokott mozgásegyenlethez. Két,  $m_1, m_2$  tömegű, egymás gravitációs hatása alatt  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$  sebességgel mozgó tömegpont Lagrange-függvénye  $\Phi/c^2$ , illetve  $v^2/c^2$  szerinti első rendű közelítésben:

$$L = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \frac{G m_1 m_2}{r} + \frac{m_1 v_1^4 + m_2 v_2^4}{8 c^2} + \frac{G^2 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{2 c^2 r^2} + \frac{G m_1 m_2}{2 c^2 r} \left[ 3 (v_1^2 + v_2^2) - 7 (\mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2) - \frac{(\mathbf{v}_1 \mathbf{r})(\mathbf{v}_2 \mathbf{r})}{r^2} \right]. \quad (10)$$

A Lagrange-függvényből előállított mozgásegyenletben az

$$\mathbf{F}_G = \frac{G m_1 m_2 \mathbf{r}}{r^3}$$

vezető tag mellett megjelennek sebességtől függő erőtagok is, így más tagok mellett az

$$\mathbf{F}_{\text{GL}} = 4 \frac{\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{F}_G)}{c^2} \quad (11)$$

erő is, amely a gravitomágneses Lorentz-erő általános relativitáselméletből származó alakja. Az általános relativitáselmélet alkalmazása, amely figyelembe veszi, hogy gravitációs térben az órák lassabban járnak és a méterrudak megrövidülnek, arra az eredményre vezet, hogy gyenge gravitációs tereknek és kis sebességeknek megfelelő közelítés esetén a gravitációs kölcsönhatásnak része egy, a mozgó tömegek között fellépő gravitomágneses Lorentz-erő, amely kétszer akkora, mint a speciális relativitáselmélet által jóslott hatás.

## Diszkusszió a gravitomágnességről

A gravitomágnesség fogalma megtalálható az általános relativitáselmélet tankönyvekben. *Wald* [3] a gravitáció lineáris közelítése kapcsán vezet be a jelenséget és a gravitomágnesség térjellemzőjét, a gravitomágneses térerősséget. A gravitomágnesség két térjellemzővel, a  $\mathbf{g}$  gravitációs térerősséggel és a  $\mathbf{b}$  gravitomágneses térrel jellemezhető. *Mashboon* [4] levezeti és összefoglalja a gravitomágnesség Maxwell-egyenleteit. Zárójelben az elektromágnesség Maxwell-egyenletei láthatók.



$$\text{rot } \mathbf{g} = -\frac{1}{2} \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} \quad (12)$$

$$\left( \text{rot } \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)$$

$$\text{rot } \frac{\mathbf{b}}{2} = -\frac{4\pi G}{c^2} \mathbf{j}_m + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} \quad (13)$$

$$\left( \text{rot } \mathbf{B} = \frac{4\pi k}{c^2} \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

$$\text{div } \mathbf{g} = -4\pi G \rho_m \quad (14)$$

$$(\text{div } \mathbf{E} = 4\pi k \rho)$$

$$\text{div } \frac{\mathbf{b}}{2} = 0 \quad (15)$$

$$(\text{div } \mathbf{B} = 0),$$

ahol  $\mathbf{j}_m$  a tömegáram-sűrűséget,  $\rho_m$  pedig a tömegsűrűséget jelöli az adott vonatkoztatási rendszerben. Az egyenletek alapján látható, hogy a gravitomágnesség hasonlóságot mutat az elektromágnességgel. A gravitomágneses teret mozgó tömegek, az elektromágneses teret mozgó töltések keltik. Különbség a gravitomágnesség és az elektromágnesség között, hogy a  $\mathbf{b}$  gravitomágneses teret a mozgó tömeg kétszerese kelti és a benne mozgó tömegek duplájára fejt ki hatását. Ezért szerepel a (12)–(15) egyenletekben a  $\mathbf{b}/2$  kifejezés. A gravitomágneses Maxwell-egyenletek tartalmazzák a gravitomágneses indukció jelenségét; az időben változó gravitációs tér gravitomágneses teret indukál és fordítva, az időben változó gravitomágneses tér gravitációs örvényteret kelt. A két jelenség magában hordozza a fénysebességgel terjedő gravitomágneses vagy közismertebb nevükön gravitációs hullámok létének lehetőségét. A (13) egyenletből stationárius gravitációs tér esetén következik a mágneses Biot-Savart-törvény, annak segítségével felírható a  $\mathbf{v}_1$  sebességgel mozgó  $m_1$  tömegű tömegpont által gerjesztett gravitomágneses tér:

$$\mathbf{b} = 2 \frac{G m_1}{c^2 r^3} \mathbf{v}_1 \times \mathbf{r}. \quad (16)$$

A gravitomágneses térben  $\mathbf{v}_2$  sebességgel mozgó  $m_2$  tömegpontra pedig

$$\mathbf{F}_{\text{GL}} = 2 m_2 \mathbf{v}_2 \times \mathbf{b} \quad (17)$$

gravitomágneses Lorentz-erő hat. A (16) egyenletet (17)-be helyettesítve megkapjuk a gravitomágneses Lorentz-erő (11) egyenletben felírt alakját:

$$\mathbf{F}_{\text{GL}} = 4 \frac{G m_1 m_2}{c^2 r^3} \mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{r}). \quad (18)$$

A gravitomágneses térben lévő gravitomágneses dipólusra

$$\mathbf{M} = 2 m_G \times \mathbf{b}. \quad (19)$$

forgatónyomaték hat. Gravitomágneses dipólus minden forgó test. A gravitomágneses dipólusmomentum pedig épp a forgó test impulzusmomentumának a fele, tehát

$$\mathbf{M} = \mathbf{N} \times \mathbf{b}. \quad (20)$$

A forgatónyomaték elfordítja a gravitomágneses térben lévő szabad pörgettyűk, mint gravitomágneses dipólusok forgástengelyét, azokat precessziós mozgásra készíti. A *Fizikai Szemlében* Hráskó Péter [4] által ismertett Gravity Probe B kísérletben épp a Föld gravitomágneses tere készíti precesszióra a körpályán mozgó mesterséges hold fedélzetén elhelyezett, szabad felfüggesztésű pörgettyűket. A pörgettyűk mozgásában tapasztalt precesszió mértéke pontosan megegyezik a gravitomágneses hatás által várható értékkel. Ezzel a Gravity Probe B kísérlet nem csak a globális inerciarendszerek tagadásának, hanem a gravitomágnesség létének is bizonyítéka volt.

Meg kell jegyezni, hogy a gravitomágnesség nem tartalmazza az általános relativitáselmélet lineáris közelítésének összes, a mozgó tömegek között fellépő kölcsönhatását. Két mozgó tömegpont gravitációs kölcsönhatását az általános relativitáselmélet szerinti lineáris közelítésben leíró (10) egyenletben felírt Lagrange-függvényből levezetett mozgásegyenletek olyan erőket is tartalmaznak, amelyek nem a  $v_1$  és  $v_2$  sebességek szorzatát, hanem a  $v_1$  vagy  $v_2$  sebességek második hatványát tartalmazzák. Ilyen erők következménye például a Merkúr perihélium-mozgásának relativisztikus része, amely az általános relativitáselméletből igen, de a gravitomágnességből nem következik.

Végezetül megállapíthatjuk, hogy a klasszikus fizika nem ismeri a gravitomágnességet. A speciális relativitáselmélet szerint, az inerciarendszerek ekvivalenciája miatt szükséges, hogy az  $1/r^2$ -es erők mellett létezzen egy, a mozgó objektumok között fellépő mágneses erő. Ez mind az elektromos, mind a gravitációs kölcsönhatásra igaz. Mivel a speciális relativitáselmélet – az elektromossággal ellentétben – nem kezeli pontosan a gravitációt, az általa megállapított gravitomágneses erő is pontatlan. Az általános relativitáselmélet a gravitomágnességet csak kis sebességekre és gyenge gravitációs terekre érvényes közelítésként, de kvantitatíven helyesen használja. Ez a közelítés a Naprendszer objektumaira, az ott elhelyezett laboratóriumokra jól használható.

## Irodalom

1. Vető B.: Az elektromos kölcsönhatás a speciális relativitáselmélet szemszögéből. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 127.
2. A. Karlsson: LUTEDX/(TEAT-7150)/1-7} 2006. <http://www.es.lth.se/teorel/Publications/TEAT-7000-series/TEAT-7150.pdf>
3. R. M. Wald: *General Relativity*. The University of Chicago Press, Chicago, 1984. 66–90.
4. B. Mashhoon B.: gr-qc/0011014v1 2000. (Preprint)
5. Hráskó P.: A GP-B kísérlet. *Fizikai Szemle* 57/6 (2007) 181.

Nobel-díjas tudósokról leginkább akkor esik szó Magyarországon, amikor az itt született Nobel-díjasok nevei merülnek fel valamilyen beszélgetésben. Nemzeti érzésünket erősíti amint felelgetjük őket, büszkék vagyunk rájuk.

Az Európai Unió tagjaként viszont már messzebbre tekinthetünk! Távlatból nézve magunkénak érezhetjük Európa minden tudósát, aki életével és munkásságával növelte az európai kultúra hírét, megbecsülését.

Gyakran felteszik a kérdést: Vajon mi kellett ahhoz, hogy valaki Nobel-díjas legyen?

A tudományos pályán való érvényesülésnek annyira bonyolult a feltételrendszere, hogy érdemesnek látszik külön megvizsgálni azokat az eseteket, amikor a Nobel-díjas kutató gyermekéből ugyancsak Nobel-díjas kutató lett, mégpedig ugyanazon tudományágban – a fizikában –, amelyben apja vagy anyja működött. Csupán néhány ilyen eset fordult elő, sokkal kevesebb annál, semhogy általános következtetésekre lehessen jutni belőlük.

A Nobel-díj történetében eddig négy alkalommal történt meg, hogy Nobel-díjas fizikus apának a fia is Nobel-díjas fizikus lett, s egyetlen esetben lett fizikai Nobel-díjas anyának a lánya is Nobel-díjas. A szülők mind Európában születtek, s gyermekeik is Európában végzett kutatásaiért kapták a Nobel-díjat. Példájuk felidézése remélhetőleg elég érdekes lesz ahhoz, hogy jobban megértsük az akkori világot, mai világunk előképét.

## A két Thomson: J. J. és George

Sir Joseph John Thomson

*Sir Joseph John Thomson* (Ceetham Hill, UK, 1856. december 18. – Cambridge, UK, 1940. augusztus 30.) az elektron felfedezője, az atom „mazsolás puding” modelljének kiagyalója skót családba született egy Manchesterhez közeli kis faluban. 16 éves korában vesztette el könyvkereskedő édesapját. Manchesterben kezdett mérnöki tanulmányait Cambridge-ben folytatta és fejezte be, a Trinity College ösztöndíjasaként. Az ösztöndíjat egy matematikai pályázattal sikerült elnyernie. 27 éves korában Cambridge-ben *Lord Rayleigh* (1842–1919) irányításával diplomázott matematikából, s egy év múlva már Rayleigh örökébe lépve a Cavendish Laboratórium igazgató professzora lett. (Rayleigh-t ugyanakkor a londoni tudományos akadémia, a Royal Society titkárává nevezték ki.) Még ugyanebben az évben választotta tagjául J. J. Thomson a Royal Society. Élete végéig Cambridge-ben dolgozott. 34 éves korában nősült meg, felesége *Rose Elisabeth Paget* (1860–1951), egy híres cambridge-i orvosprofesszor lánya volt. (Róla még lesz szó, az ifjú Thomsonnál.) Két gyermekük született, egy fiú és egy lány.

J. J. Thomson kiváló intuíciójú mérnök-fizikus és nagyon eredményes tudós-tanár volt.

Kutatói pályafutását a gázkiszülések tanulmányozásával kezdte. Ötletesen megtervezett kísérletsorozatban vizsgálta meg a katódsugarak eltérülését elektromos és mágneses térben. Ezzel tudta kísérletileg bizonyítani, hogy a katódsugárzás nem elektromágneses hullám, mint például az akkoriban felfedezett X (röntgen) sugárzás, hanem elektromosan töltött részecskék áramlása. Megalkotta az első nagyvákuumú katódsugárcsővet, ezzel sikerült meghatározni a katódból kilépő „részecskék” (az elektron elnevezést nem használta, nem is szerette) töltésének és tömegének arányát. 1898-ban körültekintően megtervezett és elvégzett kísérletsorozat eredményeként megmutatta, hogy ez az  $e/m$  hányados tág határok között független a részecskék sebességétől. Joggal tartjuk ezért 1898-at az elektron felfedezése évének.

1906-ban kapott Nobel-díjat „a gázokon áthaladó elektromosságra vonatkozó elméleti és kísérleti vizsgálatok terén szerzett nagy érdemeiért” (1. ábrán balra). Érdemes figyelni az indokolás óvatosságára, körülményességére, ez is jelzi, mennyire nem tört még utat magának akkor az anyag szerkezetének korpuszkuláris elmélete. Ebben az évben lett öngyilkos az igaztalan támadásokban meghasonlott *Ludwig Boltzmann* (1844–1906), és javában virágzott a *Wilhelm Ostwald* (1853–1932) által erőltetett energetikai elmélet.

A Nobel-díjat követően se csökkent J. J. Thomson kutatási tevékenységének intenzitása. Rendkívüli sikereket ért el a pozitív töltésű ionok alkotta csősugarak vizsgálatával. A neon-ionok eltérülését vizsgálva kimutatta, hogy kétféle tömegű neon-ion létezhet, ezzel kísérleti bizonyítékot szolgáltatott az izotóp-atomok létezésére. Egyidejűleg feltalálta és meg is építette az első tömegspektrográfot.

Eredményeit legtöbbször kiváló tanítványaival együtt érte el. Nagyon jó érzékkel válogatta ki és vette őket maga mellé a Cavendish Laboratóriumba, mun-

1. ábra. Sir Joseph John Thomson és Sir George Paget Thomson



katársnak. Nemsokára egész Európából jöttek Cambridge-be a jobbnál jobb fizikusok, hogy J. J. Thomson mellett dolgozhassanak. És nemcsak Európából jöttek!

Végül is hét Nobel-díjas fizikus mondhatta magát Thomson-tanítványnak. Leghíresebb közülük *Ernest Rutherford* (1871–1937), aki a tanítványok közül elsőnek, 1908-ban kapott Nobel-díjat, és aki később J. J. Thomsont követte Cambridge-ben a Cavendish Laboratórium élén. Rajta kívül *W. H. Bragg* (1862–1942) 1915-ben, *C. G. Barkla* (1877–1944) 1917-ben, *F. W. Aston* (1877–1945) 1922-ben, *C. T. R. Wilson* (1869–1959) 1927-ben, *O. Richardson* (1879–1959) 1929-ben kapták meg ezt az elegáns kitüntetést. *J. J. Thomson* tanítványai közé számíthatjuk *Max Born*t (1882–1970) is, aki azonban már jóval Thomson halála után, 1954-ben lett Nobel-díjas, vagy a nem Nobel-díjasok közül például *Robert Oppenheimer*t (1904–1967), *John Townsend*et (1868–1957) és *Paul Langevin*t (1872–1946).

A hetedik fizikus tanítvány, aki még J. J. Thomson életében kapott Nobel-díjat, saját fia volt, *George Paget Thomson*.

### Sir George Paget Thomson

A fiatalabbik Thomson (Cambridge, UK, 1892. május 3. – Cambridge, UK, 1975. szeptember 10.) nevében a Paget nem keresztnév, hanem édesanyja vezetékneve. Ez a kettős vezetéknevű azt fejezi ki, hogy mindkét család egyenlő jogú örökösének tartja magát az illető. Az anyai nagyapa, *Sir George Edward Paget* (1809–1892) jelentős királyi kitüntetések birtokosa volt, miközben cambridge-i orvosprofesszorként szerzett hírnevet magának és népes családjának. Öt fiú és öt leány gyermeke született és ért meg tisztes öregkort – a negyedik leány volt George Thomson édesanyja, J. J. Thomson felesége, aki 91 éves korában hunyt el Cambridge-ben, 1951-ben.

George Thomson Cambridge-ben született, itt járt iskolába, itt kezdte meg egyetemi tanulmányait a Trinity College diákjaként matematikából, majd folytatta fizikából. Diplomamunkájának témavezetője ugyanúgy Lord Rayleigh volt, mint édesapjának. Ezután az édesapa által irányított Cavendish Laboratóriumban kezdett izotópokkal folyó kutatásokba, azonban rövidesen kitört az első világháború. Besorozták, majd Franciaországba küldték, egyenesen a frontra. Szerencsére hamarosan a képességeit jobban kihasználni tudó Royal Air Force alkalmazásába került, ahol az aerodinamikai kutatásokba kapcsolódott be. A háború után visszatért Cambridge-be, folytatta izotópokkal végzett kutatásait. 1922-ben sikerrel pályázott az Aberdeeni Egyetem természetfilozófia tanszékére, de továbbra is szoros kapcsolatban maradt édesapjával. Ennek eredménye lett 1928-ban kiadott közös könyvük a gázok elektromos vezetéséről. Közben 1924-ben megnősült, feleségül vette *Kathleen Buchanan Smith*-t (?–1941), egy anglikán tiszteletes leányát. Négy gyermekük született, két fiú és két leány.

1924-ben vetette fel *Louis de Broglie* (1892–1987) az anyaghullámok létezésének hipotézisét, amiről George Thomson egy oxfordi fizikuskonferencián értesült 1926-ban. Az ötlet megragadta fantáziáját és Aberdeenben hozzáfogott tanítványaival az elektronok hullámtermészetének kísérleti kimutatásához. Sok sikertelen próbálkozás után akkor tudott először transzmissziós elektrondiffrakciós képet előállítani, amikor sikerült az Aberdeeni Egyetem műhelyében egy vékony, csupán 60 nm vastag aranyfóliát készíteni, ami már nem nyelte el az elektronsugarakat. Nagyjából ugyanebben az időben sikerült az elektronok hullámtermészetének kimutatása tőle függetlenül, az Egyesült Államokban dolgozó *C. J. Davisson*nak (1881–1958) is, aki kis energiájú elektronok szóródását vizsgálta nikkkel egykristályok felületén.

1937-ben George Paget Thomson és Clinton Joseph Davisson megosztott Nobel-díjat kaptak „a kristályok elektronokkal való besugárzásánál fellépő interferenciajelenségek kísérleti kimutatásáért” (*1. ábrán jobbra*). Thomsonék számára a teljességet sugallhatta, hogy az apa bizonyította be az elektronok részecske-természetét, a fiú pedig az elektronok hullámtermészetét.

Amikor a Nobel-díjat kapta, George Thomson már nem Aberdeenben, hanem Londonban tanított, az Imperial College professzora volt. A második világháború kitörésekor visszahívták a légierő katonai kutatásaihoz, és nem lehet véletlen, hogy 1940. áprilisában éppen őt, Anglia ünnepelt, de már életének utolsó hónapjait élő tudósának fiát nevezték ki az atombomba angliai előállítási lehetőségeinek vizsgálatára létrehozott titkos katonai szakértői bizottság, az úgynevezett MAUD-bizottság élére. A bizottság tagjai voltak: *Patrick Blackett* (1897–1974), *James Chadwick* (1891–1974), *John Cockcroft* (1897–1967), *Philip Moon* (1907–1994), valamennyien Angliában született és ottani egyetemeken működő, politikailag is megbízhatónak tartott fizikusok, valamint az ausztráliai *Marcus Oliphant* (1901–2000), aki akkor a Birminghami Egyetem vezető fizikaprofesszora volt. Az uránbomba megvalósításának reális lehetőségét ugyanis 1940 februárjában Birminghamban vetette fel két, akkor ott dolgozó emigráns kutató, a Berlinben született *Rudolf Peierls* (1907–1995) és a Bécsben született *Otto Frisch* (1904–1979). A MAUD-bizottság munkájában az egyik fontos eredményt az oxfordi egyetemről felkért két emigráns fizikus, a német *Franz Simon* (1893–1956) és a magyar *Kürti Miklós* (1908–1998) érte el a gázdifúziós izotópszétválasztási módszer kidolgozásával. A bizottság titkos jelentései a gondosan kiépített szovjet kémhálózat révén előbb-utóbb a Szovjetunióba is elkerültek. Ekkor itt is alakult egy megfelelő titkos bizottság, *Molotov* (1890–1986) politikai és *Igor Kurcsatov* (1903–1960) szakmai irányításával, csak éppen *Sztálin* bizalmatlansága, amely nemcsak az emberekkel, de az ismeretlen tudománnyal szemben is hihetetlenül erős volt, pénzt akkor még nem nagyon juttatott a kísérletekre.

Nemsokára megindult az Egyesült Államokban a Manhattan projekt, ebbe válogattak be néhányat a megbízhatónak tartott angol fizikusok közül. Bekerült a Los Alamosban dolgozó angol csoportba *Niels Bohr* és fizikus fia, akik a megszállt Dániából menekültek el. Viszont csak 1943-tól kezdve engedték meg Rudolf Peierlsnek, aki pedig már 1940 óta brit állampolgár volt, hogy dolgozzon a Manhattan programban. Igaz, Peierlssel együtt *Klaus Fuchs* (1911–1988) is bekerült a csapatba, aki pedig Moszkvának kémkedett...

A háború után George Thomson a szabályozott nukleáris reakciók kutatását folytatta Angliában. Atombomba helyett az atomerőművek létrehozásán fáradozott, ahogy Párizsban *Frédéric Joliot-Curie*, vagy Moszkvában a szovjet fizikusok és az elfogott német tudósok egy része. George Thomson 1952-ig maradt Londonban az Imperial College professzora, ekkor visszaköltözött Cambridge-be, ahol még tíz évig dolgozott és tanított a Corpus Christi College-ban. Tiszteletére már életében, 1964-ben elneveztek róla egy épületet a cambridge-i egyetemen.

## A két Bragg: William és Lawrence

Sir William Henry Bragg

*Sir William Henry Bragg* (Westward, UK, 1862. július 2. – London, UK, 1942. március. 10.) apja vidéki gazdálkodó volt, aki gyakran vállalt szolgálatot kereskedelmi hajókon és keveset volt otthon. Édesanyját, egy anglikán tiszteletes lányt, hétéves korában elvesztette. Ekkor a nagybácsi, akit szintén *William Bragg*nek hívtak, magához vette és iskoláztatta. Tehetséges matematikusként Cambridge-be, a Trinity College-ba nyert ösztöndíjat, ahol J. J. Thomson tanítványa lett. 1884-ben diplomázott, s a következő évben J. J. Thomson támogatásával kinevezték Ausztráliába, Adelaide-be az elméleti és alkalmazott matematika professzorának, azzal a kiegészítéssel, hogy fizikát is kell oktatnia. (Ausztrália, akárcsak Kanada, a Brit Birodalom része volt. A brit birodalmi küldetéstudat, amely kötelességének tartotta a brit kultúra világméretű terjesztését, lelkes követőkre talált a pályakezdő, fiatal tudósokban.) Az ausztráliai állást 1886-ban, 24 évesen foglalta el.

Három évvel odaérkezése után, 1889-ben megnősült. Felesége *Gwendoline Todd* (?–1929), Dél-Ausztrália főpostamesterének és állami csillagásznak leánya, tehetséges akvarellista volt. Két fiúk és egy lányuk született, az elsőszülött volt *William Lawrence*.

Adelaide-ből William Henry Bragg levelezéssel és tudományos folyóiratok járatásával tartotta a kapcsolatot Angliával, különösen Cambridge-

re figyelt oda. Minden új felfedezést igyekezett számon tartani, de már elmúlt negyven éves, amikor első publikációjával megjelent a tudományos közéletben. Addig az ausztrál egyetemi oktatás színvonalának emelése, az itteni egyetemi élet felvirágoztatása kötötte le energiáit. Még gyeplabdaklubot is alapított az ausztrál egyetemisták számára.

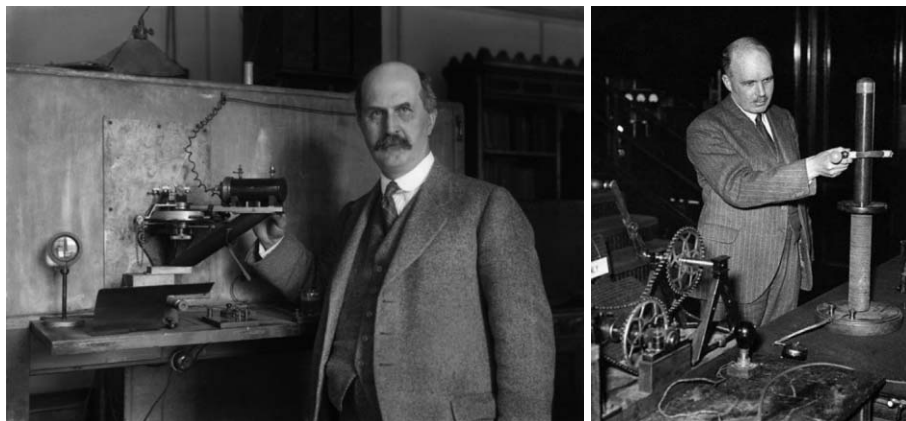
Már a felfedezés évében, 1896-ban szerzett röntgensövet, és máris diagnosztizálásra használta, amikor hatéves kisfia elesett otthon a triciklijével és eltörte a karját. A csillagászati obszervatóriumban apósával felszerelt egy Marconi adóvevőt, valamint beállított egy szeizmográfot. Amikor fiai nagyobbak lettek, megengedte nekik, hogy a kerti fészerben műhelyt rendezzenek be, és ott kísérletezzenek az egyetemi műhelyből leselejtezett tárgyakkal, műszerekkel.

Rádiumbromiddal végzett tudományos kísérleteit ismertető dolgozatai olyan sikert arattak, hogy 1907-ben a Royal Society tagjává választották. A következő évben feladta ausztráliai állását és családjával együtt visszatelepült Angliába. A Leedsi Egyetemen kapott fizikaprofesszori állást. Itt sikeresen folytatta Ausztráliában megkezdett, a röntgensugárzásra vonatkozó kísérleteit, feltalálta többek között a röntgenspektrométert. Lawrence fiával, aki csak nemrég fejezte be egyetemi tanulmányait Cambridge-ben kifejlesztették a röntgenanalízis módszerét a kristályos anyagok szerkezetvizsgálatára. 1915-ben jelent meg közös könyvük *X sugárzás és kristályszerkezet* címmel. (Angol nyelvterületen mind a mai napig X sugárzásnak hívják a *Röntgen* által 1895-ben felfedezett sugárzást.)

1915-ben javában folyt a háború és nagy emberáldozatot követelt mindkét oldalon. A Nobel-díj bizottság ekkor úgy döntött, hogy kettőjüknek ítéli oda az 1915. évi Nobel-díjat „a kristályszerkezet röntgensugármódszerrel történő analízisének felfedezéséért” (2. ábra). A díj történetében azóta is ez az egyetlen eset, hogy apa és fia egyszerre kapta meg ezt a kitüntetést.

Az első világháború alatt William Bragg a német tengeralattjárók elhárításán dolgozott a hadsereg megbízásából, majd a háború befejezése után Leedsből a londoni egyetemre ment át. 1922-ben Brüsszelben az akkor alakuló IUPAP (International Union of

2. ábra. Sir William Henry Bragg és Sir William Lawrence Bragg a laboratóriumában.





Pure and Applied Physics – Nemzetközi Elméleti és Alkalmazott Fizikai Unió) első elnökének választották – 1931-ig töltötte be ezt a tiszteletet. Idős korában a tudomány népszerűsítésében végzett hasznos munkát: ismeretterjesztő könyveket írt, tevékeny, fáradhatatlan igazgatója lett Faraday egykori intézetének, a Royal Institutionnak. Ugyanakkor megőrizte tekintélyét a tudományban is: 1935 és 1940 között a Royal Society elnöke volt.

Sikeres életének legszomorúbb pillanata az volt, amikor megtudta, hogy másik fia elesett Gallipolinál a háborúban. Ugyanaz év őszén esett el a fiú, amikor decemberben William Bragg átvehette a Nobel-díjat, most már egyetlen élő fiával, Lawrence Bragg-gal együtt. Ezt a veszteséget apa és fia soha se tudták kiheverni.

### Sir William Lawrence Bragg

William Lawrence Bragg (Adelaide, Ausztrália, 1890. március 31. – Ipswich, UK, 1971. július 1.) 18 éves koráig Ausztráliában élt. Itt született, itt járt iskolába, 14 éves korától fogva pedig az egyetemre, ahol édesapja tanított. Rendkívüli tehetségnek tartották. Apjával ellentétben eléggé visszahúzódozó gyerek volt, aki sokkal inkább szellemi, semmint fizikai képességeivel tűnt ki a többiek közül. Amíg azok gyeplabdáztak, ő a tengerparton kószált és kagylókat gyűjtött, vagy otthon, öccsével együtt kísérletezett. 18 évesen diplomázott Adelaide-ben, és minden vágya az volt, hogy Angliában, lehetőleg Cambridge-ben képezhesse tovább magát, első sorban matematikából. Ekkor költöztek el Ausztráliából.

Cambridge-i matematikai tanulmányait a Trinity College-ban kezdte meg, majd átment ugyanitt fizikára, és ebből diplomázott 1911-ben. Utána is ott tartották az egyetemen, kutatónak. Első kutatói évében írta fel a híres „Bragg-egyenletet”, dolgozta ki – apja sugalmazására és vele együttműködve – a kristályok röntgenanalízisének matematikai módszerét. Ezért kapták meg közösen a Nobel-díjat 1915-ben.

Mind a mai napig ő nyerte el legfiatalabb korban a Nobel-díjat: még csak 25 éves volt. A nőszüléssel 31 éves koráig várt, akkor vette feleségül *Alice Hopkinson*, egy orvos leányát. Négy gyermekük született, két fiú és két leány.

A háborúban azt kutatta, hogyan lehet a hang terjedését figyelembe véve bemérni az ellenséges ütegek pontos helyét. Sok fizikus foglalkozott ezzel a problémával mindkét oldalon, a magyarok közül például *Zemplén Győző* (1879–1916), *Kármán Tódor* (1881–1963), *Selényi Pál* (1884–1954).

1919-ben, amikor J. J. Thomsont Ernest Rutherford váltotta Cambridge-ben a Cavendish Laboratórium élén, a Manchesteri Egyetemen Lawrence Bragg kapta meg Ernest Rutherford tanszékét. Röntgendiffrakciós iskolát hozott létre az egyetemen, messze földről jöttek hozzá tanulni az anyagszerkezet kutatásában érdekelt tudósok. Magyar tanítványai is lettek: az egyik *Hevesy György* (1885–1966) volt, a másik *Náray-*

*Szabó István* (1899–1972), aki a szilikátszerkezeti kutatásokba kapcsolódott be 1928 és 1930 között, majd miután hazajött, meghonosította itthon is a kristálykémiai kutatásokat. (Az már Magyarország tragédiája, hogy ezt a Náray-Szabó Istvánt, aki 1938-tól a Budapesti Műegyetem fizikai-kémiai tanszékét vezette, 1947-ben hamis vádakkal bíróság elé állították, koncepciók perben elítélték, majd internálták. Sohasem térhetett vissza a Műegyetemre.)

1937-ben, Rutherford halála után, Lawrence Bragg-et kérték fel Cambridge-ben a Cavendish Laboratórium vezetésére. Itteni működésének leglátványosabb sikerét *Watson* és *Crick* 1953-as kutatásai hozták, akik feltárták a DNS kettős spirál szerkezetét. A molekuláris biofizikai kutatásokat ugyanis Bragg honosította meg a Cavendish Laboratóriumban, ő maga is a proteinek szerkezetét kutatta akkor, röntgendiffrakciós módszerrel.

1953-ban Londonba költözött és akárcsak édesapja annak idején, idősebb korában ő is átvette a Royal Institution irányítását. Sikeresen vezetett be reformokat, megerősítette az intézet kapcsolatát a középiskolákkal. Olyan ismeretterjesztő előadásokat szorgalmazott, ahol a diákok maguk mutathattak be kísérleteket, tarthattak kutatási beszámolókat saját kortársaiknak.

1966-ban ment nyugdíjba és költözött Ipswich melletti vidéki házába. Egész életében szívesen és ügyesen festegetett, ezt a képességét valószínűleg édesanyjától örökölte. Szívesen írt is, világosan és érthetően fogalmazott. A tudós számára ugyanolyan fontosnak tartotta az ismeretek átadását, mint azok megszerzését. Nemcsak a fizikában, de a pedagógiában is progresszív elveket vallott. Emlékét őrzi az Institute of Physics Bragg-érme, amelyet 1967 óta ítélnék oda évente-kétévente egy, a fizika tanításában, a fizikai tudás terjesztésében kiemelkedőt alkotó tudós-tanárnak. Az érem első nem angolszász kitüntetettje 2001-ben *Marx György* (1927–2002) volt.

Életének egyik emlékezetes napja volt, amikor megtudta, hogy kisebbik lányát, *Patience Maryt* nem más, mint kedves barátja, George Thomson fia, *David Thomson* kéri feleségül. Beleegyezett!

Így talált egymásra, így vált szimbolikusan is eggyé a két Nobel-díjas család.

### A két Siegbahn: Manne és Kai

Karl Manne Georg Siegbahn

A Braggék által kifejlesztett röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálatok széles körben elterjedtek Európában. Svédországban volt egy tudós, aki érdemben tudta továbbfejleszteni ezt a kutatási módszert. A fiatalabb Bragg kortársa volt, életpályája és egyéni tulajdonságai azonban inkább az idősebb Braggre és az idősebb Thomsonra emlékeztetnek. *Karl Manne Georg Siegbahn* (Örebro, Svédország, 1886. december 3. – Stockholm, Svédország, 1978. szeptember 26.) is saját erejéből küzdötte fel magát, és ő is alapvetően kísérleti fizikus, invenciózus mérnök-fizikus volt.



3. ábra. Karl Manne Georg Siegbahn és Kai Manne Björne Siegbahn

Édesapja állomásfőnök volt a svéd államvasutaknál, édesanyja a háztartást vezette.

Manne Siegbahn Stockholmban járt középiskolába, majd ösztöndíjasként végezte el a Lundi Egyetemet. Itt doktorált 1911-ben, a mágneses tér mérésével kapcsolatos témából. Utána az a *J. R. Rydberg* (1854–1919) professzor vette maga mellé tanársegédnek, aki az elemek gázkisülési színképvonalainak hullámhosszára vezetett be egy empirikus formulát még 1888-ban, de ezt csak Bohrnak sikerült értelmeznie, először csak hidrogénre, 1913-ban.

1914-ben Manne Siegbahn megnősült. Az ebben az évben kitört világháború a semleges Svédországot nem érintette, nem kellett félni, hogy a tudóst „kiküldik a frontra”. Felesége, *Karin Högbom* 1915-ben szülte meg *Bo* nevű, 1918-ban pedig *Kai* nevű fiúkat.

1912-től kezdve a röntgenspektroszkópiába ásta bele magát. Új légszivattyút szerkesztett, amellyel minden eddiginél jobb vákuumot lehetett előállítani. Az ezzel készített röntgensövekkel sokkal nagyobb intenzitást, jobb felbontást tudott elérni, növelni tudta méréseinek pontosságát. Az elemek karakterisztikus röntgenspektrumának új sorozatait sikerült kimérnie, amelyek kvantummechanikai magyarázatai az atomok elektronhéjainak pontosabb leírását tették lehetővé.

William Bragg a besugárzott kristályokban az atomok elrendeződését kutatta a röntgenspektroszkópiával, Manne Siegbahn pedig a sugárzást kibocsátó atomok elektronszerkezetét.

Rydberg halála után Manne Siegbahn lett a vezető fizikaprofesszor Lundban, de 1923-ban átment Uppsalába, az ottani fizikatanszékre. Innen tartott szoros kapcsolatot Európa azon fizikusaival is, akiket az IUPAP-ban ismert meg. Még ebben az évben, az ő közbenjárására vették fel Svédországot az 1922-ben megalakult és William Bragg által elnökölt IUPAP tagjai sorába.

Az 1924-es fizikai Nobel-díjat 1925-ben kapta meg „röntgenspektroszkópiai vizsgálataiért és felfedezéseiért” (3. ábra, balra).

1937-ig maradt a család Uppsalában, ekkor Manne Siegbahnt visszahívták Stockholmba, az akkor alapított Nobel Fizikai Intézet élére. Itt főleg magfizikai kutatásokat végeztek. Ciklotront építettek deutronok

gyorsítására, egyre nagyobb feszültségű (400 kV-tól 1500 kV-ig) generátorokat, béta-spektrográfot, izotópszeparátorokat, speciális célú elektronmikroszkópokat terveztek és építettek meg. A második világháború alatt, amelyből ugyancsak sikerült Svédországnak kimaradnia, népes kutatógárda működött itt.

1938-tól 1947-ig Manne Siegbahn volt az IUPAP elnöke.

1964-ben ment nyugdíjba, 78 éves korában. Utána még 14 évet élt, de már nem tudta kivárni azt a napot, amikor 1981-ben Kai fia is Nobel-díjat kapott.

### Kai Manne Björne Siegbahn

Kai Siegbahn (Lund, Svédország, 1918. április 20. – Angelholm, Svédország, 2007. július 20.) öt éves volt, amikor a család Uppsalába költözött. Itt járt gimnáziumba, és itt járt egyetemre is, bár szülei akkor már Stockholmban éltek. 1942-ben diplomázott, és Stockholmban az apja által vezetett Nobel Fizikai Intézetben kezdett el dolgozni. Itt doktorált 1944-ben, és mindjárt meg is nősült: feleségül vette *Anna-Brita Rbedint*. Három fiúk született: *Per* 1945-ben, *Hans* 1947-ben, *Nils* 1953-ban. Csak a két idősebb fiúból lett fizikus.

Továbbra is apja intézetében dolgozott, majd 1951-ben a Stockholmi Műegyetemen lett fizikaprofesszor. Mégsem maradt itt sokáig.

1954-ben feleségével és gyerekeivel együtt „hazament” Uppsalába, s annak a kísérleti fizika tanszéknek lett vezető professzora, ahol egykor *A. J. Angström* (1814–1874) működött, és amelyet édesapja vezetett 1923-tól 1937-ig. Manne Sieghbahn 14 évet töltött itt, a fia viszont 30-at, egészen a nyugdíjazásáig (3. ábra, jobbra).

Akárcsak apja, Kai Siegbahn is az atom szerkezetét kutatta, de ő nem az atomból kilépő karakterisztikus röntgensugárzást analizálta, hanem kemény röntgen-

4. ábra. Kai Manne Björne Siegbahn átveszi az 1981. évi fizikai Nobel-díjat Carl Gustaf svéd királytól.



sugárzás hatására az atomból kilökött elektronok spektrumát térképezte fel. Ezt a módszert ma röntgen fotoelektron-spektroszkópiának hívják (XPS = X-ray photoelectron spectroscopy), Kai Siegbahn pedig a kémiai analízist segítő elektron-spektroszkópiának nevezte (ESCA = electron spectroscopy for chemical analysis). A kapott intenzitáscsúcsok ugyanis nagyon érzékenyek a vizsgált gáz vagy folyadék atomjaihoz kapcsolódó idegen atomokra, ezért különösen alkalmasak a legkisebb szennyeződés kimutatására is. Ez az, amiért a módszer kiterjedten alkalmazható a legkülönbözőbb területeken, a légszennyezés analízisétől kezdve az olajfinomítóokban használatos katalizátorok vizsgálatáig.

Már elmúlt 63 éves, amikor *N. Bloembergen*nel és *A. L. Schawlow*-val megosztva neki ítelték az ESCA-eljárás kidolgozásáért az 1981. évi fizikai Nobel-díjat. Fénykép is készült ekkor róla (*4. ábra*): fehér hajú kitüntetett veszi át a díjat a fiatal *Carl Gustaf* királytól, akivel anyanyelvén tud beszélgetni... Egész Svédor-

szág boldog volt. Egy kíváncsi újságíró megkérdezte: Mennyit segített Nobel-díjas édesapja, hogy a fia is megkapja ezt a díjat? Mosolyogva válaszolt: Ha egy gyerek már a reggeliző asztalnál elkezdheti diszkutálni apjával a fizikát, az bizony nagy előny. Az újságíró tovább faggatta: Nem lephette meg nagyon a díj, hiszen Ön is tagja a Svéd Tudományos Akadémiának, ahol a Nobel-díjakról döntenek. Most ez hogyan történt? A válasz egyszerű volt és őszinte: Nem vehettem részt azokon az üléseken, ahol a felterjesztéseket tárgyalták, ebből tudtam, hogy a jelöltek között vagyok. De azért meglepődtem – nyerni mindig meglepetés.

Számos könyvet írt, számos hazai és külföldi kitüntetést kapott, sok egyetemnek lett díszdoktora, sok ország akadémiaja választotta tiszteleti tagjának, és a Nobel-díjat követő három évben 1981-től 1984-ig ő volt az IUPAP elnöke. Ebben is utolérte apját. Egyben nem tudta utolérni: apja 92 évet élt, ő csak 89-et.

Igaz, Svédországban nem volt háború ebben a században.

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# ELEKTROMOSAN FŰTÖTT RIJKE-CSŐ TERMOAKUSZTIKUS MODELLJE

A Rijke-cső egy viszonylag egyszerű termoakusztikus eszköz: mindkét végén nyitott cső, amelynek belsejébe egy hőforrást helyeznek el; a hő forrása lehet gázláng vagy elektromos fűtés. Ha a cső függőleges helyzetben van és a hőforrás a cső alsó felében található, akkor a cső erős hangot bocsáthat ki a hőforrás helyzetétől függően. A jelenséget *Petrus Leonardus Rijke* fedezte fel, ezért Rijke hanghatásnak nevezik ezt a termoakusztikus jelenséget, amely során a hő hatására hanghullám alakul ki az eszközben [1].

Korábbi cikkeinkben a gázzal fűtött Rijke-csővek termoakusztikus tulajdonságait, folyamatait mutattuk be [2–5]. A csövek viselkedését a Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola és Gimnázium gimnazista tanulóival vizsgáltuk projektfeladat keretei között. A gázfűtésű Rijke-csővekkel több mint egy évig végeztünk méréseket, számos összefüggést „felfedeztünk”, de ezek inkább csak kvalitatív jelegű megállapítások voltak. Mérési eredményeink nagyfokú bizonytalanságot mutattak, ezért úgy döntöttünk, hogy építünk egy elektromos árammal fűtött Rijke-csővet, és azzal pontosabb méréseket végzünk. (Az áram teljesítményét könnyebben szabályozhatjuk és egyszerűbb a hőteljesítmény mérése is, mint a gázláng esetén.) Ez volt

projektünk második lépcsőfoka, ami szintén egy évnél hosszabb időt vett igénybe. Ebben a cikkben az elektromosan fűtött Rijke-csővel végzett mérési sorozat jellemzőit mutatjuk be.

## A mérési elrendezés

A korábbi mérések alapján megállapítottuk, hogy a cső hangkibocsátását a cső geometriai paraméterein kívül a cső helyzete, a rács helyzete ( $x_r$ ), rácsra jutó hőteljesítmény ( $P$ ), a rács abszolút hőmérséklete ( $T_r$ ), a csövön átáramló légáram intenzitása ( $m_t$ ), a fűtés időtartama ( $t_f$ ), és a fűtött rács áteresztőképessége határozza meg. A mérésekhez egy  $L = 1200$  mm hosszúságú, alumíniumból készült Rijke-csővet használtuk, amelynek külső átmérője 78 mm, belső átmérője 72 mm. A vízszintes helyzetű, elektromos árammal fűtött Rijke-csővet az *1. ábrán* láthatjuk.

A vízszintes elhelyezkedésű cső esetében egy külön szerkezettel (porszívóval) nekünk kell légáramlást biztosítani a Rijke-csőben. A porszívó által keltett légáram intenzitást szabályozni tudtuk a porszívó teljesítményével, illetve a szívócsőbe helyezett „fojtószelep”



1. ábra. A vízszintes helyzetű, elektromosan fűtött Rijke-cső.

segítségével; így viszonylag tág határok között „szabadon” tudtuk vizsgálni a légáram-intenzitás szerepét a rendszerben. (A mérési elrendezés részletesebb ismertetését egy korábbi cikkben megadtuk, most csak a legfontosabbakat emeljük ki.) A hő forrása egy elektromosan fűtött drótháló volt, amely viszonylag sűrű szövésű, körülbelül 0,45 mm átmérőjű acéldrótokból állt, átteresztőképessége körülbelül 80%-os volt. Mivel a drótháló „szövése” egyenletes volt, ezért feltételeztük, hogy a felületén egyenletesen tudja „leadni” a hőt.

A dróthálót egy hengeres kerámiabetét tartotta a Rijke-cső belsejében a kívánt helyen. A kerámiabetét hossza 65 mm, belső átmérője 51 mm, külső átmérője 71,5 mm volt; így pontosan beleillett az alumínium Rijke-cső belsejébe. A kerámiabetétben hosszirányban 5 mm átmérőjű furatok helyezkedtek el. A furatokat arra használtuk, hogy a bennük elhelyezett csavarokkal rögzítettük a dróthálót a kerámiabetéten azért, hogy meggátoljuk a rács elmozdulását. Erre mindenképpen szükség volt, hiszen a rácsot elektromos szempontból el kellett szigetelni az alumíniumcsőtől. Ezen kívül a kerámiabetét akadályozta a drótháló és a cső fala közötti termikus kölcsönhatás is, ez szintén hasznosnak bizonyult, hiszen a kísérletekben nem a cső felmelegítése volt a célunk, hanem a csőben áramló levegőt szerettük volna a rácsnál „lokálisan” felmelegíteni. A drótháló elektromos fűtéséhez szükséges áramot két 1000 mm hosszúságú és 4,5 mm átmérőjű sárgarézből készült pálcán keresztül vezettük a rácshoz a cső nyitott „alsó” vége felől.

A drótháló elektromos fűtéséhez egy Trakis Hetra 101 SM típusú hegesztő transzformátort használtunk, ennek névleges teljesítménye 4 kW, a maximálisan elérhető áramerősség pedig 100 A. A kísérletek során mértük a rácson keresztül folyó áram erősségét és a rácson eső feszültséget. Valójában a rácson és a két rézpálcán eső feszültséget mértük, de a pálcák ellenállása elhanyagolható a rács elektromos ellenállásához képest, ezért első közelítésben úgy vettük, hogy a pálcákon nem esik feszültség. (A pontosabb számításoknál ezt is figyelembe vettük.)

A vízszintes helyzetű Rijke-csőben a levegő áramoltatására egy ETA 3404 típusú ipari porszívót használtunk, amelynek a legnagyobb szívási teljesítménye  $0,0026 \text{ m}^3/\text{s}$  (azaz kb. 3 g/s) volt normál körü-

mények esetén. A szívócső nem közvetlenül kapcsolódott a Rijke-cső „felső” végéhez. Az alumíniumcső vége egy  $450 \times 450 \times 500 \text{ mm}$  élhosszúságú, vastag falú kartondobozba nyílt. A doboz ezzel szemközi oldalában is volt egy kisebb átmérőjű nyílás, ide csatlakozott a szívócső. (A csatlakozási pontokat ragasztóval tömítettük.) A kartondobozra két okból volt szükség: egyfelől a dobozba tettük a mikrofont, így csökkentettük a külső környezet zajhatását; másfelől a kartondoboz csillapító kamraként funkcionált, ezzel elértük, hogy a porszívó légáramlást tudott kelteni a Rijke-csőben, viszont Rijke-cső és a porszívó cső termoakusztikai szempontból jó közelítéssel függetlennek tekinthető.

A rács és a cső különböző pontjai hőmérsékletének mérésére IR-380 és IR-1000L típusú infravörös hőmérőket alkalmaztunk. A kísérletek során megállapítottuk, hogy a hálóra jutó elektromos fűtőtelsítményt csak lassan szabad növelni; ezért magát a mérést mindig megelőzte egy „felfűtési procedúra”. Ez a „bemelegítési” folyamat a kísérletek során általában 1–5 percig tartott. A termoakusztikus rendszerünk stabilitását meghatározó 3 „fő” paraméter: a rács helyzete ( $x_r$ ), a csővön átáramló légáram intenzitása ( $m_i$ ), és a rácsra jutó hőteljesítmény ( $P$ ). Ezeket a jellemzőket viszonylag pontosan tudtuk mérni, illetve ki tudtuk számítani. A fő célunk tehát annak meghatározása, hogy ez a három paraméter a stabilitás-instabilitás szempontjából hogyan befolyásolja rendszerünk termoakusztikai állapotát.

## A mérés menete

A mérések menete hasonló volt a gázlánggal fűtött vízszintes helyzetű Rijke-csővel végzett kísérleteinkhez. Az első lépés a rács pozíciójának beállítása a vízszintes csőben. Négy olyan rácspozíciót jelöltünk ki, ahol alaposabb vizsgálatokat végeztünk: ezek rendre az  $x_r = L/8$ ,  $x_r = L/4$ ,  $x_r = 3L/8$  és az  $x_r = 5L/8$  rácshelyek voltak.

Minden rácspozíció esetén nullától a maximális értékig változtattuk a csőbeli légáram intenzitását. A rácspozíció és a légáram-intenzitás rögzítése után következett az elektromos fűtőtelsítmény beállítása. Röviden tehát azt mondhatjuk, hogy a fenti paraméter-hármasok függvényében vizsgáltuk, hogy rendszerünk stabil vagy instabil állapotban van-e. Mindeközben persze figyeltük a rács hőmérsékletét, és ha megszólalt a hang, akkor mértük a hang intenzitását is.

## A Rijke-cső egyszerűsített modellje

Első lépésként kidolgoztunk egy viszonylag egyszerű matematikai modellt, amely a Rijke-csőben zajló folyamatokat jellemzi; modellünk megalkotásakor felhasználunk Matveev eredményeit [6]. A modellben az alábbi egyszerűsítésekkel élünk [6] alapján:



- A csőben áramló levegő intenzitását állandó értékűnek tekintjük. A csőben a légáramot egydimenziósnak vesszük, csak lamináris áramlással számolunk.

- A csőben a rácsnál van egy hőmérsékletugrás, a cső hőmérsékletét egyébként állandó értékűnek tekintjük.

- A rács által kisugárzott hővel nem számolunk és a cső által a rácstól elvezetett hőt is elhanyagoljuk, azaz csak a rács és a környező levegő közötti hőkonvekciót vesszük figyelembe.

- Feltételezzük, hogy a csőben csak lineáris folyamatok zajlanak.

- A csőben lévő levegő szinuszos rezgéseket végez, az ettől való eltérések kicsik, ezért azokat elhanyagoljuk.

- A gravitáció hatásával nem számolunk.

- A csőben áramló levegő (átlagos) sebessége kicsi a hangsebességhez képest. (Kicsi a rendszerünk jellemző Mach-szám.)

- A csillapító kamra hatását elhanyagoljuk.

A rendszer gerjesztéséhez szükséges kritikus teljesítmény ( $P_{kr}$ ) az a minimális teljesítmény, amit ha túllépünk, akkor az adott körülmények között már gerjeszthető a termoakusztikus rendszer; a kritikus teljesítmény esetén a rendszerbe bevitt energia éppen egyensúlyban van a veszteségek miatt kiáramló energiával. *Culick* szerint a termoakusztikai rendszer Gálerkin-féle (akusztikus) állapotai jó közelítéssel függetlenek tekinthetők, azaz a köztük lévő csatolás elhanyagolható, ezért az akusztikus módokat külön-külön vizsgálhatjuk [7, 8]. A korábbi cikkben bemutatott módon megkaptuk az egyszerűsített modellben az  $n$ -ik módhoz tartozó kritikus teljesítményt [6] felhasználásával. Megállapítottuk, hogy egyszerűsített modellünk általában jóval kisebb kritikus teljesítményt ad meg, mint amit a mérések során tapasztaltunk. Az eltérés akár 30–100% is lehet a közepes légáram-intenzitás tartományban, magasabb légáram-intenzitások esetében a hiba 100–150%-os.

Ilyen nagy hiba a gyakorlati technikai alkalmazások esetén nem engedhető meg. A hiba forrása az lehet, hogy az egyszerűsített modellben nem volt elég alapos a hőátadás vizsgálata, például nem számoltunk a hőszugárzás hatásával. A mérések során nemlineáris jelenségeket is megfigyeltünk (pl. hiszterézis, vagy örvények keletkezése), ezekre értelem szerűen nem ad magyarázatot egyszerű modellünk. Ezért kidolgoztunk egy újabb modellt, amiben már figyelembe vesszük a rendszerben fellépő egyéb energiaáramlásokat is. A pontosság javítása érdekében a korábbi feltételezéseinket a következőképpen módosítottuk: a hőtranszfer folyamán meghatározzuk a rácstól az áramló levegőbe jutó hőteljesítményt, a csőfalba jutó hőteljesítményt és a környezetbe jutó hőteljesítményt, az áramvezető pálcá által leadott hőteljesítményt, illetve figyelembe vesszük, hogy a cső belsejében nem egyenletes a hőmérséklet eloszlása. A rendszerben fellépő zavarok kismértékűnek tekinthetők, ezért az egyszerű modell többi feltételezését továbbra is igaznak fogadhatjuk el.

## A hullámeqyenlet megadása

A nyomás, a sűrűség, a levegőbeli sebesség és a hőteljesítmény-sűrűség pillanatnyi értékét úgy írhatjuk fel, hogy vesszük az adott mennyiség csőbeli átlagértékét, és ehhez hozzáadunk egy időben és helykoordinátában is fluktuáló komponenst. A termoakusztikus rendszerünket jellemző hullámeqyenlet [6] alapján:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - v_b^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{v_b^2}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial x} =$$

$$= (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} + \rho_0 v_b^2 \frac{\partial \Omega}{\partial t}, \quad (1)$$

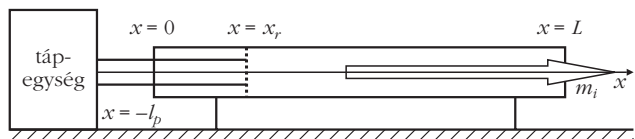
ahol  $p'$  a nyomás fluktuációja,  $v_b$  a hang sebessége,  $\rho_0$  a sűrűség átlagértéke,  $\gamma$  a gáz fajhőviszonya,  $\Omega'$  az egységnyi térfogatra vett forrásintenzitás fluktuációja, a  $q'$  mennyiség a rendszerbe jutó hőteljesítmény-sűrűség fluktuációja. A rendszer termoakusztikus instabilitásáért felelős tag arányos a hőteljesítmény-sűrűség fluktuációjának idő szerinti deriváltjával. A hullám csillapodását okozza a hővezetés, a viszkozitás az akusztikai határrétegen és a cső végeinél kisugárzott hang; ezek a csillapító tényezők az utolsó tagba vannak belefoglalva, amely arányos az egységnyi térfogati forrásintenzitás fluktuációjának időbeli deriváltjával [6].

## A rendszerben fellépő hőátadási folyamatok elemzése

A Rijke-csőben kialakuló instabilitás függ attól, hogy a felhevült rács miként adja át energiáját a környezetének, ezért részletesebben elemezzük a folyamatot. A cső belsejében a gáz áramlása 3 dimenziós folyamat, miközben örvények is keletkezhetnek, mint azt a gázzal fűtött csövekkel végzett kísérletek során láthattuk [4, 5]. A hőátadási folyamat három részre bontható: hőkonvekció, hővezetés és hőszugárzás. Ha a rendszer instabil állapotban van, akkor a csőbeli légáram intenzitása is fluktuál és a hő konvekciójában is fluktuáció mutatkozik. A rendszer precíz 3 dimenziós modellezése nagyon bonyolult lenne; ezért csak arra vállalkoztunk, hogy kifejlesszünk egy olyan egydimenziós modellt, amelyben a hőátadás minden fontos aspektusát figyelembe vesszük és ezáltal az egyszerűsített modellnél pontosabban írhatjuk le termodinamikai rendszerünk viselkedését. A következőkben e modell főbb jellemzőit mutatjuk be, a részletek ismertetése meghaladja a cikk kereteit.

A vízszintes helyzetű, elektromos árammal fűtött Rijke-cső vázlatát a 2. ábrán láthatjuk. Rendszerünk

2. ábra. A vízszintes helyzetű Rijke-cső egyszerű modellje.



modellje egy vízszintes cső, amelybe egy lokálisan kis kiterjedésű, síknak tekintett hőforrást (fűtött rácst) helyezünk az  $x_r$  pontba; a csövön keresztül  $m_i$  intenzitású levegő áramlik át.

A modell alapjául az energia megmaradásának elve szolgál, amelyre egy kvázi-stacionárius egydimenziós egyenletrendszert fogunk felírni. A hőátadás folyamán a következő komponenseket kell figyelembe vennünk [6] felhasználásával:

*Kényszerített konvekció:*

- a rác és az áramló levegő között;
- az áramvezető pálc és az áramló levegő között;
- a cső fala és az áramló levegő között.

*Természetes konvekció:*

- a cső és a körülötte lévő külső levegő között;
- az áramvezető pálc csövön kívüli része és a külső levegő között;
- a pálc csövön belüli része és az áramló levegő között.

*Hővezetés:*

- a cső falában;
- az áramvezető pálcában.

*Hősugárzás:*

- a rác és az áramló levegő, illetve a cső fala között;
- az áramvezető pálc csövön kívüli része és a környezet, illetve az áramvezető pálc csövön belüli része és az áramló levegő és a cső fala között;
- a cső és a környezete között.

A következő egyenletekben  $T$  az adott csőkeresztmetszetenél az átlagos hőmérsékletet jelenti. Az alsó indexek közül  $r$  a rácst,  $l$  a csőben áramló levegőt,  $c$  a csövet,  $p$  az áramvezető pálcát,  $k$  pedig a csövet körülfogó környezetet jelöli. A felső indexek közül  $kkon$  a kényszerített konvekciót,  $tkon$  a természetes konvekciót,  $bv$  a hővezetést,  $bs$  a hősugárzást jelöli.

Az energiamegmaradás törvényének értelmében a rácra jutó elektromos hőteljesítmény ( $P_r$ ) egyensúlyi állapotban egyenlő a rácst elhagyó teljesítménnyel. A rácstról hő távozik a rajta keresztül áramló levegőbe kényszerített konvekcióval ( $\dot{Q}_{rl}^{kkon}$ ), az áramvezető pálc is elvezet valamennyi hőt a rácstól ( $\dot{Q}_{rp}^{bv}$ ), és a rác hősugárzással is lead energiát a környezetének ( $\dot{Q}_r^{bs}$ ). A Rijke-cső fala és a rác közötti hővezetést elhanyagolhatjuk, mert a rác és a csőfal közötti kerámiatubus majdnem teljesen megakadályozza a hővezetést. A rác esetén a teljesítményekkel kifejezve felírhatjuk az energiamegmaradás elvét:

$$P_r = \dot{Q}_{rl}^{kkon} + \dot{Q}_{rp}^{bv} + \dot{Q}_r^{bs}. \quad (2)$$

A hővezetés általános egydimenziós ( $x$  irányú) alap-egyenlete [9]:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \Delta x = \frac{1}{S} \dot{Q}^{bv}, \quad (3)$$

ahol  $\lambda$  a hővezetési tényező,  $S$  a hővezetésben résztvevő felület,  $\Delta x$  az  $x$  irányú „lépésköz” (távolság),  $\dot{Q}^{bv}$  a hővezetési teljesítmény (hőáram). A cső falában a hővezetési hőáram nagysága egyenlő a cső

belsejében áramló levegőbe kényszerített konvekciós hőáram, a környező levegőbe történő természetes konvekciós hőáram és a cső hősugárzási hőárama összegével:

$$\lambda_c S_c \frac{d^2 T}{dx^2} \Delta x_c = \dot{Q}_{cl}^{kkon} + \dot{Q}_{ck}^{tkon} + \dot{Q}_{cl}^{bs} + \dot{Q}_{ck}^{bs}, \quad (4)$$

ahol  $S_c$  a csőfal keresztmetszete,  $\lambda_c$  a cső anyagának hővezetési tényezője (alumínium esetén  $\lambda_c = 221$  W/mK).

A rácra két áramvezető pálc segítségével jut az elektromos energia. Mivel a két pálc szimmetrikusan helyezkedik el, ezért a hőtranszport kiszámításánál elegendő az egyiket vizsgálni, a másikkra is hasonló kifejezés érvényes. A pálcára is felírhatjuk az energiamegmaradást kifejező egyenletet a teljesítmények segítségével:

$$\lambda_p S_p \frac{d^2 T}{dx^2} \Delta x_p = \dot{Q}_{pl}^{kon} + \dot{Q}_{pk}^{tkon} + \dot{Q}_p^{bs} - P_p, \quad (5)$$

ahol  $\lambda_p$  jelenti az áramvezető pálc anyagának hővezetési tényezőjét (sárgaréz esetén  $\lambda_p = 117$  W/mK),  $S_p$  a pálc keresztmetszete,  $P_p$  pedig az egyik áramvezető pálcára jutó elektromos hőteljesítmény. (Itt már figyelembe vettük, hogy magának az áramvezető pálcának is van ohmos ellenállása. Az egyszerűség kedvéért feltételezhetjük, hogy az elektromos ellenállás miatti hőteljesítmény egyenletesen oszlik el az egész áramvezető pálcán.) A pálc által hősugárzás formájában kisugárzott energia két tagból áll, egyfelől a pálc csövön kívüli része a környezetbe, másfelől a pálc csövön belüli része főként az áramló levegőbe, illetve a Rijke-cső falába sugároz ki hőt.

A Rijke-csőben áramló levegő által konvekcióval szállított hőáram egyenlő a pálc, a cső fala és a rác közötti kényszerített konvekciós hőárammal. Az energiamegmaradás elvének kifejezése [6] felhasználásával:

$$m_i c_p \frac{dT_l}{dx} \Delta x_l = \dot{Q}_{cl}^{kkon} + \dot{Q}_{pl}^{kon} + \dot{Q}_{rl}^{kkon} \delta(x - x_r), \quad (6)$$

ahol  $m_i$  a légáram intenzitása,  $c_p$  a levegő izobár fajhője ( $T = 300$  K hőmérsékleten  $c_p = 1004$  J/kgK). A  $\delta$  függvényvel való szorzás jelentése, hogy a rác a levegőnek lokálisan „szinte egy pontban” (a rácspozícióban) adja át a hőt.

A csőben áramló levegőben a hővezetés elhanyagolható a hőkonvekcióhoz képest. Feltételezhetjük, hogy ha elég hosszú ideig várunk és kialakul az egyensúlyi állapot, akkor a cső végeinek hőmérséklete állandó, és sem a cső bal végén ( $x = 0$ ), sem a cső jobb végén ( $x = L$ ) sincs már hőátadás. Az egyszerűség kedvéért feltételezhetjük, hogy a csőbe beáramló levegő hőmérséklete közelítőleg megegyezik a csövet körülvevő levegő (környezet) hőmérsékletével.

A cső belsejében a hőmérséklet a rác közelében jóval magasabb, mint a cső többi helyén. A cső na-

gyobbik része viszonylag alacsony hőmérsékletű a rácshoz képest. A cső falában a hővezetés miatt változik a hőmérséklet, de ezt most egy kis időre elhanyagoljuk. A „fekete test” (black body) sugárzás útján kibocsátott hőteljesítménye a Stefan–Boltzmann-törvényből számítható ki:

$$\dot{Q}^{bs} = S \sigma T^4, \quad (7)$$

ahol  $\sigma$  a Stefan–Boltzmann-állandó ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ). A „szürke test” sugárzás útján kibocsátott hőteljesítménye a „fekete test” hőteljesítményének  $\epsilon$ -szorosa:

$$\dot{Q}^{bs} = \epsilon S \sigma T^4, \quad (8)$$

ahol  $\epsilon$  az emissziós együtthatót jelenti. A rács esetén meg kell különböztetnünk a rács középső részét, ahol a levegő „szabadon” áramolhat rajta keresztül, illetve a drótháló szélső peremgyűrűjét, ahol a levegő áramlása akadályba ütközik, hiszen a rács itt van a kerámiatubushoz rögzítve. Mivel a rács nem fedi le a cső teljes belső keresztmetszetét, ezért az effektív hőteljesítmény kiszámításához azt feltételeztük, hogy a rács középső „szabad” felülete ( $S'_r$ ) az áramló levegőbe sugározza ki az energiáját, a rács külső pereme pedig a csőfalba sugározza ki a hőt. A rácstartó kerámiatubus szerepét az egyszerűség kedvéért elhanyagoltuk. A rács által kisugárzott teljesítmény:

$$\dot{Q}_r^{bs} = \epsilon_r \sigma \left[ S'_r (T_r^4 - T_l^4) + (S_r - S'_r) (T_r^4 - T_c^4) \right], \quad (9)$$

ahol  $\epsilon_r$  a rács emissziós együtthatója ( $\epsilon_r = 0,85$ ). A cső fala által a környezetbe kisugárzott hőteljesítményt a következő kifejezéssel becsülhetjük [6]:

$$\dot{Q}_c^{bs} = \epsilon_c S'_c \sigma (T_c^4 - T_k^4), \quad (10)$$

ahol  $\epsilon_c$  a cső anyagának emissziós együtthatója ( $\epsilon_c = 0,89$ ),  $S'_c$  a cső felülete.

Az áramvezető pálcá hősugárzási teljesítményének kiszámításához a következő modellt használtuk: a pálcá  $l_p$  hosszúságú része „lóg ki” a Rijke-csőből, a pálcá teljes hossza  $L_p$ . Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a pálcá bal szélének hőmérséklete megegyezik a környezet hőmérsékletével ( $T_k$ ), a pálcá jobb vége viszont a rácshoz csatlakozik, ezért a hőmérséklet itt a rács hőmérséklete ( $T_r$ ). Azt feltételeztük, hogy a pálcá bal szélétől a jobb széléig haladva a hőmérséklet egyenletesen növekszik. Ennek alapján a pálcá hősugárzási teljesítményét két részre bonthatjuk: egyfelől a Rijke-csővön kívüli pálcaszakasz a környező levegőbe sugároz ki energiát, másrésztől a csővön belüli pálcaszakasz a csőben áramló levegőbe és azon keresztül a csőfalba sugároz ki energiát. Az egyszerűség kedvéért a csőfal hőmérsékletét ( $T_c$ ) állandónak tekintettük, ez a  $T_c$  érték a csőfal átlaghőmérsékletét jelenti; és úgy vettük, hogy a pálcá csőben lévő része körül az áramló levegő átlaghőmérsékletének ( $T_l$ ) és a csőfal átlaghőmérsékletének átlaga a

hőmérséklet. Ezek alapján kiszámítottuk a pálcá által kisugárzott  $\dot{Q}_p^{bs}$  hőteljesítményt:

$$\epsilon_p \sigma \pi D_p \left[ \left( T_r^4 + T_k^4 + T_r^3 T_k + T_r T_k^3 + T_r^2 T_k^2 \right) \frac{L_p}{5} + \left( \frac{T_c + T_l}{2} \right)^4 (L_p - L_p) - T_k^4 L_p \right], \quad (11)$$

ahol  $\epsilon_p$  a pálcá emissziós együtthatója ( $\epsilon_p = 0,86$ ),  $D_p$  az áramvezető pálcá átmérője. Mivel két szimmetrikus elhelyezésű áramvezető pálcá van, ezért a teljes sugárzási teljesítményük ennek a duplája.

## A számítási modell

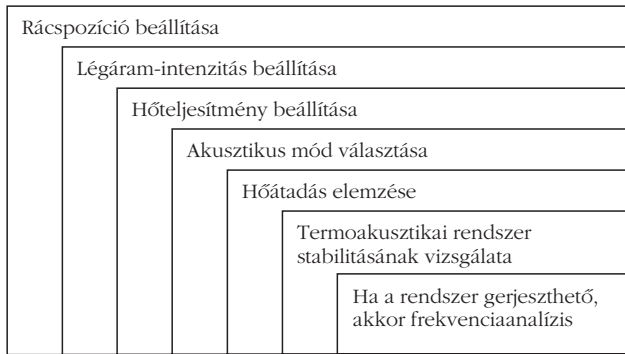
Az előbbieken meghatároztuk a hőátadás különböző komponensei közötti kapcsolatokat. A kezdő- és peremfeltételek alkalmazásával az egyenleteket numerikusan megoldva megkapjuk az áramló levegő, a csőfal és az áramvezető pálcák hőmérsékletét a rács helyzetének függvényében. A cső hossza ( $L$ ) mentén  $N$  darab kis  $\Delta x$  tartományra bontjuk a rendszerünket. Az áramlási hőmérséklet térbeli deriváltját az  $x_i$  koordinátájú pontban úgy közelíthetjük:

$$\frac{dT(x_i)}{dx} \approx \frac{T(x_i) - T(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} = \frac{T(x_i) - t(x_{i-1})}{\Delta x}, \quad (12)$$

ahol  $T(x_i)$  jelenti az  $x_i$  koordinátájú pont abszolút hőmérsékletét, és  $\Delta x = x_i - x_{i-1} = L/N$ , mert végig egyenletes felosztást használunk. A rendszer pontjai hőmérsékletének másodrendű deriváltjait a másodrendű differenciálokból kapjuk:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T(x_i)}{dx^2} &\approx \frac{\frac{T(x_{i-1}) - T(x_i)}{\Delta x} - \frac{T(x_i) - T(x_{i-1})}{\Delta x}}{\Delta x} = \\ &= \frac{T(x_{i-1}) + T(x_{i-1}) - 2 T(x_i)}{(\Delta x)^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

A hőtranszfert leíró egyenletek jobb oldala nem mindig lineáris, mivel a sugárzástól és a hőátadási koefficiens-től is függ, ami viszont függ a hőmérséklettől [6]. A hőmérsékleteket tartalmazó egyenletrendszerek megoldásához iteratív eljárást használhatunk. Minden egyes lépés során a helyi jellemzők határozzák meg a helyi hőmérsékletet. Abból indulunk ki, hogy az adott  $x_i$  koordinátájú pontban megadjuk a hőmérséklet kezdőértékét (ez általában szobahőmérsékletet jelent). Ezután a ráccsal közölt hő hatására az egyenletekben szereplő hőmérsékletek kicsit növekedni kezdenek. Az előbbi hőmérsékletekkel megadott egyenletrendszert megoldhatjuk valamilyen hagyományos módszerrel, amiből újabb hőmérsékleteket kapunk, majd újra megoldjuk az egyenletrendszert. Ezt az eljárást addig ismétljük, amíg a hőmérséklet-függvény már nem változik to-



3. ábra. A rendszer stabilitásának ellenőrzése.

vább, tehát addig, amíg az eredmény nem konvergál egy adott értékhez; azaz minden  $i$ -re ( $0 \leq i \leq N$ ) létezik egy olyan  $j'$  pozitív egész szám, amelyre igaz, hogy minden tőle nagyobb pozitív egész  $j$  szám esetén (azaz  $j > j'$ ):

$$\left| T(x_i)^{(j)} - T(x_i)^{(j')} \right| \leq \epsilon^*, \quad (14)$$

ahol a  $T(x_i)^{(j)}$  azt jelöli, hogy az  $x_i$  koordinátájú pontban a  $j$ -ik iterációs lépésben mekkora a hőmérséklet,  $\epsilon^*$  pedig tetszőlegesen kicsi pozitív szám, amelynek értékét mi határozhatjuk meg. Minél kisebb  $\epsilon^*$ , annál pontosabban kapjuk meg a hőmérsékletet az adott koordinátájú pontban. Ha a (14) egyenlőség teljesül, akkor a  $T(x_i)^{(j')}$  hőmérsékletet tekintjük az  $x_i$  koordinátájú pont „egyensúlyi” hőmérsékletének.

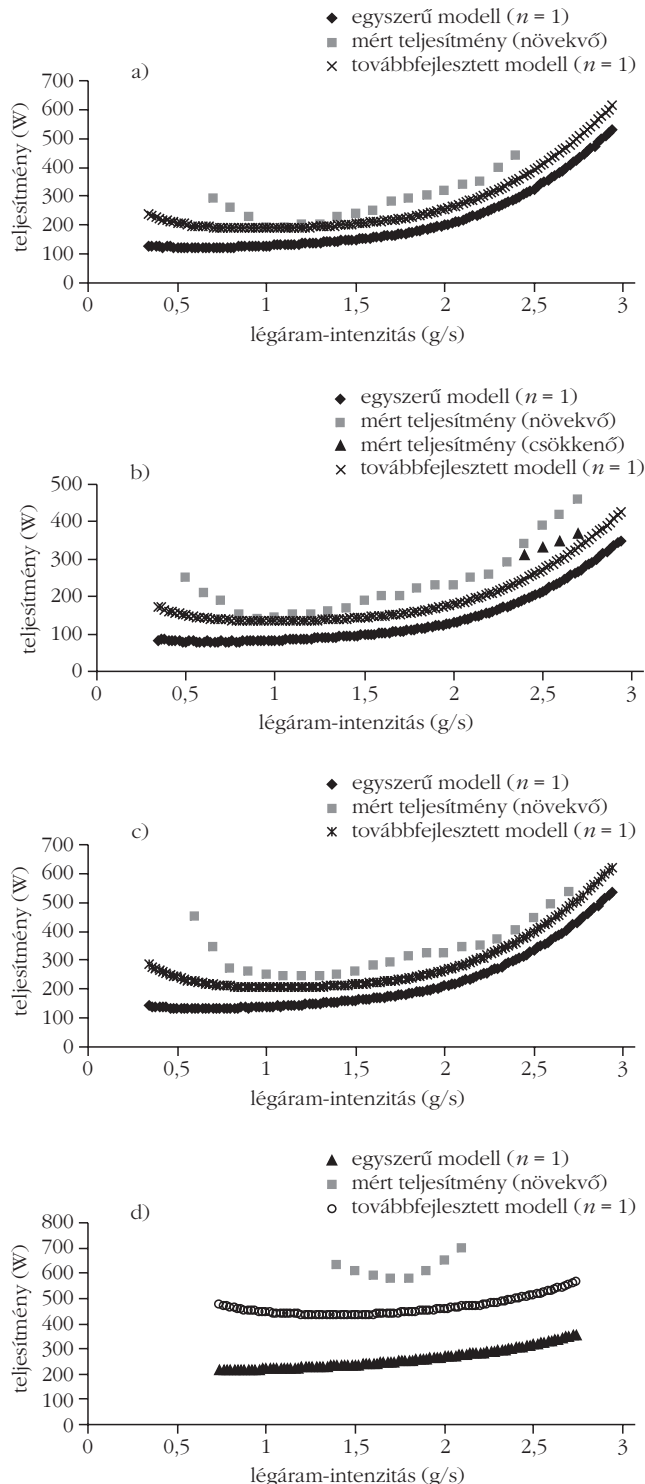
Az iteratív módszer alkalmazásának vannak korlátai. Ha a rács hőmérséklete túlzottan magas, ami akkor fordulhat elő, ha nagy a rácsot fűtő hőteljesítmény, miközben kicsi a rácson átáramló levegő intenzitása, akkor az iterációs módszer nem konvergál egy adott megoldáshoz, mivel a rendszer „nagyon nemlineáris” viselkedésű. (A sugárzással kibocsátott energia a hőmérséklet negyedik hatványával arányos.)

## A rendszer stabilitásának ellenőrzése

A rendszer stabil állapotát a hullámegyenletről kapjuk meg az egyes akusztikus módok stabilitásán keresztül. Ha minden akusztikus mód stabil, akkor maga a termodinamikai rendszerünk is stabil, de ha akár egyetlen mód is instabil, akkor rendszerünk is instabil állapotban van [6]. Az instabilitás szempontjából elég csak az alacsony módokat ellenőrizni, mert a magasabb módok esetén a csillapítás a frekvenciával gyorsan nő. Elsőként kiválasztjuk a bennünket érdeklő rácspozíciót, majd a légáram-intenzitást. Ezután meghatározzuk azt a kritikus hőteljesítményt, ami már elegendő ahhoz, hogy rendszerünk instabil állapotba kerüljön. Ez úgy történik, hogy a leírtaknak megfelelően iteratív eljárással meghatározzuk a cső belsejében a hőmérséklet térbeli eloszlását és a rácstről a rajta átáramló levegőbe konvekcióval átadott hőteljesítményt, illetve a hősugárzás és a hővezetés hatását is figyelembe vesszük. Rendszerünk stabilitását a legalacsonyabb módtól kezdve teszteljük, ha

találunk instabil módot, akkor rendszerünk maga is instabil, ellenben ha minden vizsgált mód stabil, akkor az adott paraméterek ( $x_r$ ,  $m_p$ ,  $P$ ) mellett maga a termodinamikai rendszer is stabil állapotban van. Ha a rendszer stabilnak mutatkozott, akkor nagyobb fűtőteljesítménnyel folytatjuk annak tesztelését. Ha az adott hőteljesítmény esetén rendszerünk instabil,

4. ábra. Az egyszerű és a továbbfejlesztett modell alapján számított kritikus teljesítmények összehasonlítása a kísérleti adatokkal a)  $x_r = L/8$ ; b)  $x_r = L/4$ ; c)  $x_r = 3L/8$ ; d)  $x_r = 5L/8$ .



akkor csökkentjük a hőteljesítményt és megvizsgáljuk, hogy vajon kisebb teljesítmény esetén stabil állapotba kerül-e rendszerünk. Így megkapjuk, hogy mi az a legkisebb teljesítmény, ahol a rendszer instabil állapotba kerül, illetve mi az a legnagyobb teljesítmény, ahol a rendszer még stabil állapotban van. Ezután a légáram-intenzitást megváltoztatjuk és előlről kezdjük az egész tesztelési eljárást, majd a rácspozíciót is változtatjuk és így ismétljük meg az eljárást; a végén megkapjuk a rendszer stabil és instabil állapotait elválasztó határgörbét.

Az algoritmus implementálása C++ nyelven történt. A stabilitási határértékek kiszámítására szolgáló algoritmus vázlata a 3. ábrán látható. Ha termoakusztikus rendszerünk a modell alapján gerjeszthetőnek mutatkozik, akkor a pontosabb számítások érdekében még frekvenciaanalízist is végzünk. Ennek a leírására egy későbbi cikkben szeretnénk visszatérni.

A stabilitási határértékeket 4 különböző rácspozíció esetén teszteltük az eljárás segítségével. A numerikus eredményeket összehasonlítottuk a kísérleti eredményekkel és az egyszerűsített modell értékeivel is (4. ábra).

Megállapíthatjuk, hogy a továbbfejlesztett modellekből elméletileg kapott adatok jóval pontosabbak. Az egyszerű modellünk alapján számolt stabilitásigörbe-értékek gyakran csak feleakkorák voltak, mint a kísérletileg kapott görbe értékei. A továbbfejlesztett modell alapján sokkal jobb egyezést kaptunk; közepes hőteljesítmény és légáram-intenzitás mellett a kísérletekből kapott és a modell alapján számított görbe között jóval kisebbek az eltérések, mint az egyszerű modell esetén, ezért ez a továbbfejlesztett modell inkább alkalmas a valós fizikai rendszer leírására. Túlzottan magas, illetve túlzottan alacsony hőteljesítmény és légáram-intenzitás esetén mindkét modell torzít, hiszen itt már olyan fizikai effektusok is felléphetnek (pl. örvényképződés), amellyel egyik modellben sem számoltunk.

## Összegzés

Ebben a cikkben egy továbbfejlesztett termoakusztikus modellt mutattunk be, amely alkalmas arra, hogy segítségével a Rijke-csőben lezajló folyamatok esetén a stabilitást az instabilitástól elválasztó határgörbét pontosabban meghatározzuk. A modell alapján kiszámított stabilitási görbéket a kísérletekből kapott stabilitási görbékkel összehasonlítva azt mondhatjuk, hogy a rendszer paramétereinek középső tartományában a modell elfogadható pontossággal írja le a valós termoakusztikus rendszert a stabilitás szempontjából; alacsony és magas légáram-intenzitások és hőteljesítmények esetén viszont a modellünk már kevésbé pontos.

## Köszönetnyilvánítás

Az írás a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Karán Fizika PhD-program (A közép- és a felsőfokú fizika oktatásának fejlesztésére irányuló kutatások) keretében készült. Külön köszönetem szeretném kifejezni témavezetőnek, Papp Katalinnak, aki hasznos információkkal és adatokkal segített a cikk megírásában.

## Irodalom

1. P. L. Rijke: Notiz über eine neue Art, die Luft in einer an beiden enden offenen Röhre in Schwingungen zu versetzen. *Annalen der Physik* 107 (1859) 339–343.
2. Beke T.: Termoakusztikus projekt feladat Rijke-cső vizsgálatára. *Fizikai Szemle* 59/7–8 (2009) 253–257.
3. Beke T.: Termoakusztikus jelenségek vizsgálata iskolai projekt feladatban. *A fizika tanítása* 17/4 (2009) 7–14.
4. T. Beke: Observation of thermoacoustic phenomena in school project. *Physics Education* 44/5 (2009) 536–548.
5. T. Beke: Thermoacoustic school project. *Acta Didactica Napocensia* 2/2 (2009) 9–24.
6. K. I. Matveev: *Thermoacoustic Instabilities in the Rijke Tube: Experiments and Modeling*. PhD thesis. (2003) California Institute of Technology, Pasadena, CA.
7. F. E. C. Culick: Nonlinear behavior of acoustic waves in combustion chambers, Parts I and II. *Acta Astronautica* 3 (1976) 714–757.
8. F. E. C. Culick: A note on ordering perturbations and insignificance of linear coupling in combustion instabilities. *Combustion Science and Technology* 126 (1997) 359–379.
9. Budó Á.: *Kísérleti fizika I.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.

# A XX. ÖVEGES JÓZSEF FIZIKAVERSENY ORSZÁGOS DÖNTŐJE

Juhász Nándor, Szeged, Rókusi Általános Iskola  
Ősz György, Ács, Jókai Mór Általános Iskola  
Vida József, Eger, Eszterházy Károly Főiskola

A XX. Öveges József Fizikaverseny kiírója és rendezője az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Általános Iskolai Oktatási Szakcsoportja. A verseny fővédnökei Göncz Árpádné (akinek nagybátyja volt Öveges József) és Giovan Battista Campagnola az Olasz Köztársaság magyarországi nagykövete (a fizikatörténeti modul a 400. évforduló kapcsán Galileo Galilei munkásságáról szól).

Győr nyolcadik éve adott otthont az Öveges József Fizikaverseny döntőjének. Jelentős szerepet vállalt a megrendezésben társrendezőként Győr-Moson-Sopron Megye Közgyűlése, Pedagógiai Intézete, Győr Megyei Jogú Város Polgármesteri Hivatala és a Kazinczy Ferenc Gimnázium.

A háromfordulós versenybe 1113 tanuló nevezett, a második fordulóra 580-an jutottak tovább. A dön-





A megnyitónappély elnöksége

többe bekerült 74 hazai versenyző mellett meghívást kaptak a *határainkon túl fizikát magyar nyelven tanuló diákok legjobbjai* is. Erdélyből (Romániából) 4, Csallóközből (Szlovákiából) 3, Vajdaságból (Szerbiából) 2 és Kárpátaljáról (Ukrajnából) 1 versenyző érkezett.

Az országos döntő a *diákok számára* ebben az évben is *tértésmentes volt*.

## A verseny krónikája

A versenyzők 2010. május 28-án (pénteken) érkeztek. A regisztráció színhelyén tablón láthatták az elmúlt 20 év legérdekesebb versennyel kapcsolatos dokumentumait és az Öveges József halálának 30. évforduló-jára készített, 10 tablóból álló poszter-kiállítást.

Az ünnepélyes megnyitóra a győri városháza impozáns dísztermében került sor. A díszelnökségben foglalt helyet: *Kádár György*, az ELFT főtitkára, *Turbók Arnold Bertalan*, a Győr-Moson-Sopron Megyei Pedagógiai Intézet igazgatója, *Kiss Gyula*, az ELFT Általános Iskolai Oktatási Szakcsoportjának elnöke, *Poócza József*, a győri Kazinczy Ferenc Gimnázium igazgatóhelyettese, *Hadházy Tibor*, a Nyíregyházi Főiskola főiskolai tanára, a zsűri elnöke és *Vida József*, az egri Eszterházy Károly Főiskola főiskolai tanára, a versenybizottság elnöke.

A megnyitónappély programját *Ősz György*, a versenybizottság titkára vezette, aki köszöntötte az elnökség tagjait, a határon túlról érkezetteket, a versenyzőket és felkészítő tanáraikat. Külön is gratulált *Erdősi Katalin* tanárnőnek (Budapest, Veres Péter Gimnázium) és *Tófalusi Péter* tanár úrnak (Debrecen, Református Kollégium), akik négy-négy tanítványukat juttatták el az idei döntőre.

Kiss Gyula elnök köszöntötte a résztvevőket, majd *Fülöp Viktorné* megyei szaktanácsadó, helyi főszervező felolvasta Göncz Árpádné diákokhoz intézett levelét. Őt követte Kádár György, aki beszédében hangsúlyozta, hogy az országnak igen nagy szüksége van a tetre kész, tehetséges fiatalokra. Reményét fejezte ki, hogy a mostani versenyre való felkészülési munkát

folymatni fogják a középiskolában is, és négy év múlva az egyetemek fizika szakára, vagy a műszaki egyetemre jelentkezők között is találkozunk majd a nevükkel. Turbók Arnold Bertalan nyitotta meg hivatalosan is a versenyt, s a kerek évforduló kapcsán rávilágított az egyetemes és magyar történelem Galilei korabeli eseményeire is.

A szellemi erőfeszítést igénylő versenyzés kísérő eseményeként *több érdekes és hangulatos programot* szerveztek a rendezők az ország minden részéből érkező fiatalok és felkészítők számára. A programok között szerepelt a megnyitó utáni városnézés, sétát tettek a történelmi belvárosban, megtekintették a Káptalan domb épületegyüttesét és a bazilikát, a Czuczor Gergely Bencés Gimnáziumban a *Jedlik-kiállítást*. A Széchenyi téren, Czuczor Gergely és Jedlik Ányos kettős szobránál *Weisz Vivien* és *Tana Boglárka* a Győrszabadhegyi Oktatási Központ tanulói ismertették Jedlik Ányos győri munkásságát és a versenyzők koszorút helyeztek el a szobor talapzatára. Este a gyönyörűen felújított zsinagógában *Jenei Zsigmond* ütős hangversenyén és tárlatlátogatáson vettek részt *Grászli Bernadett*, a győri Művészeti Múzeum igazgatója vezetésével.

Május 29-én (szombaton) 8 órakor kezdődött a verseny. A döntő feladatait a feladatkitűző bizottság *Vida József* elnök vezetésével *Csákány Antalné* (Budapest), *Gyimesi Éva* (Budapest), *Janóczki József* (Debrecen), *Ősz György* (Ács) és *Pál Zoltán* (Gödre) készítette.

A délelőtt folyamán a gondolkodtató (teszt jellegű) és a számítást igénylő feladatok megoldására került sor. Amíg a versenyzők a feladatok megoldásán dolgoztak, addig Kiss Gyula és Ősz György a felkészítő tanárokkal beszélgetett a verseny jövőjéről, a következő évek versenyeinek terveiről, lebonyolításáról. A megbeszélésen részt vett *Füstöss László* a BME Természettudományi karának docense, a *Fizikai Szemle* szerkesztője is.

Ebéd után folytatódott a verseny a fizikatörténeti, a kísérleti és a kísérletelemző feladatokkal. A verseny befejezése utáni kötetlen program alatt volt lehetőség megtekinteni a feladatok javítókulcs szerinti megoldásait, majd a *Kételkedem, tebát vagyok* című, áltudományt leleplező filmet.

A vacsorát követően *Molnár Miklós* ny. egyetemi docens *Látványos fizikai kísérletek Öveges professzor nyomdokain* című kísérleti bemutatóján a versenyzők és kísérők is elcsodálkozhattak az ötletes játékok, érdekes jelenségek fizikáján.

Az eseménydús nap végére a zsűri is befejezte munkáját. Számítógépes adatrögzítéssel, feldolgozással elkészült a ranglista a másnapi ünnepélyes eredményhirdetésre és díjkiosztásra.

Május 30. (vasárnap). A díszelnökségben foglalt helyet *Németh Judit* akadémikus, az ELFT tiszteletbeli elnöke; *Göncz Kinga* EP képviselő, az Öveges-család képviselőjeként, Turbók Arnold Bertalan, a Győr-Moson-Sopron Megyei Pedagógiai Intézet igazgatója, *Schmidt Péter*, Győr Megyei Jogú Város képviselőtél-

ben, *Németh Tibor*, a Győri Kazinczy Ferenc Gimnázium igazgatója, Hadházy Tibor, a zsűri elnöke és Kiss Gyula, a szakcsoport elnöke.

Bevezetőként Ősz György méltatta a Galilei évfordulót. *Horváthné Fazekas Erika* tanárnő felolvasta Giovan Battista Campagnola, az Olasz Köztársaság magyarországi nagykövetének köszöntő levelét és *Salvatore Ottore*, a Budapesti Olasz Kulturális Intézet igazgatójának üdvözlő sorait.

Ezt követően a Kazinczy Ferenc Gimnázium tanulói részletet mutattak be Németh László: *Galilei* című drámájából (Galilei és Torricelli párbeszédét). Németh László író lánya, Németh Judit professzorasszony meghatottan köszönte meg az előadást, majd örömmel adta át – édesapjára emlékezve – az általa dedikált Németh László könyveket a szereplőknek.

A verseny értékelésében Hadházy Tibor részletesen szólt a javítás tapasztalatairól, kiemelve a pozitívumokat és a típushibákat. Kiss Gyula a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem különdíjával nyitotta a díjátadást, bejelentette, hogy az egyetem a döntő versenyzőit szeptemberben egy napra vendégül látja az egyetem laboratóriumaiban. A legjobb eredményt elérők jutalmait a zsűri elnöke, Hadházy Tibor adta át.

Göncz Kinga az Öveges-család nevében üdvözölte a versenyzőket, a felkészítő tanárokat, hozzátartozókat és a verseny rendezőit. Göncz Árpádné Zsuzsa asszony, a verseny fővédnöke üdvözlő szavait is tolmácsolta. Örömet fejezte ki, hogy nemcsak városi iskolákból, hanem távoli kis községekből is vannak résztvevői a versenynek. Megható pillanat volt, amikor bejelentette, hogy a legkisebb településről, Miskéről (Bács-Kiskun megye) jött *Papp Lilla* versenyzőt és felkészítő tanárát *László Gyulánét* látogatásra hívja meg Brüsszelbe, az Európai Parlamentbe.

A verseny abszolút első helyezettjének, *Majoros Péter* pécsi tanulónak és felkészítő tanárának *Sebestyén Zoltánnak* járó Öveges-plakettet Németh Judit akadémikus adta át.

A szponzorok által felajánlott különdíjak átadása után a záróbeszédekkel ért véget az ünnepélyes eredményhirdetés.

Németh László drámája előadásának egy pillanata



A XX. Öveges József Fizikaverseny lebonyolításánál a fentebb említettekén kívül az alábbi kollégák működtek közre: *Antoni Istvánné, Czinke Sándor, Csatóné Zsámbéky Ildikó, Gesztesi Péter, Gesztesi Péterné, Horváthné Fazekas Erika, Jubász Nándor, Jubász Nándorné, Kleizerné Kocsis Mária, Krakó László, Kukorelliné Szabó Mónika, Lévainé Kovács Róza, Medgyes Sándorné, Nagy Zsigmondné, Nikhazy Lászlóné, Pápai Gyuláné, Poócza József, Slezák Zsolt, Szabó Miklós, Szénási Istvánné, Tóth Zsuzsanna, Vidáné Papp Csilla, Wernerné Pöbeim Judit, Wöller Lászlóné.*

A versenyt ebben az évben sem lehetett volna megszervezni az iskolákban lelkesen dolgozó, nagy hivatástudattal rendelkező és elkötelezett *fizikatanárok*, az intézmények érdekeit jól képviselő, perspektíváit jól látó, a tehetséges tanulók fejlődését szem előtt tartó *igazgatók* és a *megyei bázisiskolák* hathatós közreműködése nélkül. Köszönjük áldozatos munkájukat, a tehetséges tanulók versenyre való felkészítését és támogatását, hiszen a ma fizikából versenyzők lesznek a jövő kutatói, fejlesztőmérnökei és felelős döntéseket hozó állampolgárai, akiknek józan, megfontolt gondolkodásán, világszemléletén, a szebb jövő iránti elkötelezettségén és tevékenységén múlik a nemzet jövője, gazdaságának fejlődése. Életpályájukat lehet, hogy éppen a versenyekre való felkészülés által is formálódó egyéniségük, szorgalmuk, sikerélményük, eltökéltségük és a tudomány iránti tisztelet határozza meg.

## Kitűzött feladatok

### Tesztek

1. Nagy magasságból elejtünk egy tömör vasgolyót és egy ugyanakkora tömegű tömör alumíniumgolyót. Melyiknek és miért lesz nagyobb a mozgási energiája a földet érés pillanatában?

a) Az alumínium golyónak, mert annak nagyobb a mérete;

b) A vasgolyónak, mert az nagyobb végsebességet ér el;

c) A vasgolyónak, mert az nagyobb gyorsulással mozgott;

d) Az alumínium golyónak, mert az nagyobb sebességgel csapódott a talajba.

2. A Föld tömege  $5,974 \cdot 10^{24}$  kg. Mekkora a súlya?

a) A Föld súlya  $5,974 \cdot 10^{25}$  N;

b) Ez nem mondható meg egyértelműen, attól függ, honnan nézzük;

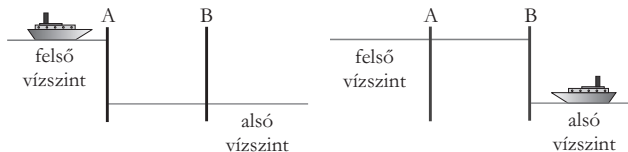
c) A Földet a Nap  $3,54 \cdot 10^{22}$  N erővel vonzza, ezért a súlya  $3,54 \cdot 10^{22}$  N;

d) A Föld nincsen se alátámasztva, se felfüggesztve. A Föld szabadon esik a Nap felé, tehát a Föld súlytalan.

3. Az ejtőernyős kinyitott ernyővel, állandó sebességgel közeledik a föld felé. A rá ható erők viszonyára a következő válaszok közül válaszd ki a helyeset!

- a) Ilyen eset nem valósulhat meg, hiszen az ejtőernyős esik a föld felé;
- b) A felhajtóerő, a közegellenállási erő és a gravitációs erő eredője zérus;
- c) A gravitációs erő nagyobb, mint a közegellenállási erő és a felhajtóerő együttvéve, hiszen az ejtőernyős a föld felé közeledik;
- d) A gravitációs erő kisebb, mint a közegellenállási erő.

4. Az ábrán egy hajóátemelő zsilipen kell átvezetned a hajót a folyó magasabb vízszintjéről az alacsonyabbra, illetve az alacsonyabbról a magasabbra a kapuk (A és B) nyitásával, illetve zárásával. Eközben a hajó a



kapukon áthalad. Jelenleg mindkét kapu mindkét ábrán zárva van.

Válaszd ki a kapuk megfelelő sorrendiségét az alábbi lehetőségek közül!

- a) Magasabbról alacsonyabbra: A nyit → A zár → B nyit → B zár;
- b) Magasabbról alacsonyabbra: A nyit → B nyit → B zár → A zár;
- c) Alacsonyabbról magasabbra: A nyit → A zár → B nyit → A nyit;
- d) Alacsonyabbról magasabbra: B nyit → B zár → A nyit → A zár.

5. A hagyományos izzók üvegfalán idővel fémes bevonat látható, mert az elpárolgó volfrámszál a búra belső falára lecsapódik.

- a) Az állítás hibás, mert a fémek nem tudnak gőzalapotba kerülni. A búrára korom csapódik le;
- b) Az állítás azért is hibás, mert a fémgőzök nem csapódnak le;
- c) Az állítás azért is hibás, mert csak a folyadékok párolognak, a fémek nem;
- d) Az izzószál párologása miatt folyamatosan vékonyodik az izzószál.

6. A testek tehetetlenségével kapcsolatban fogalmaztuk meg az alábbi állításokat.

- a) A testeknek azt a tulajdonságát, hogy mozgásállapotuk csak egy másik test hatására változik, tehetetlenségnek nevezzük;
- b) A különböző testek különböző ellenállást tanúsítanak a sebességük megváltoztatásával szemben;
- c) A magára hagyott test tehetetlensége kicsi;
- d) A nagyobb tömegű testnek a tehetetlensége is nagyobb.

7. Néhány fogalommal kapcsolatban fogalmaztuk meg az alábbi állításokat.

- a) A teljesítmény a folyamatot az energiaátadás „gyorsasága” szempontjából jellemzi;

b) A hatásfok a folyamatot az energiaátadás „gazdaságossága” szempontjából jellemzi;

c) Az elektromos fogyasztás nem az elektromos fogyasztóra, hanem az energiaátadás folyamatára jellemző;

d) Az elektromos fogyasztó nem fogyasztja az energiát, hiszen az energia megmarad.

8. Ha erős szélben kerékpározunk, a szél sokszor nehezíti előrehaladásunkat. Minden esetben így van ez?

a) Ha hátszélben kerékpározunk, a szél segíti előrehaladásunkat;

b) Csak akkor segít a hátszél, ha a szél sebessége nagyobb, mint a kerékpár sebessége;

c) A szembeszél csak a megindulásnál jelent nehézséget;

d) Szembeszélben nehezebb kerékpározni, mint hátszélben.

9. Ugyanazt a vedret tartjuk egyszer levegőben üresen, másszor víz alatt vízzel telve. Hasonlítsd össze a vedret tartó erőket a két esetben!

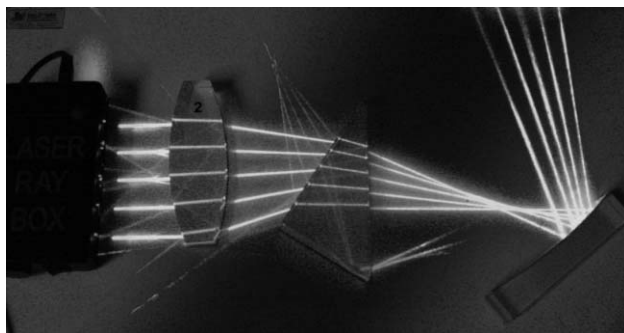
a) Ugyanakkora erővel kell tartani a vedret mindkét esetben;

b) A víz alatt lévő vedret nagyobb erővel kell tartani vízben, mint levegőben;

c) Előfordulhat, hogy a víz alatt lévő vedret kisebb erővel kell tartani vízben, mint levegőben;

d) Lehet, hogy a víz alatt lévő vedret egyáltalán nem kell tartani, sőt, lefelé irányuló erővel kell nyomni, ha víz alatt akarjuk tartani.

10. Hogyan térítené el a három fénytani elem a párhuzamos fénysugarakat, ha egyenként, külön-külön helyezni el azokat az öt fénysugarat kibocsátó fényforrás elé?



a) A gyűjtőlencsére eső párhuzamos fénysugarak a lencse után a fókuszpontig összetartóan haladnának;

b) A prizmán átjutott egyszínű fénysugarakat a prizma egy pontba összegyűjtené;

c) A homorú tükör széttartóan verné vissza a fénysugarakat;

d) A prizmán áthaladt fénysugarak párhuzamosak maradnának.

11. Ha megdörzsölt ebonitrudat közelítünk egy felfüggesztett fémgolyóhoz, akkor

- a) A fémgolyó negatív töltésűvé válik;
- b) A fémgolyón pozitív töltések lesznek túlsúlyban;
- c) A fémgolyó semleges marad;
- d) A fémgolyó közeledik az ebonitrúdhoz.

12. A súrlódási erővel kapcsolatban:

- a) Minél simább két felület, annál kisebb erővel lehet elhúzni az egyiket a másikon;
- b) A csúszási súrlódási erő mindig akadályozza a testek mozgását;
- c) A tapadási súrlódási erő is mindig akadályozza a mozgást;
- d) A tapadási súrlódási erő iránya lehet azonos a test mozgásának az irányával.

### Számolásos feladatok

1. Családi ház építéskor dönteni kell, hogy a meleg vizet villanybojlerrel vagy gázzal működő vízmelegítővel állítsák-e majd elő. A következőket lehet tudni:

**Villanybojler** – A bojleren lévő adatok között, illetve a termékismertetőben a következők olvashatók: 230 V / 1600 W; a bojler hatásfoka 95%-os. A villanyszámláról leolvasható: 1 kWh elektromos energia ára: 23 Ft.

**Gáz vízmelegítő** – A városi gáz fűtőértéke 34,2 MJ/m<sup>3</sup>; a gázmelegítő hatásfoka 70%-os. 1 MJ ára 3,2 Ft.

A családnak várhatóan napi 100 liter meleg vízre lesz szüksége. A vizet 17 °C-os hőmérsékleten kapják a vízhálózatról és 70 °C-ra szeretnék felmelegíteni. A víz fajhője 4,2 kJ/(kg °C).

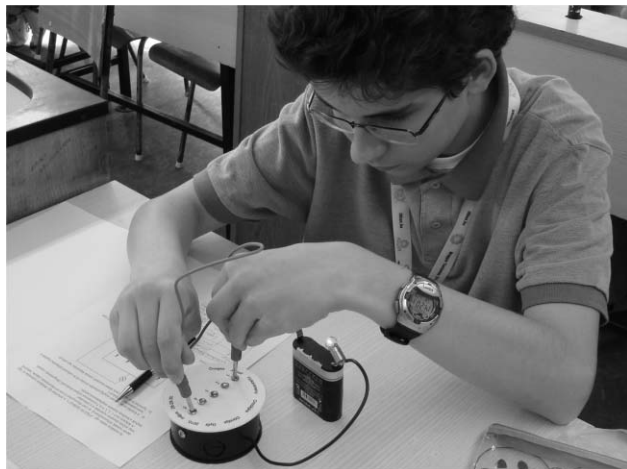
A költségek meghatározásánál még figyelembe kell venni az alábbiakat:

Az áramszolgáltató az energiadíjon túl havi 156 Ft alapdíjat, valamint rendszerhasználati díjat is beszed, ez utóbbi 15 Ft/kWh.

A gázszolgáltató a fogyasztott gáz tarifáján túl évi 12 000 Ft alapdíjat, 0,092 Ft/MJ import korrekciós díjat és 0,055 Ft/MJ biztonsági készletezési díjat is felszámol.

Te, hogyan döntenél? Válaszodat számítással támaszd alá!

A kísérleti feladat komoly erőpróbát jelentett



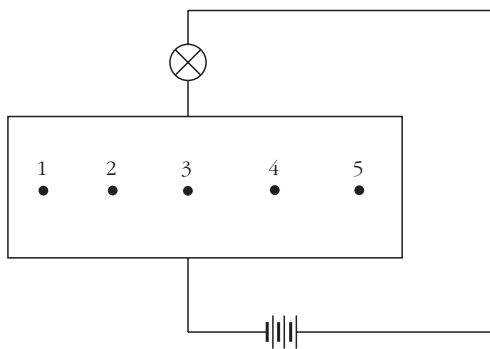
2. Egy léggömbbe levegőnél kisebb sűrűségű gáz van töltve. A léggömbből lelógó spárga végére gemkapcsokat akasztgatunk abból a célból, hogy a léggömb a teremben egy adott magasságban lebegjen. A lebegést nem sikerült megvalósítani, mert a léggömb, ha 7 gemkapcsot akasztottunk a spárga végére, felemelkedett, de ha 8-at, akkor lesüllyedt.

Mekkora a léggömbben lévő gáz sűrűsége?

A teremben a levegő sűrűsége: 1,3 kg/m<sup>3</sup>; a spárga tömege: 2 g; a léggömb tömege felfújatlan állapotban: 3 g; a léggömb térfogata: 9,2 dm<sup>3</sup>; egy gemkapocs tömege: 0,6 g. A léggömb anyagának vastagságától, a spárga és a gemkapcsok térfogatától eltekinthetünk!

### Kísérleti feladat

Az asztalon találsz egy „FEKETE DOBOZ”-t. A dobozban egy áramkört rejtettünk el. Egy darab vezeték felhasználásával, az izzó fényerejéből levont következtetések alapján, határozd meg milyen áramkört rejtettünk el a dobozban!



A dobozon 1, 2, 3, 4 és 5 sorszámmal ellátott érintkezők (fémgombok) vannak, amelyek a kérdéses áramkör meghatározott pontjai.

a) A kísérlet során szerzett megfigyeléseidet röviden írd le (célszerű táblázatba foglalni a tapasztalataidat)! (Indokolj!)

b) Egészítsd ki az ábrát a nem látható áramköri elemek kapcsolási rajz jelével!

### Kísérletelemző feladat

Sorosan kapcsoltunk a hálózatra két 40 W-os, 230 V-os izzólámpát. Megmértük az izzók teljesítményét, ami 14-14 W-nak adódott. Kikapcsolás után az egyik üvegburáját szétörtük, majd újra rákapcsoltuk a hálózatra. Az üvegbura nélküli izzólámpa volfrámszála látványosan, pillanatok alatt elégett, ezt követően a másik izzó sem működött tovább.

Egy szigetelt nyelv csavarhúzó fém részével a búra nélküli lámpa árambevezetőit összeérintve azt tapasztaltuk, hogy az épen maradt izzólámpa teljes fényerővel világított.

Ezt követően a szétört búrájú izzó üveg tartóállványát gázégővel felmelegítve az épen maradt lámpa világítani kezdett, s ha a gázégőt elvettük, akkor is tovább világított. A kikapcsolást követően viszont né-





hány másodpercnyi szünet után már hiába kapcsoltuk vissza, nem gyulladt ki a hibátlan lámpa.

Az alábbi kérdésekre adjál részletes választ! (Válaszaidat te is sorszámozd a kérdéseknek megfelelően!)

- 1) Soros kapcsolásnál a két izzólámpa teljesítménye külön-külön nem a várt 10 watt, hanem 14-14 W. Mi ennek az oka?
- 2) Miért égett el a volfrámszál az üvegbúra széttörése után?
- 3) Miért égett teljes fényerővel az éppen maradt lámpa a csavarhúzóval történt beavatkozás után?
- 4) Az üveg tartóállvány felmelegítését követően miért gyulladt ki a lámpa?
- 5) A gázegő elvétele után miért ég még tovább is a lámpa?
- 6) A ki-, majd bekapcsolást követően miért nem gyullad fel a lámpa?

### Fizikatörténeti feladatok

A következőkben négy fizikatörténeti feladat megoldását várjuk tőletek. Összesen 36 helyes választ adhattok.

Az 1. feladatban Galileo Galilei három jelentős könyvének (*Sidereus nuncius*, *Dialogo*, *Discorsi e Dimostrazioni*) címlapjai alatti téglalapokba írjátok be az adott műre vonatkozó állítások sorszámaikat!

A 2. feladat a heliocentrikus világkép kialakulásáról szól, írjátok be a tudósok hiányzó neveit és nemzetiségüket.

A fizikatörténeti feladat megoldása közben



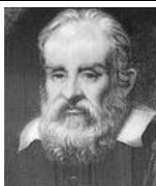



### 1. Fizikatörténeti feladat

<p>1. Az ebben a könyvben leírtak miatt a került a Szent Inkvizíció elé.</p>	<p>2. A könyv címe: <i>Matematikai érvelések és bizonyítások két új tudományág, a mechanika és a mozgások köréből.</i></p>	<p>3. Ezt a könyvet nem sokkal a távcsövvel végzett vizsgálódásai után írta.</p>
<p>4. Ez az ábra ebből a könyvből való.</p>	<p>5. Ebben a művében ír a Jupiter holdjairól, amelyeket távcsövvel figyelt meg.</p>	<p>6. Ebben a könyvében fejt ki nézeteit a ptolemaioszi és a kopernikuszi nézetekről.</p>
<p>7. Ennek a művének az előlapja:</p>	<p>8. Ebben a művében ír a Hold hegyeiről.</p>	<p>9. Ebben a könyvében írja le a lejtőn való mozgást: „...Majd ugyanazon golyót a horony negyedhosszúságú részén futtattuk végig, és amikor az időt megmértük, mindig pontosan az előző idő felét kaptuk.”</p>
<p>10. Utolsó munkája, amit a házi őrizetben, Firenzében írt.</p>	<p>11. A könyv címe: <i>Párbeszéd a két világrendszerről, a ptolemaioszi és a kopernikuszi rendszerről.</i></p>	<p>12. A könyv címe: <i>A csillagok birmőke.</i></p>
<p>13. Ezek az ábrák ebből a könyvből valók.</p>	<p>14. Ebben a könyvében írja le az inga mozgását.</p>	<p>15. Ebben a művében ír a Vénusz bolygó fázisairól.</p>

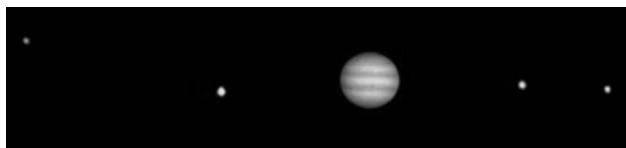


## 2. Fizikatörténeti feladat

1543–1687. a heliocentrikus világkép kialakulása, fordulat a csillagászat történetében (Az évszámok a felfedezés időpontjára vonatkoznak.)		
	Aki megsejtette (1543) Neve: ..... Nemzetisége: .....	Magyarországon ebben az időben: 
	Aki megfigyelte (1576–97) Neve: ..... Nemzetisége: .....	
	Aki bebizonyította (1610) Neve: ..... Nemzetisége: .....	
	Aki értelmezte (1609, 1619) Neve: ..... Nemzetisége: .....	
	Aki megmagyarázta (1687) Neve: ..... Nemzetisége: .....	

3. 1610 első napjaiban Galilei ötödik távcsövet készíttette el. Ez már harmincszoros nagyításra volt képes!

„...a jelen ezerhatszázötödik esztendő január havának hetedik napján, az éjszaka első órájában, midőn az égbolt csillagait néztem a távcsövön keresztül, utamba került a Jupiter. Mivel pedig igen jó műszert használtam (...), három kis csillagocskát láttam mellette állni, kicsiket, de fényeseket.”



Két nappal később a három égitest helyzete megváltozott. Pár nap múlva két fénylő pontot pillantott meg a Jupiter átellenes, keleti oldalán. Ezeknek a Jupiter körül kell keringeniük!

A harmadik pedig éppen mögötte van. Tehát nem csillagokról, hanem bolygókról (ezeket így nevezte) van szó. Pár nap múlva a negyediket is felfedezte.

Ha van évforduló, amit érdemes megünnepelni, akkor ezt a január 7-ét mindenképp érdemes, hiszen ez volt az a nap, amikor Galilei először észlelte a Jupiter kísérőit, ami később igencsak sok muníciót adott neki a kopernikuszi világkép melletti harcban.

Hogyan nevezte el Galilei a Jupiter holdjait?

Sorold fel, hogyan nevezik ma ezeket a holdakat!

Hogyan nevezzük ma a Jupiter négy fényes és nagy holdját?

4. Galileiről szóló kutatások egyetértenek abban, hogy a köztudatban élő alábbi legendák megtörténte kétségbe vonható. (Galilei levelezése fennmaradt. Leveleiben minden őt foglalkoztató eseményről beszámol. E három eseménynek azonban nincs nyoma a leveleiben.)

a) „Mikor tanainak tagadása után felemelkedett térdeiről dacosan dobbantott, és a bírái szemébe vágta: »Eppur si muove!«” Mit jelent az „Eppur si muove”? Ki az a magyar író, aki ezen a címen regényt írt?

b) Mit bizonyított volna a pisai ferdetoronyban elvégzett ejtési kísérlet?

c) A monda szerint egyetemi diák korában Galilei egy alkalommal a pisai székesegyházban a léghuzat által meglendített függő lámpák (csillárok) lengéseit figyelte meg. Mit használt az idő mérésére? Mit tapasztalt?

## Díjazott versenyzők

1. díjat nyert *Majoros Péter*, a pécsi Jókai Mór Általános Iskola tanulója, tanára *Sebestyén Zoltán*, *Papp Roland* (Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium, *Horváth Gábor*).

2. *Holló Csaba* (budapesti Domokos Pál Péter Általános Iskola, *Gyarmatiné Kocsis Mária*), *Pristyák Levente* (tiszaujvárosi Általános Iskola, AMI és Ped.-Szakmai Szolgáltató Intézmény, EPSZ, *Bodnár Istvánné*),

Az abszolút első helyezett a pécsi Jókai Mór Általános Iskolából érkezett Majoros Péter tanárával, Sebestyén Zoltánnal



*Kúsz Ágnes* (makói József Attila Gimnázium, *Kürtösi Sándor*),

*Bognár Tamás* (Debreceni Református Kollégium Dóczy Gimnáziuma, *Tófalusi Péter*),

*Rikker Bálint* (budapesti Veres Péter Gimnázium, Erdősi Katalin),

*Szilágyi András* (nagykanizsai Kőrösi Csoma Sándor Általános Iskola, *Sárdi Zoltán*).

3. *Jakovác Kristóf* (budapesti Áldás utcai Általános Iskola, *Rudolf Tamásné*),

*Matkovics Gábor* (encsi Zrínyi Ilona Általános Iskola és Alapfokú Művészetoktatási Intézmény, *Timár István*),

*Takátsy János* (budapesti Városmajori Gimnázium és Kós Károly Általános Iskola, *Ábrám László*),

*Velkey Géza* (balassagyarmati KÁÁI Szabó Lőrinc Tagiskola, *Fábián Gáborné*),

*Bugyi Márk Csaba* (budapesti Németh László Gimnázium, *Farkas Andrea*),

*Gál Béni* (sepsiszentgyörgyi Székely Mikó Kollégium, *Szakács Mária*),

*Kaposvári Péter* (miskolci Herman Ottó Gimnázium, *Dallos Andrea*),

*Palkó András* (Szentgotthárd és Kistérsége Oktatási Intézmény Vörösmarty Mihály Gimnáziuma, *Mátyás Anna*),

*Fülöp Péter* (tolnai Sztárai Mihály Gimnázium, *Oberländer Sándorné*),

*Szabó Martin* (Kecskeméti Református Gimnázium, *Sikó Dezső*),

*Tóth Arianna Teodóra* (budapesti Veres Péter Gimnázium, Erdősi Katalin),

*Dobos Gábor* (kisvárdai Vári Emil Társulási Általános Iskola, *Reményi Józsefné*),

*Kovács Krisztián* (gyöngyösi Arany János Általános Iskola, *Ádám Sándorné*),

*Takács Gergely* (Budapest Főváros X. kerületi Kőbányai Önkormányzat Kada Mihály Általános Iskola és Gyermek Ház Óvoda, *Takácsné Tóth Ágnes*).

## A verseny támogatói

Oktatási és Kulturális Minisztérium, Magyar Innovációs Szövetség, Paksi Atomerőmű Zrt., Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Olasz Kulturális Intézet, Budapest, EGIS Gyógyszergyár, MEH Nemzetpolitikai Ügyek Főosztálya, SEMILAB Félvezető Fizikai Labor Rt., Universitas-Arrabona Kht., MONTANA Tudásmenedzsment Kft., 77 Elektronika Kft., Agip Hungaria Zrt., Gabonakutató Nonprofit Közhatalmú Kft., Szeged, Duna Takarékszövetkezet, SZABOLCSBIT Kft., MOZAIK Kiadó, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt.

# A FIZIKA OKTV HARMADIK FORDULÓJA AZ ELSŐ KATEGÓRIA RÉSZÉRE – 2010

Vannay László, Fülöp Ferenc  
BME, Fizikai Intézet, Fizika Tanszék

A Műgyetem Fizikai Intézete 1994 óta rendezi a Fizika Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny (OKTV) harmadik, döntő fordulóját. Korábban három kategóriában versenyeztek a diákok. Első kategóriában az emelt szintű fizikaoktatásban részesülők, a másodikban az általános tantervű gimnáziumok tanulói és a harmadik kategóriában a szakközépiskolák diákjai.

A fizika OKTV – a 2007/2008-as tanévtől kezdődően – két csoportban (kategóriában) kerül megrendezésre.

A diákok hovatartozása a versenykiírás szerint:

„Az I. kategóriába azok a középiskolai tanulók, akik nem tartoznak a II. kategóriába.

A II. kategóriában azok a gimnáziumi tanulók, akik a 9. évfolyamtól kezdődően – az egyes tanévek heti óraszámát összeadva – a versenyben való részvétel tanévének heti óraszámával bezárólag összesen heti 8, vagy annál több órában tanulják a fizikát bizonyítványban feltüntetett tantárgyként.”

Mind a két csoport részére három fordulóból áll a verseny. Az első két forduló során elméleti problémák

kat kell megoldaniuk a versenyzőknek, míg a harmadik fordulóban mérési feladatokkal kell megbirkózniuk. A harmadik fordulóban az első két forduló legjobbjai mérik össze tudásukat.

A verseny értékelése a második (az I. kategóriánál maximum 60 pont) és a harmadik (az I. kategóriánál maximum 40 pont) fordulóban szerzett pontok összegzésével történik.

A BME Fizikai Intézet ebben az évben az I. kategória versenyének harmadik – döntő – fordulóját rendezte. A versenyen 30 diák vett részt, két 15 fős csoportban. Az egyik csoport délelőtt 8-tól 12 óráig, a másik 12.30-tól 16.30-ig dolgozhatott, egymástól függetlenül elválasztott mérőhelyeken. A mérőhelyeket sorsolással osztottuk ki a versenyzők között.

Dolgozatunkban először bemutatjuk a verseny kezdetekor kiadott írásos anyagot, majd vázoljuk a kitűzött feladatok megoldásának módját, beszámolunk az értékelés során szerzett tapasztalatokról, a versenyzők eredményeiről, és végül köszönetet mondunk mindazoknak, akik közreműködtek a verseny előkészítésében vagy lebonyolításában.

## A versenyzők részére kiadott írásos anyag

### Valós rugalmas ütközés vizsgálata

**Feladat:** a mérőhelyen található inga, valamint az inga és a kiskocsi ütközésének vizsgálata segítségével határozza meg a kiskocsi tömegét a reá szerelt rugóval és a gyurmaterheléssel együtt.

#### A megoldás lépései:

a) Végezzen méréseket arra vonatkozóan, hogy a rendelkezésére álló ingát tekintheti e „jó közelítéssel” matematikai ingának! Az inga rúdja csapágyazott, merev, „grafit” cső, a rúd végén lévő golyó tömege: 62 gramm. (maximum: 8 pont)

b) Határozza meg az inga és a kocsi ütközésére jellemző „ütközési tényezőt”! (maximum: 16 pont)

c) Határozza meg a kocsi tömegét! (maximum: 16 pont.)

Készítsen jegyzőkönyvet, amelyben részletesen ismertesse munkája menetét – olyan részletességgel, hogy annak alapján megismételhetők legyenek mérései – adja meg a mérései során nyert adatokat, azok feldolgozásához alkalmazott összefüggéseket, valamint az összefüggések segítségével kapott eredményeket. Ügyeljen arra, hogy számításai követhetők legyenek! Befejezésül közölje az elvégzett munkájával kapcsolatos megjegyzéseit és észrevételeit!

#### A feladat megoldásához a mérőhelyen az alábbi eszközöket találja:

Kiskocsi rugóval és terheléssel (a vizsgált minta); Bunsen-állvány díóval és fogóval; gyűjtőlencse foglatban ( $f \approx 35$  mm); stopperóra; szintezhető alaplap, rászerelt ingaállvány ingával, szögmérővel és megvilágító LED-del (a LED-et a működéséhez szükséges tápegység bekapcsolásával helyezheti üzembe); az alapra szerelhető ütköző; szintező; *Négyjegyű függvényábrázoló*. *Matematikai, fizikai, kémiai összefüggések*. 1 db fehér A4-es papírlap; tolómérő (subler); szigetelőszalag; borotvapenge; csavarhúzó.

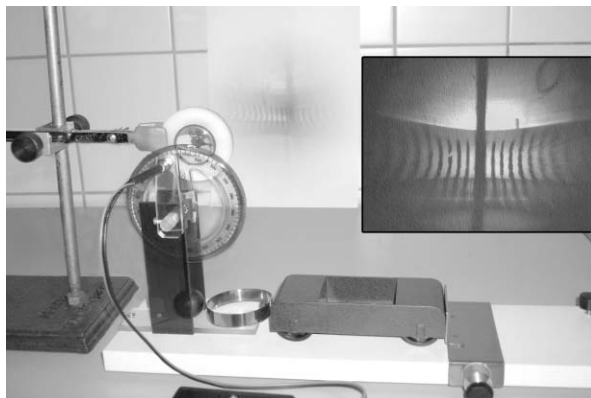
#### További információk:

A verseny időtartama 4 óra. Az elkészített jegyzőkönyve minden lapján, az első oldal jobb felső sarká-

1. kép. Inga az állványon



2. kép. A mérésnél használandó összeállítás.



ban tüntesse fel a mérőhely számát, valamint azt, hogy a délelőtti (De), vagy a délutáni (Du) csoportban mért. Egyéb azonosításra alkalmas adatot (név, iskola stb.) ne tüntessen fel! Ha a kiadott eszközök kezelésével kapcsolatban problémái vannak, vagy az eszközök működésénél rendellenességet tapasztal, forduljon a felügyelő tanárokhoz. A méréseket körültekintően végezze! Vigyázzon, hogy az erős fényforrás ne világítson senkinek sem a szemébe! Tartsa be az általános balesetvédelmi szabályokat! Vigyázzon saját maga és a kiadott eszközök egészségére!

#### A feladat megoldása

A versenyzők részére a feladat megértését segítette a mérőhelyen található eszközök jelenléte, míg az olvasó számára csak az eszközök listája ad némi tájékoztatást. Ezért két képet közlünk a kísérleti berendezésről. Az 1. kép az állványra szerelt ingát mutatja, az állítható szögmérővel és a LED tartójával. A 2. kép a mérésnél használandó összeállítást mutatja: a vizsgált kiskocsit a rászerelt rugóval, az állítható helyzetű ütközővel és a szögmérő skálájának kivetítéséhez alkalmazott optikai lencsével. A felvételen gyengén látszó kivetített skálát külön kiemeltük.

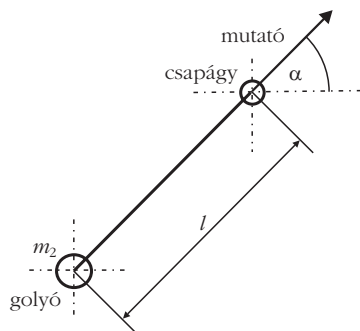
a) Ha az ingát ideális matematikai ingának tekintjük, a lengésidejének meghatározásához csak az inga hosszát kell ismernünk. Esetünkben az inga hosszának a tengely középpontjának és a golyó súlypontjának távolságát tekinthetjük. Ez a hossz a golyó tengelyközépponttól való távolságából, és a golyó sugarának méretéből tevődik össze. A távolságokat tolmérővel mérve:  $l = 69 + 12,5 = 81,5$  mm. Ezzel az értékkel számolva, az inga lengésideje ( $T_i$ ):

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{81,5 \cdot 10^{-3}}{9,81}} = 0,5727 \text{ s.} \quad (1)$$

Az ingát nyugalmi helyzetéből  $5^\circ$ -ra kitérítve – az (1) összefüggés ilyen esetre vonatkozó közelítés – 30 lengés idejét tudtuk mérni. A mérést 10 esetben elvégezve, az átlagosan mért lengésidő:  $T_m = 0,5735$  s. A lengésidőből számított ingahossz:  $l_m = 81,73$  mm. Vizsgálataink alapján, a mért és a számított adatok összehasonlításával, azt a következtetést vontuk le,

hogy ingánk a továbbiakban „jó közelítéssel” matematikai ingának tekinthető.

b) Két test centrális és egyenes ütközésekor az ütközés előtti, és az ütközés utáni sebességek közötti kapcsolat könnyen levezethető, de megtalálható a középiskolában használatos képletgyűjteményben (*Négyjegyű függvényábrázoló*. *Matematikai, fizikai, kémiai összefüggések*) is. A vonatkozó összefüggések:



1. ábra. Vázlat az ingáról

$$u_1 = (1 + k) \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} - k v_1, \quad (2)$$

$$u_2 = (1 + k) \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} - k v_2, \quad (3)$$

ahol  $v$  az ütközés előtti sebesség;  $u$  az ütközés utáni sebesség, és  $k$  az ütközési szám:

$$k(v_1 - v_2) = u_2 - u_1. \quad (4)$$

Legyen az 1 jelű test az inga gömbje, a 2 jelű a kiskocsi. Amikor az ingát alkotó gömböt ütköztetjük a rögzített kiskocsival:  $v_2 = u_2 = 0$  és ekkor:

$$k v_1 = -u_1. \quad (5)$$

A gömb ütközés előtti sebességét ( $v_1$ ) az indítás magasságából, az ütközés utáni sebességét ( $u_1$ ) az emelkedés magasságából, az energiamegmaradás törvénye segítségével határozhatjuk meg. Az inga helyzetét az ingához rögzített, szögmérő előtt mozgó mutató segítségével állapíthatjuk meg. Ha az ingát függőleges helyzetéből  $90^\circ$ -kal – vízszintes helyzetbe – kitérítjük és innen nyugalmi helyzetből elengedve, az ütközés előtti sebessége:

$$v_1 = \sqrt{2lg} = \sqrt{2 \cdot 81,73 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} = 1,2663 \text{ m/s}. \quad (6)$$

Az ütközés után az emelkedés magasságának pontos meghatározása az inga gyors mozgása, és az inga helyzetét jelző szögmérő sűrű beosztása miatt nehezen oldható meg. Ezért az átlátszó műanyag szögmérő skáláját zöld színű LED-del megvilágítjuk és egy lencse ( $f = +35$  mm.) segítségével ernyőre vetítjük. (Mivel a LED a skálának csak egy részét világítja meg, a LED helyzetét a szükségletnek megfelelően a szögmérő mentén egy körpályán lehetett változtatni.) Az inga gyors mozgása miatt az inga helyzetének meghatározása a mutató segítségével még így kivetítve sem könnyű feladat. Ezért a szélső helyzet meghatározásakor úgy jártunk el, hogy a szögmérő skálájának egy részét szigetelőszalaggal leragasztottuk, majd azt vizsgáltuk, hogy az ingára szerelt mutató a leragasztott részen túllendült-e. Ilyen

módon megbízhatóan  $0,5^\circ$  pontossággal határozhattuk meg a mutató, azaz az inga helyzetét. Méréseink során azt találtuk, hogy a rögzített kocsiról ütközés után viszszapattanó inga  $\alpha_1 = 3,5^\circ$  híján érte el vízszintes kiindulási helyzetét. Így az ütközés utáni pillanatban a visszapattanó golyó sebessége:

$$u_1 = \sqrt{2lg(1 - \sin \alpha_1)} = \sqrt{2 \cdot 81,73 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (1 - \sin 3,5^\circ)} = 1,2270 \text{ m/s}. \quad (7)$$

A megállapított sebességek és (5) felhasználásával az ütközési tényező:

$$k = 0,969.$$

c) A kiskocsi tömegének meghatározására a (2) kifejezés ad lehetőséget. Amikor az ingát a rúd vízszintes helyzetéből indítva az álló, de nem rögzített kocsinhoz ütköztetjük,  $v_2 = 0$ ,  $v_1$  pedig a már korábban is meghatározott  $1,266$  m/s. Ugyancsak ismert  $m_1$ , a golyó megadott tömege (62 g). Így csak a golyó ütközés utáni sebességét kell megállapítanunk ahhoz, hogy a kocsi tömegét ( $m_2$ ) kiszámíthassuk.

A golyó ütközés utáni sebességét pedig ismét az emelkedés magasságának ismeretében tudjuk meghatározni. A mérés menete azonos az  $u_1$  meghatározásánál alkalmazott eljárással. Méréseink alapján az inga mutatója, a golyó szélső helyzetében  $\alpha_2 = 56,5^\circ$ -os szöggel tért el a vízszintestől. Így a golyó sebessége az ütközés után:

$$u'_1 = \sqrt{2lg(1 - \sin \alpha_2)} = \sqrt{2 \cdot 81,73 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (1 - \sin 56,5^\circ)} = 0,5161 \text{ m/s}.$$

A most már a rendelkezésünkre álló adatokat a (2) egyenletbe behelyettesítve:

$$-0,5161 = (1 + 0,969) \cdot \frac{62 \cdot 1,2663 + m_2 \cdot 0}{62 + m_2} - 0,968 \cdot 1,2663.$$

Innen a kiskocsi tömege:

$$m_2 = 155,44 \text{ g}.$$

Utólag a kiskocsi tömegét megmérve, azt  $150$  g-nak találtuk.

## A versennyel kapcsolatos tapasztalatok és az eredmények

A feladat első részét a legtöbben sikeresen megoldották: az inga lengésidejének méréséből kapott és a mért adatokból számított értékének összehasonlításával. Megoldást jelentett az inga közvetlenül mért és a mért lengésidőből számított hosszának összehasonlítása is. Helyes mérési adatok esetén mind a két esetben igen jól egyeztek az adatok.

Az inga hosszának mérésénél nem vártuk el a tolmérőn a Noniusz-skála használatát. 0,5 mm-es mérési pontosságra számítottunk. Néhányan ismerték a skála használatának módját és alkalmazták. Volt azonban olyan versenyző, aki 2 cm-es hibával mérte a közel 8 cm-es hosszat.

Sokan nem tudták, vagy nem gondoltak arra, hogy a matematikai inga lengésidejére szokásosan alkalmazott összefüggés egy közelítés, amely  $5^\circ$ -nál kisebb kitérések esetén ad helyes eredményt.

A feladat második részénél néhány versenyző nem ismerte az ütközési szám fogalmát. Ennek a problémának úgy akartuk elejét venni, hogy olyan „függvénytáblát” adtunk minden versenyzőnek, amelyben szerepelt az ütközési szám definíciója (4), valamint a feladat megoldásához szükséges további két összefüggés – (2) és (3) – is. Néhány versenyző nem vette igénybe a segítséget, és maga definiált egy ütközési számot, ütközés előtti és utáni energiák, vagy sebességek segítségével.

Az ütközési szám meghatározásának legegyszerűbb módja az ingának a rögzített kiskocsival való ütköztetése, és az ingát képező golyó ütközés előtti és ütközés utáni sebességének meghatározása. Ekkor – mint ahogy fentebb leírtuk – az (5) összefüggés adja a megoldást. A golyó két sebessége az inga kitérésszögének mérésével (6), illetve (7) alkalmazásával történhet. Ezt az egyszerű megoldást – érdekes módon – csupán egy versenyző választotta.

A versenyzők zöme a (4) összefüggést vagy a lendületmegmaradás törvényét alkalmazta. Nekik szükségük volt a kocsi ütközés utáni sebességének ismeretére. Ezt a sebességet elvileg helyesen csak egy-két diák határozta meg. Ők a veszteségek miatt állandó lassulással mozgó test sebességére és a test által megtett útra vonatkozó összefüggést alkalmazták, utat és időt mértek. A rövid út miatt az idő mérése okozott nehézséget.

A legtöbben a kocsi mozgását állandó sebességűnek tekintették, és ugyancsak utat és időt mértek.

Azzal, hogy „valós” ütközés vizsgálatát kértük, arra akartuk felhívni a figyelmet, hogy az ütközés során veszteségek lépnek fel. Ez többeknek elkerülte a figyelmét, és veszteségek nélküli, ideális rugalmas ütközésnek tekintették a vizsgált esetet.

Az ütközési számra kapott igen eltérő eredményeket többen nem értelmezték. Nekik nem tűnt fel, hogy 1-nél nagyobb értéket kaptak, vagy rugalmatlan ütközésre jellemző kis értéket határoztak meg.

A kiskocsi tömegének meghatározása szoros kapcsolatban áll az ütközési számmal. Ezért az előbb röviden ismertetett elvi vagy mérési hibák kihatással voltak a tömeg értékének meghatározására. Ismét meg

kell említeni, hogy a biztosan hibás eredmény – például a kocsi tömegére kapott 3 g – nem gondolkoztatta el a versenyzők többségét.

Szembeötlő, hogy a versenyzők kétharmada vidéki iskolákból jött. Külön meg kell említeni a győri Révai Miklós Gimnáziumot (felkészítő tanár: *Somogyi Sándor*) ahonnan hat versenyző vett részt a döntőn, és közülük négyen az első tíz között végeztek.

Figyelmet érdemel a budapesti Puskás Tivadar Távközlési Technikum diákjainak teljesítménye is, ahonnan öten kerültek a döntőbe.

## A végeredmény

A második és a harmadik fordulón elért pontszámok összesítése után az élmezőnyben a sorrend az alábbiak szerint alakult:

1. *Varga Ádám* (SZTE Ságvári Endre Gyak. Gimn., Szeged, felkészítője: *Tóth Károly* és *Hilbert Margit*),
2. *Tamás Bence* (Szent István Gimn., Kalocsa, felkészítője: *Szőke Imre*),
3. *Maknics András* (Móricz Zsigmond Gimn., Szentendre, felkészítője: *Rózsa Sándor*),
4. *Hargitai Balázs* (Piarista Gimn., Budapest), 5. *Mészáros András* (Révai Miklós Gimn., Győr), 6. *Nagy Miklós* (Révai Miklós Gimn., Győr), 7. *Gógös Balázs* (Révai Miklós Gimn., Győr), 8. *Vuchetich Bálint* (Révai Miklós Gimn., Győr), 9. *Lájer Márton* (Szent László Általános Művelődési Központ, Baja), 10. *Albert Áron* (Sárospataki Református Gimn., Sárospatak), 11. *Morapitiye Sunil* (Táncsics Mihály Gimn., Kaposvár), 12. *Szedelényi János* (Puskás Tivadar Távközlési Technikum, Budapest), 13. *Varsányi Márk* (Szilágyi Erzsébet Gimn., Eger), 14. *Szabó Zoltán* (Szilágyi Erzsébet Gimn., Eger), 15. *Kiss Ádám* (Czuczor Gergely Bencés Gimn., Győr).

## Köszönetnyilvánítás

A verseny anyagi háttérét részben az Oktatási Hivatal biztosította. Ezt ezúton is köszönjük.

A verseny lebonyolításához szükséges eszközök kivitelezéséért *Horváth Bélának*, *Halász Tibornak* és *Bacsa Sándornak*, a megfelelő körülmények megteremtéséért *Gál Bélánénak* és *Mezey Miklósnak* mondunk köszönetet.

A versennyel kapcsolatos adminisztrációs és gazdasági ügyek intézéséért *Honti Editet* és *Kovács Annát* illeti köszönet.

Elismerés és köszönet illeti mindazokat (szülőket, tanárokat, barátokat stb.), akik segítettek a versenyzők munkáját és ezzel hozzájárultak a verseny sikeréhez.

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

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

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 Tamás, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szatmáry Attila ügyvezető igazgató.

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 780.- Ft + postaköltség.

**HU ISSN 0015-3257** (nyomtatott) és **HU ISSN 1588-0540** (online)



## ...SZÁRAZ HALBÓL KÉSZÜLT MÁLÉT EHETSZ

225 éve halt meg Sajnovics János

Füstöss László  
BME, Fizika Tanszék

„Több, mint két évszázada, 1770-ben Koppenhágában – és valószínűleg még ugyanabban az évben a nagyszombati egyetem nyomdájában – megjelent egy mű, amelyet ma már a finnugor összehasonlító nyelvészet és egyúttal az őstörténeti kutatás egyik mérföldkövének tartunk. *Kálózi és tordasi Sajnovics János* műve, a *Demonstratio idioma ungarorum et lapponum idem esse* (»Bizonyítása annak, hogy a magyar és a lapp nyelv azonos») oly annyira nevezetessé vált, hogy szakkörökben többnyire csak a cím kezdő szava után *Demonstratió*ként említik. Sajnálatosabb, hogy a magyar nyelvtudomány e történeti jelentőségű munkáját lefordították ugyan dán, finn és német nyelvre, de első magyar fordítása csak 1994-ben jelent meg!” (Bartha Lajos)

Sajnovics legfontosabb munkája tehát 250 éves, első magyar fordítása pedig 16. Nem véletlen elkallódásról van szó, hanem tudatos elutasításról.

A szerző mindössze 52 évet élt – eredményes csillagásként és autodidakta nyelvészként, akinek újabban ismét egyre több ellensége támad. Holott életében szelíd, barátságos szerzetes volt, akinek csapás volt a jezsuita rend 1773-as feloszlata, és aki a támadásokat elkerülendő inkább felhagyott összehasonlító nyelvészeti kutatásaival. Úgy gondolta, nincs mit kezdenie a tiszteletreméltó testőrtiszt *Barcsay Ábrahám* nemzetet óvó sóhajával:

„Sajnovics jármától óvjuk nemzetünket,  
Ki Lapponiából hurcolja nyelvünket!”

A matematikáért, csillagászatért lelkesedő szerzetes felkészületlenül érte, hogy tudományon kívüli szempontok meghatározóak lehetnek tudományos eredmény befogadásánál, pontosabban elutasításánál. A csillagászati megfigyelések eredményeivel kapcsolatban felmerülő áskálódások nem voltak ismeretlenek előtte, de a nyelvészettel már a politikai támadásokat is vállalni kellett volna.

35 éves koráig minden kedve szerint történt. Nyugalmanak záloga rendtársa, tudományos példaképe és hivatali felettese, *Hell Miksa* volt. A nyugalom végének is Hell volt az oka, mert ő eszközölte ki, hogy a vardói expedícióban társa lehessen. A csillagászati észlelésekhez és előkészületekhez is kellett a segítség, a földrajzi, földmágneses, tengertani, légkörtani, néprajzi és nyelvészeti kutató program pedig olyan gazdag volt, hogy egyetlen utazó annak végrehajtásához elégtelen lett volna. A legfontosabb talán mégis az volt, hogy Hell hallott és olvasott arról, hogy a skandináv országokban lakó lappok nyelvét több

nyugati nyelvész a magyar nyelv rokonának tartja, s minthogy saját magyar nyelvtudásában bizonytalan volt, Sajnovicstól várta, hogy anyanyelve ismeretében tisztázza az állítólagos magyar–lapp nyelvrokonság kérdését.

Sajnovics részt vállalt az expedíció minden munkájából, és a Vardón végzett észlelések egy része is tőle származik – az expedíció széles körű tudományos sikerében igen nagy része volt.

Hell, minthogy ő maga más feladatokkal volt elfoglalva, állandóan biztatta, hogy járjon végére a magyar és a lapp nyelv közti egyezéseknek. Sajnovics nem valami nagy önbizalommal kezdte meg munkáját, nem tudta hogyan fogjon hozzá. A lapp nyelv megismeréséhez nem volt egyéb segédeszköze, mint egy lapp nyelvtan és egy szójegyzék, amellyel *Storm* titkos tanácsos ajándékozta meg őket Krisztiániában. Mindkét művet a trondheimi lapp szeminárium professzora, *Knud Leem* írta. Leem kiváló ismerője volt a lappok viszonyainak és a lapp nyelvnek, műveivel azonban Sajnovics nem tudott boldogulni, mert a nyelvtan dánul volt írva, és szótárában a lapp szavak dánul voltak értelmezve. Külön nehézséget jelentett az a körülmény, hogy könyveiben Leem a lapp szavakat a dán helyesírás szabályai szerint írta, s minthogy Sajnovics nem tudott dánul, még csak azt sem tudhatta, hogy a Leem-féle művekben közölt lapp szavakat hogyan kell olvasni. Nem csoda hát, hogy csillagász nyelvésznünknek nem volt nagy kedve a lapp nyelvvalló foglalkozáshoz.

Ámde egy nap lappok érkeztek hozzájuk a hegyekből rénszarvasaikkal együtt. Hell kívánságára Sajnovics behívott közülük néhányat szobájukba, s elkezdte kérdezetni tőlük különféle tárgyak neveit. Hallván a lappok beszédét, egyrészt azt tapasztalta, hogy a lapp hanglejtés meglepően emlékeztetett a magyarra, másrészt észrevette, hogy sok hasonlóan csengő szónak a jelentése is azonos. Ezek után Sajnovicsnak is megjött a kedve a lapp nyelv tanulmányozásához.

A hallott szavakat gondosan papírra vetette, mégpedig magyar helyesírással. Később, Vardó szigetén többször adódott lehetősége ugyanilyen munkára. Azok a lappok, akikkel kapcsolatba került, különféle nyelvjárásokat beszéltek, szójegyzéke nemcsak terjedelemre nőtt meg, hanem nyelvjárástani szempontból is értékes volt. Minthogy most már ő sem kételkedett a magyar és a lapp nyelv rokonságában, teljes erővel végezte a nyelvi vizsgálatokat. Hogy leküzdje azt a nehézséget, amely szótárának dánnyelvűsége folytán

adódott, elhatározta, hogy a dán értelmezéseket lefordítja latinra. E munkában a vardői pap jött segítségére, aki oly buzgalommal végezte feladatát, hogy az áhított lapp–latin szótár néhány héten belül készen állott. Ezután már gyorsabban haladt a lapp és a magyar közös szókincs felderítése. Sajnovics azonban – amint ő maga írja – tisztában volt azzal, hogy két nyelv rokonsága csupán szóegyezések feltárása útján nem bizonyítható be, hanem ahhoz szükség van ragozás- és szóképzésbeli egyezések kimutatására is, eltölte, hogy elolvassa Leem dánul írt lapp nyelvtanát. A könyv tartalmának megismeréséhez ismét a vardői pap segítségét vette igénybe, s Leem nyelvtanából pontosan feljegyezte azokat a szabályokat, amelyekre összehasonlító munkájához szüksége volt. Ezek után sem állíthatjuk azonban, hogy munkája immár könnyű lett volna. Nem állíthatjuk ezt egyebek közt azért sem, mert Leem nyelvtanából a lapp nyelvet nem volt könnyű megismerni.

A lapp nyelv vizsgálatára vonatkozó eredményeit már Koppenhágába visszaérkezve (1769. szeptember 17.) összefoglalhatta, és az akadémia három, egymást követő ülésén felolvashatta. Ezt követően jelent meg a *Demonstratio* koppenhágai kiadása, amelynek második, bővített, de elveiben változatlan kiadását 1770 végén, vagy 1771 elején Nagyszombatban nyomtatta ki. Ez utóbbiban jelent meg először nyomtatásban a *Halotti Beszéd* szövege.

1889-ben *Hám Sándor* mutatta be a *Demonstratiót*:

Erre felosztja könyvét 12. fejezetre: I. A magyarok és lappok nyelve azonos lehet a nélkül, hogy egymást megértenék. II. A két nyelv azonosságát e népek könyveiből nem szükséges nyomozni. III. Az azonosság bizonyítéka a nyelvek hangjainak egyforma kiejtése. IV. A Leem-féle lapp írás összehasonlítva a magyarral. V. A Leem-féle írásnak átváltoztatása s a magyar helyesírás. VI. A dialektusról általában. VII. A tenger- és hegyvidéki lapp dialektusok eltéréséről. VIII. A magyar-lapp nyelv-azonosság kitűnik a két nyelv közös szavaiból. IX. A két nyelv egységét bizonyítják a szavak ragozása, melléknévek fokozása, a kicsinyítő képzők és számnevek. X. A bizonyításhoz járulnak a névmások, ragok és előjárók. XI. Bizonyítanak még az igék hajlítása és a segédigék. XII. Megerősítik a vitatást egyes tekintélyek, kik szintén ugyanezen nézetten vannak.

Hám a *Demonstratio* bizonyító részeit is az olvasók elé tárja:

A kérést, ohajtást, parancsolást mindkét nyelv egyformán fejezi ki. A határozókat illetőleg pedig szintén egyformán ragokat használnak.

Összehasonlítja a két nyelv lét-igéjét, perfectumát, futurumát, melyek közül a lét-igék és a futurum megegyeznek, de már a perfectumok nem, mert a magyarban nem összetettek, a lappban pedig *lem* segédigével fejeztetnek ki; mire megjegyzi, hogy lehet, hogy a lappoknak ezen összetett perfectumon kívül van még más, bár ritkán használatos perfectumuk. A mediatív, inchoatív és diminutív igék mindkét nyelvben megegyeznek, mi a rokonságnak világos bizonyítéka.

Hogy a magyar nyelv mennyit változott, bizonyítja a Halotti Beszéddel, melyet Faludi átírásában közöl, s mely általában érthető ma is, de melynek néhány szavát (feleym, eleve, isemüküt, heon, feze) már csak egyeztetés által lehet a mai nyelvben felismerni. De abból, ha esetleg valaki a régi magyar beszédet meg nem érti, következik-e, hogy a régi és mai magyar nyelv idegenek egymáshoz viszonyítva?

A melléknéveknél a középfok épügy képződik a magyarban mint a lappban (magyar — bb, lapp — b képzőkkel); a felső fokot a lappban —*mus* képző alkotja, vagy a név megkettőzése is (boanda boanda = gazdagnál gazdagabb). A melléknévek egyedül állva mindkét nyelvben ragoztatnak, jelzőként szerepelve egyikben sem. — A kicsinyítő képző a lappban *tsh*, a tenger mellékiéknél *sh*, mely a magyar *cs*-vel rokon (pl. köve-cs).

A magyar nyelv eredetére vonatkozó korabeli feltevések nem keltettek politikai érdeklődést, pedig érdekes feltételezésekről volt szó. De ezek többnyire csak ötletek voltak, a szerteágazó lehetőségek összességükben nem vezettek sehova. *Beregszászi Nagy Pál* a magyar nyelvet a perzsa, török, arab és héber nyelvvel rokonította.

A *Biblia* kisajátítása már akkor is hazafias tettek számíthatott, amikor *Horvát István* leírta szállóigévé vált mondását: „Pözsög a Szent Írás minden féle régi magyar nevektől és régi magyar írás módtól.”

A csillagász Sajnovics segítségére sietett a matematikus *Dugonics András*. Nem szakmai segítségről volt szó, hiszen Dugonics nem művelte, csak tanította a matematikát a nagyszombati, majd budai egyetemen. Ám népszerű regényeket írt a honfoglalás korából: *Etelka* (1788), *Jolánka*, *Etelka leánya* (1804), valamint *Etelka Karjelben* (1794). E művek a finnugor rokonság népszerűsítése érdekében születtek, ám nyelvészkedéseit akár paródiának is tekinthetnénk. Műveihez számtalan lábjegyzetet csatolt, amelyekben jónéhány borzasztó szómagyarázat található, bizonyítván, hogy Sajnovicson és talán *Révai Miklóson* kívül nem értette senki e hazában, mi is az a nyelvrokonság. Dugonics András a lappok nevét a *láp* szóból magyarazza, a Balti-tengert a *baltá*ból, Finnországot *Finomországnak* nevezi.

A bécsi udvarban élő magyar testőrség nagyvonalú elképzeléseit a finnugor nyelvrokonság elmélete igen zavarta. Barcsay Ábrahám kapitány a dicsőséges múltat félti, azokat az eszméket, amelyek erőt adnak a magyarságnak: a szkíta rokonságot, vitéz honfoglaló eleink emlékét. Felháborodása lehet, hogy nem jó irányban, de igen határozottan és hatásosan irányítja tollát:

„Addig magyaroknak hirdessék munkáji,  
Hogy ők a scytháknak vitéz unokáji.  
E szeglet-kövön fekszik szabadságunk,  
Külmben bizonyos, higgyük el, rabságunk.  
Sajnovits jármától ójjuk nemzetünket,  
Ki Lappóniából hurcolja nyelvünket...”

Sajnovics a magyar és a lapp nyelv rokonságáról értekezett ugyan, de az ellentábor a nyelvrokonságot néprokonságnak tekintette, s kikérte magának a lapp atyafiságot.

Pápay Sámuel az első magyar irodalomtörténet szerzője egy emberöltővel a *Demonstratio* megjelenése után a nyelvi hasonlóságok alapján hajlott volna a finnugor rokonság elfogadására, mégsem mulasztotta el kifejtetni:

„...a finn és lapp nemzetek felől sem tudjuk, hogy valami jeles nagy tetteik által magukat ami velünk való atyafiságra méltókká tették volna, ugymind kik Európának északi szuglyáiban meghúzván magukat eleitől fogva ismeretlen alacsonyságban éltek, az igaz vér pedig, közmondás szerint, nem válik vízzé!”

A kortársak közül Barcsay Ábrahám mellett Orczy Lőrinc tiltakozik leghevesebben a finnugor rokonság ellen. *Tsillag néző Sajnovits' és Hell' bibái tzáfoltatnak* című verséből kitűnik, hogy a *Demonstratiót* figyelmen kívül hagyta, hogy aztán ösztüzet zúdítson a szerzőre.

„Tudom, meg örültél az Atyafiságnak,  
'S ilyly Nemes Nemzettel való rokonságnak,  
Nagy híre volt mindég híres lapponságnak,  
Valamint most köztünk a' jeles tótságnak,”

Orczy Lőrinc egyszerűen elképzelhetetlennek tartja, hogy azoknak a szkítáknak a leszármazottai, „kik hajdan Sándornak [Nagy Sándor makedón uralkodónak] olyly fenn felelének, 's kinek kópjájokkal büszkén kérkedének” mégis inkább a lappok rokonai lennének. E feltételezés mögött idegen cselszövést sejt, és nem áttal a fejr megyei tordasi és kálozi Sajnovics köré szlovák kapcsolatokat építeni.

„Te pedig Tsillagász! bár akár ki lehetsz,  
Kedves rokonidhozz töstént vissza mehetsz,  
Vélek száraz halból készült málét ehetsz,  
Mert lám ítéletet Nyelvünkről nem tehetsz.”

Valószínűleg a *száraz halból készült málé* Orczy képalkotásának egyik csúcspontja. A sértettség oka pedig az elszigeteltségből adódó félelem lehetett. *Kollár Ádám* kortárs történetíró szerint a szláv népek gyűrűbe fogják a magyarságot, és a magyar nyelv olyként enyészik el, ahogy a kunoké. Ez az egyik forrása *Herder* híres jóslatának a magyarok eltűnéséről, amely jóslat mehökkentette s egyben fölháborította a művelt magyar köröket. Orczy Lőrinc s vele mások azt gondolták, hogy minden eltérés a dicsőséges magyar múltval való hivatkozástól a nemzetet gyengíti és pánszláv érdekeket szolgál. Ekkor jelenik meg először az a gondolat, hogy a finnugor nyelvrokonság hirdetői a magyarság ellenségei.

Sajnovics nehezen tűrte a számára érthetetlen ellenszenv hullámait. Ehhez járult a jezsuita rend 1773-as feloszlatása. Életének utolsó 12 évéről szinte semmit nem lehet tudni. 19. századi életrajzírója, Hám Sándor szerint: „Sajnovics rendjének eltöröltetése után magánember maradván a budai egyetemi csillagvizsgálónál vitt valami hivatalt, de aligha elsőrangút! ... S valóban második munkáján, mely 1778-ban jelent meg, mint *astronomi adiunctus* szerepel. Lehet, hogy 1773. évtől folytonosan adiunctus volt.

JOANNIS SAJNOVICS. S. J.  
UNGARI TORDASIENSIS  
E COMITATU ALBA - REGALENSI  
REGIÆ SCIENTIARUM SOCIETATIS HAFNIENSIS,  
ET NIDROSIENSIS SOCI

DEMONSTRATIO.

IDIOMA

UNGARORUM

ET

LAPPONUM

IDEM ESSE.

REGIÆ SCIENTIARUM SOCIETATI DANICÆ  
PRÆLECTA, ET TYPIS EXCUSA HAFNIÆ

ANNO MDCCLXX.

RECUSA

TYRNAPIÆ,  
TYPIS COLLEGIJ ACADEMICI SOCIETATIS JESU.



E második munkája szintén latin nyelven jelent meg s 1778-ban Budán nyomtatott; czime: *Idea astronomie...* A könyvecske 86 lapból áll, melyben a csillagászat legelemibb része, úgy szólván ábécéje foglaltatik. A könyv célja, mint maga is előadja a bevezetésben, a járatlanokat az égről tájékoztatni és csillagászat fogalmával némileg megismertetni.”

Úgy látszik, hogy a csillagász Sajnovicsot éppen hogy megtűrték hátralévő éveire. Ha nem nyelvészkedik, talán elismert csillagász is lehetett volna a felvilágosodás századában. Az utókor méltánylását nyelvésznek kellett összefoglalnia:<sup>1</sup>

„Sajnovics *Demonstratióját* az első olyan monográfiaként értékeljük, amely céljaul két, egymással távoli rokonságban álló finnugor nyelv viszonyának a tisztázását tűzte ki. Valljuk, hogy noha a magyar és a lapp nyelv rokonságát előtte már több nyugati és északi tudós hirdette, e rokonságot sokoldalúan elsőnek Sajnovics világította meg. A tudományos értékű hazai összehasonlító nyelvészet kezdetét az ő *Demonstratiójának* a megjelenésétől számítjuk. Tény végezetül az is, hogy a nyelvi rokonság bizonyításában Sajnovics a nyelvtani egyezéseknek oly nagy szerepet juttatott és oly kiemelkedő fontosságot tulajdonított, hogy joggal tekinthetjük őt az összehasonlító nyelvtudomány megalapítójaként emlegetett *Rasmus Rask* és az ilyenként ismert *Franz Bopp* érdemes előfutárának...”

Sajnovics tehát a nyelvtudománynak nemzetközi viszonylatban is kiemelkedő, elismert képviselője: A sok szenvedés, fáradság és munka végül is megtermi gyümölcsét: alig több mint 100 évvel a *Demonstratio* megjelenése után a budapesti egyetemen tanszék létesült a magyarral rokon és rokonnak tartott nyelvek folytatolagos, állandó és beható tanulmányozására.”

<sup>1</sup> Lakó György: *Sajnovics János. A múlt magyar tudósai*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1973

# HÍREK ITTHONRÓL

## Kálmán professzor az Óbudai Egyetem tiszteletbeli doktora

Az Óbudai Egyetem Szenátusa 2010. június 30-án Ünnepi kibővített ülés keretében első tiszteletbeli doktornak avatta a budapesti születésű *Kálmán Rudolf* professzort. Az Óbudai Egyetem a *Doctor honoris causa* kitüntetési címet a modern matematikai rendszerelmélet alapjainak megalkotásáért, a szabályozás alapeszközének, a Kálmán-szűrő elméletének kidolgozásáért, nemzetközileg is kimagasló tevékenységének elismeréseképpen adományozta Kálmán professzornak.

Kálmán professzor az ünnepi programon megköszönve az elismerést kiemelte „külön öröm számára, hogy ezen kitüntetést szülővárosának egyetemétől vehette át”.

Kálmán Rudolf fiatalon került az Egyesült Államokba, ahol villamosmérnöki diplomát szerzett a cambridge-i Massachusetts Institute of Technology-n.

Kálmán Rudolf közreműködött *Carathéodory* variációs számítási eljárásainak az optimális irányításelmélet matematikai módszertanába történő bevezetésében, valamint a Pontrjagin-féle maximumelv és a Hamilton–Jacobi–Bellman-egyenlet közti kapcsolat tisztázásában. Kutatásai nemcsak a matematikai eszközök általános érvényét tükrözték, hanem igazolták a digitális számítógépek meghatározó szerepét is a tervezési folyamatokban és a rendszerek implementációjában.

A szűrési problémákat a 20. század két kiemelkedő matematikusa, az amerikai *Wiener* és a szovjet *Kolmogorov* is tanulmányozta. Egymástól függetlenül fejlesztettek ki egy szűrési algoritmust, amely Wiener–Kolmogorov-szűrőként vált ismertté. Kálmán Rudolf kapcsolódó munkája eredményeként vált a rendszerés az irányításelmélet azzá, amit ma ezen értünk. Egy sor alapvető fontosságú fogalom bevezetése és vizsgálata, valamint a matematikai gondolkodásmód játszott alapvető szerepet az alkalmazott matematika e virágzó ágának kifejlesztésében.

A Kálmán-szűrő és későbbi, nemlineáris problémákra történő kiterjesztései valószínűleg a modern irányításelmélet legszeleesebb körben alkalmazott eredményei. Az 1960-ban publikált Kálmán-szűrő olyan matematikai módszer, amely alkalmas a „zaj” kiszűrésére különféle adatsorokból. Hiányos információk alapján is képes optimális becsléssel meghatározni komplex, változó rendszerek időállapotait. A rendszert leíró paraméterek becsült értéke egyrészt az adott időpontban végzett mérés, másrészt a korábbi



mérések alapján végzett előrejelzés együttes figyelembe vételével határozható meg.

Első ízben 1963-ban, az amerikai ember nélküli Hold-szondák berendezéseinek alkalmazták ezt az eljárást. További sikerek születtek többek között a repülésirányításban (pl. Apolló-program), a járművek és precíziós műszerek vezérlésében, a rakéatechnikában, a radarok célkövetésében, a műholdas helymeghatározó rendszerekben, a közgazdasági idősorlevezésekben, a meteorológiai előrejelzésekben és a modern autókban történő alkalmazásai során is. A NASA mérnökei szerint a holdprogram sikerességéhez nagyban hozzájárult a szűrő alkalmazása.

Kálmán Rudolf tagja az Amerikai Tudományos Akadémiának, az Amerikai Mérnökakadémiának, tiszteleti tagja a Magyar Tudományos Akadémiának, valamint a francia és az orosz akadémiáknak. Tiszteletbeli doktora számos egyetemnek, közöttük a budapesti Műegyetemnek.

Több tucatnyi kitüntetésé közül emeljük ki hármat:

- a japán Nobel-díjként is emlegetett Kyoto-díjat elsőként Kálmán professzornak ítélték oda 1985-ben;
- 2008-ban megkapta a Charles Stark Draper díját a műszaki tudományok területén odaítélt legnagyobb elismerést;
- 2009-ben az Amerikai Egyesült Államok legrangosabb tudományos díját, a 2008-as Nemzeti Tudományos Éremet vehette át *Barack Obama* elnöktől (az éremre magyarul, ékezetekkel vésték a nevét).

*Gáti József*

## Új CCD-kamera a Piszkéstetői Observatóriumban

Az MTA Lendület Fiatal Kutatói Programjában nyertes *Kiss László* kutatócsoportjának egyik fontos célja a mátrai obszervatórium műszereinek modernizálása, amiben egyik első lépés volt a Schmidt-távcső eddigi,

közel 15 éves digitális kamerájának nagyobb érzékelő CCD-re cserélése.

Címlapon szereplő hamisszínes kép 1,1×1,1 fokalátómezőben örökítette meg a Messier 33 jelű



spirálgalaxist a Triangulum csillagképben, s egyben jól illusztrálja az egy expozícióval leképezhető tekintélyes égbolt-területet (összehasonlításképpen: a képen két telihold is elférne egymás alatt). A korábbi kameráénál tízszer nagyobb látómezejű új CCD-

vel egyaránt új távlatok nyílnak az idősor-fotometriában, a Naprendszer kis égitestjeinek kutatásában, illetve a tranziens asztrofizikai objektumok optikai azonosításában.

Kiss László

## Amikor a határ valóban a csillagos ég

A Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete 2010-ben második alkalommal hirdetett pályázatot középiskolai tanulók részére. A *Határ a csillagos ég – 2010* című pályázat célja távcsöves megfigyelés elvégzése volt az Intézet Pizskéstetői Observatóriumának 60/90/180 cm-es Schmidt-teleszkópjával. A pályázaton magyarországi és határon túli, magyar nemzetiségű középiskolai diákok indulhattak 3 fős csapatokban. A pályázat témájául egy alkalmas égi objektumot kellett választani. A nyertes csapat a felkészítő tanárral együtt meghívást kapott a Pizskéstetői Observatóriumba, ahol csillagász szakember segítségével közreműködhetek a csillagászati észlelésben.

Egy igazi tudományos feladat végrehajtása során a tanulók bepillantást nyerhettek a 21. század csillagászati megfigyelési technikáiba, miközben olyan csillagászati ismeretekkel gazdagodhattak, mint például egy égi objektum láthatósága, fényessége, látszó át-

mérője, a színszűrők használata, vagy a digitális képrögzítés és képfeldolgozás sajátosságai. Az idei pályázatnak különös érdekességet adott, hogy a Lendület Fialat Kutatói Program támogatásának köszönhetően új CCD-kamera került a Schmidt-távcső fókuszába.

Idén 15 pályamű érkezett. Többségük szakmailag színvonalas munka, melyből a zsűri a budaörsi Illyés Gyula Gimnázium és Közgazdasági Szakközépiskola csapata, az „Illyésesek” (*Bucsi Karina, Bán Bence és Molnár-Göb Márton*), felkészítő tanár: *Székely Györgyi*) pályázatát (célobjektum: NGC 7331, képünkön) találta legjobbnak. A 2–3. helyezett csapatok holtversenyben a „Líra” (*Ekler Viktória, Nemes Balázs, Lovász Rózsa*, Leőwey Klára Gimnázium, Pécs, felkészítő tanár: *Gyenyizse Péter*; objektum: NGC 6779) és a „Deltoton” (*Tőzsér Attila*, Corvin Mátyás Gimnázium és Műszaki Szakközépiskola, *Hanyecz Ottó*, Szilágyi Erzsébet Gimnázium, *Galgóczi Gábor*, ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium és Kollégium, mind Budapest, felkészítő tanár: *Horvai Ferenc*, objektum: M33). A nyerteseknek ezúton is gratulálunk!

A *Buchala Kirával* kiegészített győztes csapat 2010. augusztus 29-én készült felvételén (a mellékelt képen) az NGC 7331 jelű galaxis látható. A nagy látómezőbe még a kép alsó részén körülbelül fél fokra található Stephan-ötös galaxiscsoport is befért. A felvételek jobbra derült, kissé fátolyfelhős égen készültek B, V és R szűrőkön keresztül. A teljes integráció B-ben 30 perc, míg V-ben és R-ben 21-21 perc volt. Az észlelés végére befelhősödött, így be kellett csukni a kupolát.

A másnapi borult este során a diákok a digitális képfeldolgozás alapjairól, valamint a hamisszines képek összerakásáról hallgattak rövid ismertetőt. Az új ismeretek elsajátítása oly sikeres volt, hogy a nyertes csapat már harmadnap estére önállóan(!) elkészítette az itt bemutatott színes kép első változatát. A felvétel jól illusztrálja a Schmidt + Apogee technika bravúros teljesítményét. A tehetséges fiatal diákok virtuóz képfeldolgozása nyomán valóban szemet gyönyörködtető képet kaptunk a galaxisokban gazdag, választott égi területről.

Kiss László, Kővári Zsolt

### Ajánlott linkek:

Határ a csillagos ég – 2010: <http://www.konkoly.hu/hatar2010.html>  
Schmidt-távcső: <http://www.konkoly.hu/staff/racz/schmidt.html>  
Egy csodaszép spirálgalaxis (NGC 7331): <http://hirek.csillagaszat.hu/asztroblog/20081117-ngc7331-kep.html>  
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet: <http://www.konkoly.hu>  
MTA Lendület Fialat Kutatói Program: [http://mta.hu/oldmta/?pid=634&no\\_cache=1&backPid=390&tt\\_news=10177&cHash=bd18cb8929](http://mta.hu/oldmta/?pid=634&no_cache=1&backPid=390&tt_news=10177&cHash=bd18cb8929)

