

fizikai szemle

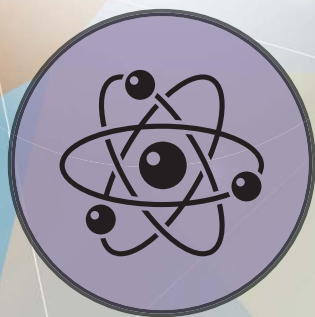
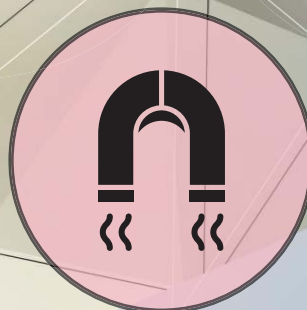
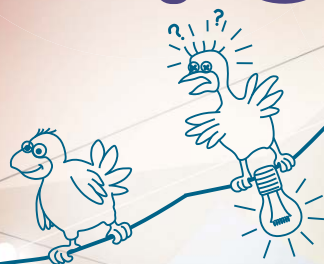
2016/3



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében



2016. ÁPRILIS A FIZIKA MINDENKIÉ 2.0

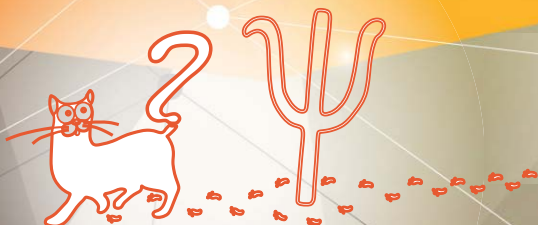


A fizika 2016-ban is mindenkié! A tiéd, miénk és mindenkié – tanároddal, barátaiddal, szüleiddel fizikázz, végezz kísérletet vagy készíts új eszközt, hallgass vagy szervezz előadást –, szóljon minden a fizikáról! Vegyél részt, regisztráld a saját programod és ünnepeljük együtt a fizika kérdéseit és csodás eredményeit! Hiszen a fizika segítségével adunk választ számos, a társadalmat érintő problémára – például energia, közlekedés, kommunikáció, környezetvédelem –, amelyek mindannyiunk életét befolyásolják.
Mert A FIZIKA MINDENKIÉ!

Információért látogass el weboldalunkra:

WWW.AFIZIKAMINDENKIE.KFKI.HU

Támogatók:



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Lendvai János

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

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

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

A LIGO lézer-interferométer 4 km hosszú karjainak végén ilyen tükrökről verődik vissza a lézerfény.

Frei Zsolt: Vadászat a gravitációs hullámokra – 2. rész 74
A detektorok működése

Gombkötő Balázs, Kornis János: A lézerszemcse és mérés technikai alkalmazásai 79

Miért mutat az érdes felületről (például papírlap, diszperz vagy matt festék stb.) visszaszóródó lézerfény „szemcsézettséget”, véletlenszerű ingadozásokat?

Radnai Gyula: Inspiráció a tudományban 83

Gondolatok Ernst Mach halálának centenáriuma alkalmából

A FIZIKA TANÍTÁSA

Gündischné Gajzágó Mária: Lichtenberg-ábrák keltése Bolyai Farkas idején és ma – 2. rész 88

Gyönyörű elektrosztatikai mintázatok kialakítása egykori és mai eszközökkel

Stonawski Tamás, Gálik Tamás: A középiskolában tanult mozgások 92

*elemzése Doppler-effektus segítségével – avagy „látni a hangot”
Mozgások vizsgálata mikrofon, hangszóró és számítógép segítségével*

Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Tibanyi Janka, Király Kata, 98

*Gudmon Olivér, Kövécs Levente, Horváth Gábor: Odüsszeusz ijának titka
Az új feszítési görbéjének hőmérsékletfüggése, avagy hogyan tudta Odüsszeusz felajzani az erős íját?*

VÉLEMÉNYEK

Márki-Zay János: Győzzön a jobb! – Vitaindító 104

Vitaindító írás a szakmódszertan és az innovatív kísérleti eszközök fontosságáról

HÍREK – ESEMÉNYEK

Rátz tanár urak nélkül nincs felemelkedés 106

Science on Stage Hungary 2016 fesztivál – jelentkezési felhívás 107

Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntetettjéire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira 108

Befejeződött a tizedik, jubileumi CERN-i továbbképzés 40 magyar fizikatanár részére 108

Zs. Frei: Gravitational waves – Part 2: The detectors

B. Gombkötő, J. Kornis: Laser speckle pattern and its application in optical metrology

Gy. Radnai: Inspiration in scientific discovery – meditations on the centenary of Ernst Mach's death

TEACHING PHYSICS

M. Gündischné-Gajzágó: Producing Lichtenberg patterns today and in the time of Farkas Bolyai – Part 2

T. Stonawski, T. Gálik: See the sound – analysing simple motions by the Doppler effect

Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Tibanyi Janka, Király Kata, Gudmon Olivér, Kövécs Levente, Horváth Gábor: The secret of Odysseus' bow

OPINIONS

J. Márki-Zay: May the better win! – Keynote

EVENTS



VADÁSZAT A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOKRA – 2. RÉSZ

A detektorok működése

Frei Zsolt

ELTE Atomfizikai Tanszék

Cikksorozatunk első részének (*Fizikai Szemle* 2016/2, 38–41. old.) megjelenése óta – sőt, a nyomdai átfutás ideje miatt néhány nappal már előtte – a LIGO Tudományos Együttműködés bejelentette a sokak által már sejtett hírt: a LIGO két detektora 2015. szeptember 14-én először észlelt gravitációs hullámokat. A 2015 szeptembere után eltelt 5 hónapban a Tudományos Együttműködés alaposan ellenőrizte a mérési adatokat, 50 millió CPU-órányi időt töltve azzal. Elkészítette és beküldte a felfedezésről szóló cikket a *Physical Review Letters* folyóiratba, megkapta a három – pozitív – bírálói véleményt, és megválaszolta az azokban foglalt kérdéseket. Miután a folyóirat a cikket közlésre elfogadta, a LIGO meghirdette azt a sajtótájékoztatót, amelyet egyszerre több helyszínen, köztük Magyarországon, az MTA székházában tartott.

Cikkünk szerzője csoportjával 2007-ben csatlakozott a LIGO Tudományos Együttműködéshez, és a LIGO tagjaként rá is vonatkozott a titoktartási kötelezettség, egészen a sajtótájékoztató kezdetéig. Az MTA-n a felfedezés bejelentésén túl részletesen ismertettük a magyar hozzájárulást is a LIGO eddigi működéséhez.

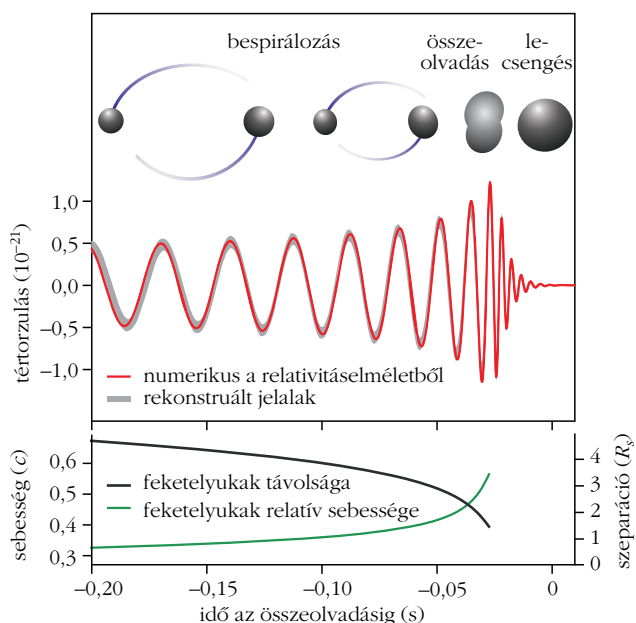
A 2015 szeptemberében észlelt jel egy körülbelül 1,3 milliárd fényévre lévő galaxisból származik, ahol két, egyenként 29, illetve 36 naptömegű fekete lyuk olvadt össze az egymás körül keringéssel eltöltött évmilliók után úgy, hogy a keringés legutolsó fázisában és az összeolvadás pillanatában olyan erős jelet bocsátott ki, amit a LIGO jelenlegi érzékenysége mellett is észlelni tudott. Az összeolvadás előtti keringés utolsó 8 orbitja és az összeolvadás mindössze 0,2 másodpercig tartott! Ezalatt a 8 keringésnyi idő alatt a két fekete lyuk távolsága körülbelül 600 km-ről 200 km-re csökkent, ekkor horizontjaik összeértek és megtörtént az egybeolvadás (lásd a 4. ábrát). Az összeolvadás utáni pillanatokban egy ideig még nem teljesen gömbszerű „végtermék” 250 fordulat/másodperces pörgése is keltett észlelhető gravitációs hullámokat, amiből azt is ki tudtuk számítani, hogy a végtermék tömege 62 naptömegnyi, azaz 3 naptömegnyi anyag hiányzik. Ez nyilvánvalóan az összeolvadás pillanatában az $E = mc^2$ összefüggésnek megfelelően gravitációs hullámok formájában távozott. Így a 2015. február 11-én bejelentett felfedezés igazából 3 fontos részből áll: (a) először láttunk gravitációs hullámokat, (b) először szereztünk arról kísérleti bizonyítékot, hogy léteznek fekete lyukak kettős rendszerei, sőt ezek az Univerzum koránál rövidebb idő alatt össze is tudnak olvadni, és végül (c) ez volt a természetben mért legnagyobb energiájú folyamat, amelyet valaha észlelt az emberiség.

Sorozatunk jelen cikkében elsősorban a LIGO ismertetésére szorítkozunk (jövő hónapban, az utolsó részben ismertetjük majd a gravitációs hullámok lehetséges asztrofizikai forrásait, illetve a most észlelt jelenség további részleteit is). Mielőtt azonban bemutatnánk a detektorok működési elvét, érdemes megbecsülni a források várható erősségét, hiszen ebből látszik, hogy milyen technikai nehézséget jelent ez a fajta kísérlet.

Azt várjuk, hogy mozgó anyag gravitációs hullámokat fog létrehozni. Ha az elektromágneses hullámok analógiáját vesszük segítségül, akkor megállapíthatjuk, hogy az energiamegmaradás következtében a gravitációs hullámoknak nem lehet monopolforrása. Sőt, mivel a gravitációs „töltésnek” nincs előjele, ezért dipólusugárzás sem jön létre. Ha az időben változó tömegsűrűséget multipolsorba fejtsük, akkor belátha-

4. ábra. A felfedezésről szóló cikkben (*Phys. Rev. Letters*, Volume 116, Issue 6, id. 061102) ezen az ábrán foglalták össze az észlelt jel fizikai forrását: A felső sorban a kettős feketelyuk összeolvadásának fázisai – bespirálózás, összeolvadás és lecsengés –, a második sorban az észlelt jeleket, az alsó ábrán pedig a két feketelyuk csökkenő távolsága, illetve növekvő sebessége látható, az előbbi a Schwarzschild-sugár (R_s , a jobb oldalon), az utóbbi a fénysebesség (c , a bal oldalon) függvényében.

4. ábra. A felfedezésről szóló cikkben (*Phys. Rev. Letters*, Volume 116, Issue 6, id. 061102) ezen az ábrán foglalták össze az észlelt jel fizikai forrását: A felső sorban a kettős feketelyuk összeolvadásának fázisai – bespirálózás, összeolvadás és lecsengés –, a második sorban az észlelt jeleket, az alsó ábrán pedig a két feketelyuk csökkenő távolsága, illetve növekvő sebessége látható, az előbbi a Schwarzschild-sugár (R_s , a jobb oldalon), az utóbbi a fénysebesség (c , a bal oldalon) függvényében.



Frei Zsolt fizikus, az MTA doktora, az ELTE Atomfizikai Tanszék tanszékvezető egyetemi tanára, az Akadémia Lendület Asztrofizikai Kutatócsoport vezetője. Asztrofizikát, kozmológiát és képfeldolgozást tanít. Több mint száz nemzetközi publikáció és számos magyar nyelvű ismeretterjesztő cikk szerzője. *Inflációs kozmológia* címmel *Patkós András*sal közösen egyetemi tankönyvet írtak.

tó, hogy az első el nem tűnő tag, amely gravitációs hullámot hozhat létre, a kvadrupol tag (ezt általában $I_{\mu\nu}$ jelöli az általános relativitáselméleti számításokban). A detektorainkhoz közeledő, távolból érkező gravitációs hullámok leírása során több egyszerűsítéssel szoktunk élni. Elhanyagoljuk az anyagot a térben, és nagyon gyengének tételezzük fel a gravitációs teret. Az általános relativitáselméletben használatos metrika ekkor a következő egyszerű alakot ölti:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad (1)$$

ahol $\eta_{\mu\nu}$ a Minkowski-téridő (ezt használjuk, mert nincs anyag), $h_{\mu\nu}$ pedig kis perturbációkat ír le. Az Einstein-egyenlet megoldható úgy, hogy a $h_{\mu\nu}$ -ben a magasabb rendű tagokat elhanyagoljuk. Ekkor egy hullámeqyenletet kapunk, ami leírja $h_{\mu\nu}$ terjedését a vákuumban.

Ha a korábban említett $I_{\mu\nu}$ kvadrupol tagot beírjuk az általános relativitáselmélet Einstein-egyenletébe, akkor abból h -ra a következő adódik:

$$h_{\mu\nu} = \frac{1}{d} \frac{2G}{c^4} \frac{d^2 I_{\mu\nu}}{dt^2}, \quad (2)$$

ami érdekes módon a forrástól mért távolság első hatványával lesz fordítottan arányos ($h_{\mu\nu} \sim 1/d$).

Nyilván olyan asztrofizikai források jelét van esélyünk megmérni, amelyek a legintenzívebb hullámokat keltik. Adjunk erre az intenzitásra nagyságrendi, felső becslést. A kvadrupolmomentum idő szerinti második deriváltjára dimenzióanalízis alapján optimális esetben

$$\frac{d^2 I_{\mu\nu}}{dt^2} \sim M c^2 \quad (3)$$

kapható. Az extragalaktikus asztrofizikában szokásos naptömeg (M_{\odot}) és megaparsec (Mpc) egységekben (a távolság mérésére szolgáló parsec – pc – körülbelül 3,26 fényév, azaz 1 Mpc körülbelül 3 millió fényév, tipikusan ezt használjuk galaxisok közötti távolságok leírására), h amplitúdójára ebben az optimális esetben

$$h \leq \frac{1}{d} \frac{2GM}{c^2} \leq 10^{-19} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{d}{\text{Mpc}} \right)^{-1} \quad (4)$$

értéket kapunk. Az első egyenlőtlenségből látszik, hogy h nagyságrendileg a forrás *Schwarzschild-sugarának* és távolságának a hányadosa. Egy tipikusan 100 Mpc távolságra lévő galaxisban összeolvadó, naptömegű feketelyuk-párosból tehát a tér 10^{-21} nagyságrendű változása várható. Ha 1 méteres „méterrúddal” mérnénk, akkor 10^{-21} m megváltozást kellene kimutatnunk, ami a proton átmérőjének mindössze milliomodrésze. Kicsit szemléletesebben: ha a Nap, és a legközelebbi csillag – amely 4 fényévre van – távolságát kellene meghatároznunk, akkor a szükséges pontosság egy emberi hajszál vastagsága... A hullám frekvenciájára is adhatunk felső becslést. Az elv a követ-

kező: a forrás változásának periódusidejét a kauzalitás korlátozza. A forrás periódusideje nem lehet kisebb mint az az idő, amennyi ahhoz szükséges, hogy a fény oda-vissza áthaladjon rajta. Mérete pedig legalább a Schwarzschild-sugár, így a tömeg függvényében a kibocsátott gravitációs hullám frekvenciájának felső határa nagyságrendileg:

$$f \leq \frac{c^3}{4\pi GM} \leq 16 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1} \text{ kHz}. \quad (5)$$

Az általános relativitáselmélet megfontolásaiából (amelyek további részletezésétől itt eltekintünk) megérthető a fentiekén túl az is, hogy a gravitációs hullámok *transzverzális* hullámok, kétféle *polarizációjúak* lehetnek (ezeket h_+ és h_{\times} jelöli), a *fény sebességével* terjednek, és – mint fent már említettük – amplitúdójuk a forrástól mért távolság első hatványával csökken. Látjuk, hogy időben változó tömegeloszlás kvadrupol tagja fog ilyeneket kelteni, méghozzá nagyon kis amplitúdóval. Az észlelést nehezíti teszi, hogy a nagyobb tömegű, erősebb források esetén a hullám frekvenciája igen alacsony lesz. Mindezek alapján lássuk, hogy milyen kísérleti berendezésekkel lehet ezeket a hullámokat esetleg kimutatni.

Joe Weber még az 1970-es években megalkotta a tömegrezonátorok elvét, megépítette kísérleti berendezését és detektálni vélt gravitációs hullámokat is. Az előbbiért, a detektorok elvéért ma is hálás a tudományos közvélemény. Az utóbbi, a tényleges detektálás viszont sikertelennek számít. Weber hiába erősködött a végletekig, a mai napig sem tudták megismételni és ellenőrizni az általa állítottakat, ezért ezek általánosan elutasított „eredmények”.

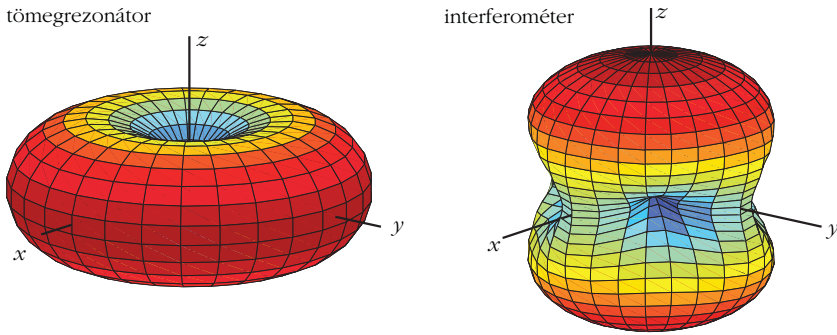
Az alapelv itt az, hogy a tömegrezonátoron áthaladó gravitációs hullám árapályereje a sajátfrekvenciáján gerjeszti a tömegrezonátort, és annak a rezgése mérhető. A tömegrezonátorok hatalmas alumíniumtömbök, súlyuk tipikusan 2 tonna körüli, hengeres alakúak, hosszuk 3 m és sajátfrekvenciájuk körülbelül 900 Hz. Jó érzékenységet érnek el, de csak a sajátfrekvencia szűk környezetében (± 10 Hz). Weber idején még szobahőmérsékleten működtek, a mai, modernbb változatok néhány kelvinre vannak hűtve, vákuumban vannak felfüggesztve, és a szeizmikus izoláció érdekében többszörös (egymáson függő) ingákon lógnak. Azt, hogy rezegnek és hogy mekkora a rezgés energiája, a hengeres tömb végére, az alaplapjára illesztett, a geometriai tengelyben elhelyezkedő jeladó (angolul *transducer*) adatai alapján tudjuk megállapítani.

A tényleges hatás, amit az alumíniumtömb érzékel, a következőképpen függ h_+ -tól és h_{\times} -tól:

$$b(t) = F_+ h_+(t) + F_{\times} h_{\times}(t), \quad (6)$$

ahol a forrás térbeli pozíciójától függ a detektort jellemző

$$F_{\pm} = \sin^2\Theta \cos 2\phi \quad (7)$$



5. ábra. A bal oldali ábrán a tömegrezonátorok, a jobb oldali ábrán az interferométerek szögfüggő válasza a beérkező gravitációs hullámra. Mindkét esetben a z tengely a szimmetriatengely (a tömegrezonátorok esetén az alumíniumhenger hossz tengelye, az interferométerek esetén pedig a karok az x és az y tengely mentén helyezkednek el). Látható, hogy a tömegrezonátor a henger tengelyére merőleges irányból érkező hullámokra a legérzékenyebb, és a henger tengelye mentén érkezőkre nem reagál. Az interferométer a karok síkjára merőleges irányból érkező jelekre a legérzékenyebb, és akkor nem ad jelet, ha a karok síkjában, a két kar között félúton érkezik a hullám.

és

$$F_x = \sin^2\Theta \sin 2\phi \quad (8)$$

válaszfüggvény. Itt Θ a forrás irányának szögtávolsága a hengerrezonátor tengelyétől mérve, a ϕ pozíciószög pedig a koordináta-rendszer megválasztásától függ. Az 5. ábra bal oldalán látható ez az irányfüggés, illetve az, hogy a detektor érzékenysége jórészt független a forrás égi pozíciójától. Ez nem teszi lehetővé, hogy egy észlelt jel forrását azonosítsuk, viszont azt is jelenti egyben, hogy a detektor „látószöge” hatalmas. Nem kell irányítani az égen, szinte bármilyen irányból jöhet a jel, képes észlelni azt.

Az *interferometrikus detektorok* a kísérleti berendezések újabb nemzedékét képviselik. Lényegük, hogy két hosszú, egymásra merőleges kar mentén figyelik a relatív hosszúságváltozást, miközben a detektoron áthalad a gravitációs hullám. Átviteli függvényük a következő:

$$F_x = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\Theta) \cos 2\phi \cos 2\psi + \cos \Theta \sin 2\phi \sin 2\psi, \quad (9)$$

illetve

$$F_x = -\frac{1}{2} (1 + \cos 2\Theta) \cos 2\phi \sin 2\psi + \cos \Theta \sin 2\phi \cos 2\psi, \quad (10)$$

ahol Θ és ϕ a gömbi koordináta-rendszer megszokott koordinátái, ψ pedig a gravitációs hullám polaritásának irányától függ (tömegrezonátorok esetén a válaszfüggvény nem függött a polarizáció irányától). Az 5. ábra jobb oldalán tüntettük fel az interferométerek érzékenységeinek szögfüggését.

Jelenleg több interferométer működik és még többet építenek vagy éppen továbbfejlesztnek. Ezeket az 1. táblázatban foglaltuk össze. A LIGO (amerikai, elsősorban az MIT és a CalTech fejlesztette) és a GEO600 (német, illetve angol forrásból finanszírozva)

már régen egyesült, közösen dolgoznak. 2007 tavaszától a LIGO és a VIRGO (olasz–francia) konzorciumok adatcsere-megállapodást kötöttek. Nem feltétlenül egyforma technikát fejlesztenek (mint ahogy azt a LIGO és a GEO600 teszi), de az adatokat közösen dolgozzák fel. A közös adatfeldolgozás mindkét fél számára előnyös: a gravitációs hullámok felfedezéséhez szükséges, hogy több, egymástól távol lévő detektor egyszerre érzékelje ugyanazt a jelet, hiszen ezzel kizárható, hogy az egyik detektor – amit lokális szeizmikus rezgések például megzavarhatnak – téves jelzést adjon. Ezt tehát a két egymástól távoli LIGO

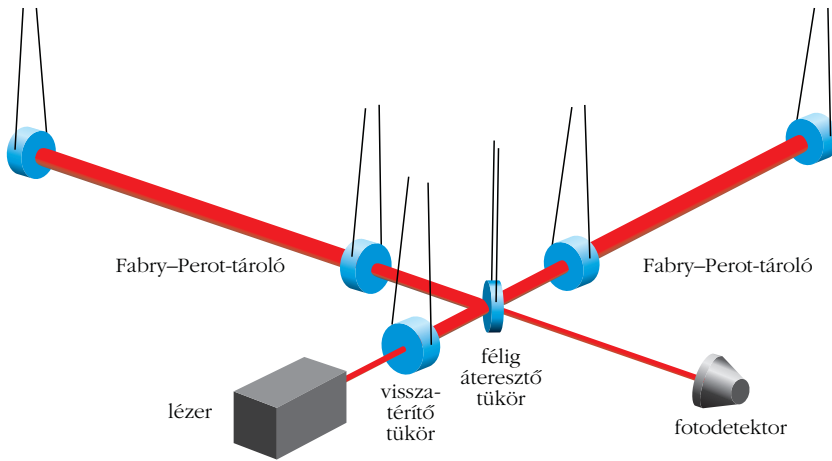
detektor meg tudja, illetve meg tudta tenni, a VIRGO önmagában a felfedezésre nem elegendő. Másrészt viszont a GEO600 és a VIRGO bevonása a szoros együttműködésbe két másik szempontból hasznos: egyrészt több detektor jeléből, az érkezési idők méréseiből a forrás iránya jobban behatárolható, másrészt több detektor jeléből az érkező hullám polarizációs állapota is mérhető. Fontos megjegyezni, az előző szakaszban úgy jutottunk arra a következtetésre, hogy csak a h_+ és h_x polarizációs állapotok lehetségesek, hogy elfogadtuk, hogy a gravitáció elmélete az általános relativitáselmélet. Más elméletek egyéb polarizációs állapotokat is megengednének, és a több detektor együttes méréséből ezek majd – várhatóan – kizárhatók lesznek.

A lézer-interferométerek nemcsak egy szimpla Michelson-interferométert tartalmaznak, de azért, hogy a gravitációs hullámzás következtében létrejövő fáziseltolódást megtöbbszörözzék, a karok külön-külön Fabry–Perot-rezonátorokkal is el vannak látva. Az elvi elrendezést lásd a 6. ábrán!

A működés lényege a következő: a lézer bekerül az interferométerbe, a Fabry–Perot-tárolók megnövelik

1. táblázat		
A jelenleg működő vagy épülő lézer-interferométerek		
detektor	a karok hossza (m)	helye
aLIGO H1	4000	Hanford, Washington, USA
aLIGO L1	4000	Livingston, Louisiana, USA
aLIGO India	4000	India (tervezett)
aVIRGO	3000	Olaszország (átépítés alatt)
GEO600	600	Németország
KAGRA	3000	Japán (jelenleg épül)

Hanfordban és Livingstonban van két „advanced LIGO” 4 km-es detektor. A két aLIGO egymástól 3000 km-re található, és koincidenzában képesek működni. Az aVIRGO detektor karjai Olaszországban ezekkel összemérhető hosszúságúak, 2016 második felében csatlakoznak a mérésekhez, a GEO600 jóval kisebb, a KAGRA viszont már föld alatti, és hűthető, „következő generációs” rendszer lesz.

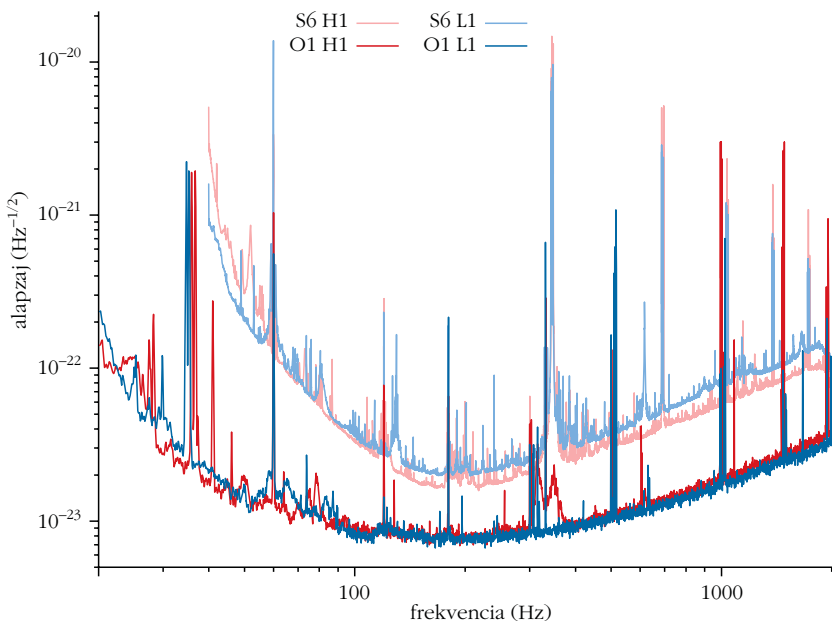


6. ábra. A LIGO esetén alkalmazott elrendezés. A lézer fényét a félígáteresztő tükör kettéosztja és a Michelson-interferométer két karjába juttatja. Azokba egy-egy Fabry-Perot-interferométer van építve, amelyek megnövelik a karokon belül a lézerfény effektív teljesítményét, és jelentősen megnövelik a karokban a lézerfény úthosszát. A Fabry-Perot-interferométerek két végén lévő tükrök maguk a próbatestek. Ezek vannak páronként egymástól 4 km-re, és e szakasz hossza változik a gravitációs hullám áthaladásakor. A két karból kilépő fény a félígáteresztő tükrön keresztül a fotodetektorra kerül. Az azon leolvasott idősor a tényleges mérési eredmény. Mivel ebben a folyamatban a félígáteresztő tükör nem csak a fotodetektor felé tereli a fénynyalábokat, hanem a forrás, a lézer felé is jut azokból, ezért a teljesítményt újrahasznosító visszatérítő tükör szükséges a lézer előtt.

az effektív úthosszát, majd onnan kikerülve a fotodetektoron létrejön az interferenciakép, illetve kioltják egymást azok a fénysugarak, amelyek a két különböző karból érkeznek. Azért, hogy a veszteség minél kisebb legyen, a fény útjába, közvetlenül a lézer után egy visszatérítő tükröt is raknak. Ennek feladata, hogy

tások során úgy javult, ahogy azt előre meg lehetett jósolni. 2007-ben – és azóta is – a LIGO pontosan tartotta az eredetileg megígért tempót. Csoportunk 2007-ben csatlakozott a LIGO Tudományos Együttműködéshez. Az ekkor zajló egy évnyi adatgyűjtés során (ez volt az ötödik hosszabb adatgyűjtő időszak, a *Science Run 5*, ezért S5-nek nevezik

7. ábra. A LIGO detektorok érzékenysége. A hanfordi detektort jellemző görbék pirossal, a livingstoni görbék kék színnel vannak feltüntetve. Mindkét esetben a felső, halványabb görbék az átépítés előtti utolsó adatgyűjtés során (S6) érvényes értékek, az alsó, sötétebb görbék pedig a most zárult, a felfedezést hozó O1 mérési szakasz esetén érvényes érzékenységi görbék. A görbék „tarkító” csúcsok ismert zavarokhoz tartoznak. Ezek például az USA-beli 60 Hz-es váltakozó áramú hálózat frekvenciáján, és azok felharmonikusain jelentkeznek. A függőleges tengelyen az ilyen ábrákon szokásos mértékegységet, az amplitúdósűrűség spektrumát ábrázoltuk. Egyszerűen fogalmazva: az itt látható értékeket a frekvencia gyökével – 100 Hz-nél például 10-zel – szorozva kapjuk a hétköznapi értelemben vett érzékenységet.



a Fabry-Perot-tárolókból kilépő fény azon részét, amit – az egyébként a fény kettéosztására szolgáló – félígáteresztő tükör most nem a fotodetektor felé juttatna, visszaküldje az interferométerbe.

Technikai nehézség a megfelelő erősségű lézer létrehozása, a több km hosszúságú karok vákuumrendszerbe helyezése, a próbatömegként funkcionáló tükrök szeizmikusan izolált felfüggesztése és sok más, nagyon fontos részlet. A LIGO detektorokat létrehozó konzorcium a '90-es években arra vállalkozott, hogy a berendezés elkészülte után, 2000 és 2010 között – mintegy 10 év alatt folyamatosan finomítva a mérőeszközt – elérje azt az érzékenységet, amely az adott technikával elméletileg lehetséges volt. Az előző évtizedben tehát az volt a fontos tudományos eredmény, hogy az érzékenységi görbe a folyamatos finomítások során úgy javult, ahogy azt előre meg lehetett jósolni. 2007-ben – és azóta is – a LIGO pontosan tartotta az eredetileg megígért tempót. Csoportunk 2007-ben csatlakozott a LIGO Tudományos Együttműködéshez. Az ekkor zajló egy évnyi adatgyűjtés során (ez volt az ötödik hosszabb adatgyűjtő időszak, a *Science Run 5*, ezért S5-nek nevezik ezt) annak valószínűsége, hogy akár egyetlen gravitációshullám-jelenség nyoma megtalálható lett volna az adatok között mindössze 10 százaléknál volt.

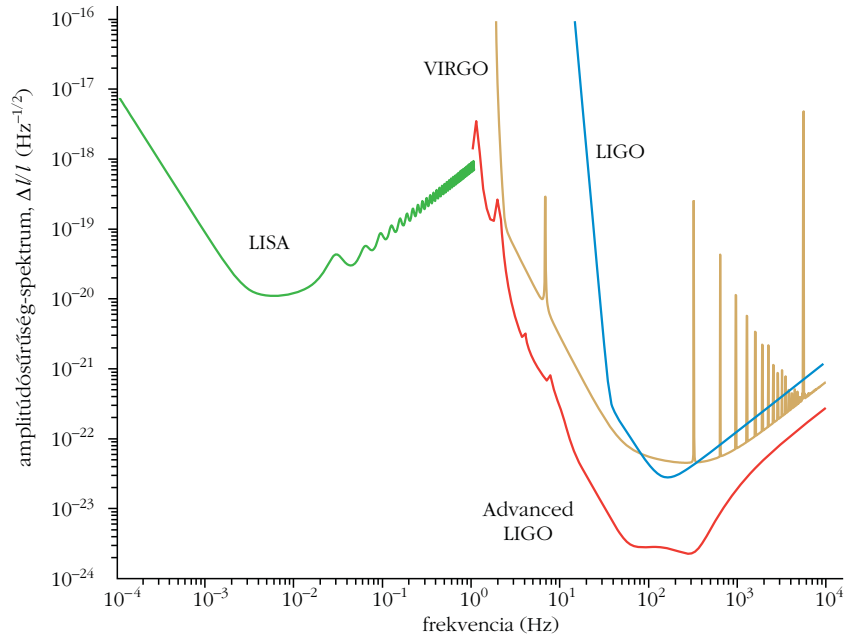
A LIGO 2012–2015 között lényeges átépítésen esett át, az ezután üzembe álló berendezés lett az, amit ma „advanced LIGO”-nak (aLIGO) titulálunk. Ennek potenciális érzékenysége 10-szer akkora, mint az eredeti LIGO-é volt, de ezt az érzékenységet csak 2-3 év finomhangolás után fogja elérni. Az aLIGO 2015 szeptemberében kezdte meg az első adatgyűjtő kampányát (ennek jele O1), ami 2016 januárjában ért véget. Ezalatt az aLIGO körülbelül 3-szor volt érzékenyebb, mint korábbi változata, van tehát még mit hangolni a berendezéseken.

Hogy megértsük, mi befolyásolja a detektor érzékenységét, a 7. ábrán illusztráltuk az ezt jellemző görbét. A görbe a LIGO detektorok érzékenységi görbéje, az átépítés előtti utolsó (S6), és a most végetért, az átépítés utáni első (O1) mérési időszakban. Az ábrán látható érzékeny-

ségi görbék 3 szakasza különíthető el. A *bal oldalon* a növekvő frekvencia függvényében erősen csökken a függvény értéke, majd a görbe megtörik és jön az ugyancsak csökkenő, de sokkal laposabb *középső* szakasz. Ezután a *jobb oldalon* a görbe emelkedik (az érzékenység ismét csökken). Látható, hogy a detektor a 100–200 Hz tartományban a legérzékenyebb. A most említett 3 szakaszban a következő fizikai effektusok határozzák az érzékenységet: a bal oldalon a szeizmikus rezgések, középen a tükrök felfüggesztéseinek termikus zaja, jobb oldalon, az emelkedő szakaszon pedig a sörétzaj.

A szeizmikus zaj több forrásból származik: földrengésekből, a tenger hullámaiból, sőt ember által okozott rezgésekből is. Az úgynevezett mikro-szeizmikus csúcs a 0,2–0,6 Hz tartományban van, és abból származik, hogy a tenger hullámai folyamatosan ütik a kontinentális talapatot. Ez a nagyobb frekvenciák felé erősen csökkenő zavar. Az ember által létrehozott gerjesztések (például teherautók okozta rezgések) nagyobb frekvencián adnak járulékot, sőt valódi, kismértékű, gyakran jelentkező földrengések is előfordulhatnak magasabb frekvenciákon. Mivel a próbatömegek ingákon lógnak, azok a sajátfrekvenciájuk feletti rezgéseket levágják. A LIGO esetén ez a levágási frekvencia 1,7 Hz-nél van, ezért ennél magasabb frekvenciákon a LIGO-t a szeizmikus rezgések már kevésbé zavarják, 10 Hz fölött már érzékenyen lehet mérni. Ennél alacsonyabb frekvenciákon viszont ez a zajforrás lehetetlenné teszi, hogy a Föld felszínén elhelyezett detektorok jól mérjenek. Mint az az (5)-ből látszik, ez egyúttal azt is jelenti, hogy kisebb tömegű források által keltett hullámok figyelhetők meg ilyen detektorokkal, a nagyobb tömegű objektumok jelét észlelni csak az űrben van esélyünk. Az aLIGO a passzív izoláció javításával (többlépcsős inga) és aktív izoláció bevezetésével ezen a szakaszon egy nagyságrenddel tudta, illetve a közeljövőben fogja tudni növelni a földi műszer érzékenységét.

A 7. ábrán a középső szakaszban az érzékenységi határ a próbatömegek felfüggesztéseinek rezgéseiből származik. Nem a próbatömeg mint inga sajátfrekvenciája, hanem a felfüggesztő vékony szál „pengése” (angolul *violin mode*) jelenti a problémát. A szál hossza (az inga mérete, amelynek a vákuumrendszerben el kell férnie), a próbatömeg mérete és a szál anyaga határozza meg a frekvencia növekedésével láthatóan csökkenő, de el nem tűnő problémát. Az aLIGO esetén a szál anyagának megváltoztatásával – üvegszálból van a felfüggesztés – tudtuk elérni azt,



8. ábra. Ezen az ábrán az eredeti LIGO, a jelenlegi aLIGO érzékenysége hasonlítható össze. Ugyancsak feltüntettük az eredeti VIRGO (földi) és a LISA (űrobszervatórium) érzékenységi görbéit is. Az eredeti LIGO és az eredeti VIRGO hasonló érzékenységek voltak, ehhez képest az aLIGO jelentősen javít. Az advanced VIRGO is hasonlóan jó eredményre lesz képes a közeljövőben. A LISA méretéből következően jelentősen alacsonyabb frekvenciatartományban lesz (nem annyira nagyon) érzékeny, és így természetesen más fizikai jelenségek által keltett, hosszabb hullámhosszú gravitációs hullámokat fog majd detektálni. A függőleges tengelyen itt is az amplitúdósűrűség spektrumát ábrázoltuk.

hogy csak közvetlenül a sajátfrekvencia szűk környezetében legyen érezhető ez a hatás, és jelentősebb frekvenciatartományt ne befolyásoljon.

Az érzékenységi görbe jobb oldalán, a folyamatosan növekvő értékek (amelyek alacsonyabb érzékenységnek felelnek meg) a lézer sörétzajából származnak. A lézerfény nyomása a fény kvantumtermészete folytán fluktuál, és ez *rezgeti* a fényt visszaverő tükröket. A sörétzaj a frekvenciával emelkedik, ezért ennek megfelelően az érzékenység emiatt a magasabb frekvenciák felé csökken. Az aLIGO a lézer teljesítményének növelésével tudja elérni, hogy a fajlagos sörétzaj csökkenjen, és ezzel az érzékenység ebben a tartományban növekedjen. A 8. ábrán látható az aLIGO tervezett érzékenysége (és a LISA érzékenységi görbéje is, lásd később).

Amint az (4)-ből látszik, a gravitációs hullám erőssége a forrás távolságával fordított arányban csökken. Ez azt jelenti, hogy a detektor érzékenysége meghatározza azt a távolságot, amelyből az adott forrás jelét detektálni képes a berendezés. Az érzékenység helyett használhatunk távolság jellegű mennyiséget is annak leírására, hogy a műszer mire képes. Ha (4)-be naptömeget helyettesítünk, és kiszámítjuk például, hogy összeolvadó, naptömegű fekete lyukak és/vagy neutroncsillagok milyen jelet keltenek (ilyet talált most az aLIGO), akkor az érzékenység ismeretében azt állíthatjuk, hogy az eredeti LIGO körülbelül 20 Mpc távolságból volt képes ilyen jelet észlelni. Az aLIGO érzékenysége tízszeres lesz, ezért a befogott térfogat *három* nagyságrenddel nő majd. Jelenlegi

számításaink szerint akár heti rendszerességgel detektálhat majd jeleket. Az aLIGO jelenlegi érzékenysége mellett a felfedezés során észlelt nehezebb, körülbelül 30 naptömegű feketelyukpáros jelét, amely nagyságrendileg 100 Hz-es frekvenciájú, még jóval távolabbról is látta volna, mint azok tényleges, körülbelül 400 Mpc-es távolsága. Ezért volt a jel „erős”, azaz jel/zaj hányadosa 24 körüli.

Természetesen szükséges az űrbeli detektorok fejlesztése és telepítése is. Nem azért, mert ott jobb körülmények között, kisebb háttérzajjal lehet majd mérni, hanem azért, mert az ott elhelyezhető sokkal nagyobb detektorok méretükből következően teljesen más fizikai jelenségekhez tartozó hullámokat lesznek

képesek érzékelni. Asztrofizikai, kozmológiai szempontból nagyon fontos az Univerzum fejlődése során tapasztalható galaxis-összeolvadásokkal együtt járó szupernehéz fekete lyukak összeolvadásának gravitációshullám-nyomát detektálni. Ismét utalunk rá, az (5) képlet azt sugallja, hogy egy 10^6 – $10^8 M_{\odot}$ tömegű feketelyukpáros összeolvadásakor olyan alacsony frekvenciájú, hatalmas hullámhosszú jel keletkezik, amely csak több millió km hosszúságú detektorkarokkal lesz észlelhető. A szerző bízik abban, hogy a most történt felfedezés lökést ad az űrbeli eszközök fejlesztésének, és – elsősorban – a LISA rendszer finanszírozásában az ESA mellett a NASA is részt vesz majd, így az talán már a jövő évtized vége előtt repülhet.

A LÉZERSZEMCSE ÉS MÉRÉSTECHNIKAI ALKALMAZÁSAI

Gombkötő Balázs, Kornis János
BME Fizika Tanszék

Mi a lézerszemcse?

Amikor az 1960-as évek elején megszületett az első folytonos üzemű lézer, rögtön nyilvánvalóvá vált, hogy alkalmazása során számolni kell egy addig kevésbé fontosnak gondolt jelenséggel, az úgynevezett lézerszemcsével (angolul speckle pattern). Ha ugyanis a kitágított lézernyaláb érdes felületről szóródik vissza (például papírlap, diszperz vagy matt festék, *1.a ábra*), vagy ködön, füstön, illetve opálüvegszerű anyagon halad át, akkor az ernyőn felfogott nyaláb intenzitása a *2.a ábrán* láthatóhoz hasonló „szemcsézettséget”, véletlenszerű ingadozásokat mutat. Ha szabad szemmel nézünk egy kitágított lézernyalábbal megvi-

lágított érdes felületet (*1.b ábra*), akkor az a *2.b ábrához* hasonlóan szintén szemcsés lesz. Ha a megfigyelő/ernyő, a fényszóró objektum vagy a megvilágítása picit elmozdul (vagy elfordul, deformálódik stb.), a szemcsékép megváltozik: a sötét szemcsék világos-

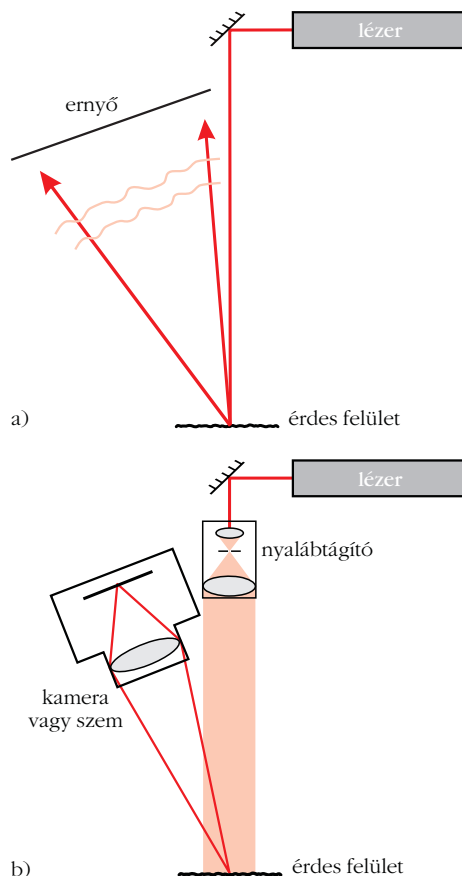


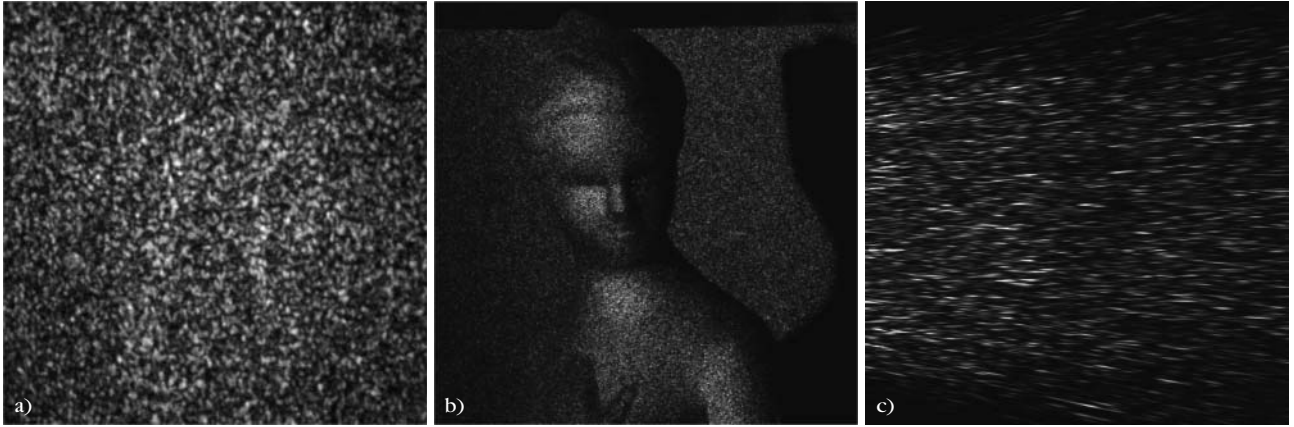
Gombkötő Balázs 2001-ben végzett a BME mérnök-fizikus szakán optika szakirányon, majd 2004-ben PhD fokozatot szerzett fizikából. Kutatási területei a koherens optikai mérés technika, azon belül a fázisvisszaállítás, digitális holográfia, szemcsékép-mérés technikák, holografikus adattárolás. További érdeklődési körei a holográfia, optikai örvények és az ultrahangos távolságmérés.



Kornis János villamosmérnökként végzett a Budapesti Műszaki Egyetemen 1984-ben. Jelenleg docensként dolgozik a BME Fizika Tanszékén, az Optikai Mérés Technikai Csoport vezetője. Kutatási területei: holografikus és szemcsékép-mérés technika, számítógépes képfeldolgozás, digitális jelfeldolgozás.

1. ábra. Objektív és szubjektív szemcsékép létrejötte.





2. ábra. a) Ernyőn felfogott objektív szemcsékép b) lézerszemcsés fénykép c) szemcsék terjedési irányú metszeti képe.

sá válhatnak és viszont, illetve a szemcsék elmozdulhatnak, azonban ezek a változások sokszor teljesen szabálytalanok tűnnek. Megfigyelhető továbbá, hogy a sötét és világos szemcsék alakja szabálytalan, vannak köztük kisebbek és nagyobbak, azonban mégis van egy átlagos méretük, amely változtatható.

Ha például szemünk elé kisebb kerek nyílást helyezünk – vagy hunyorítunk – az átlagos szemcseméret nagyobb lesz. Az 1. b ábra szerinti esetben is úgy gondolhatnánk, hogy ha nem az érdes felületre fókuszálunk szemünkkel, akkor a szemcsékép is elmosódik, azonban ez nem így van: a lézerszemcsék minden esetben ugyanolyan kontrasztosak maradnak! További megfigyelések szerint egyrészt a szemcsék kontrasztja inkább attól függ, hogy mennyire érdes egy felület: minél simább annál kisebb a kontraszt. Tükörsima felület esetén a szemcsézettség el is tűnhet. Másrészt hasonlót tapasztalunk részlegesen koherens fényben (például a csillagászatban, vagy egyetlen színekvonalú fényben), míg fehér fényben már egyáltalán nem is látható szemcsékép; ez felel meg a nulla szemcsékontrasztnak.

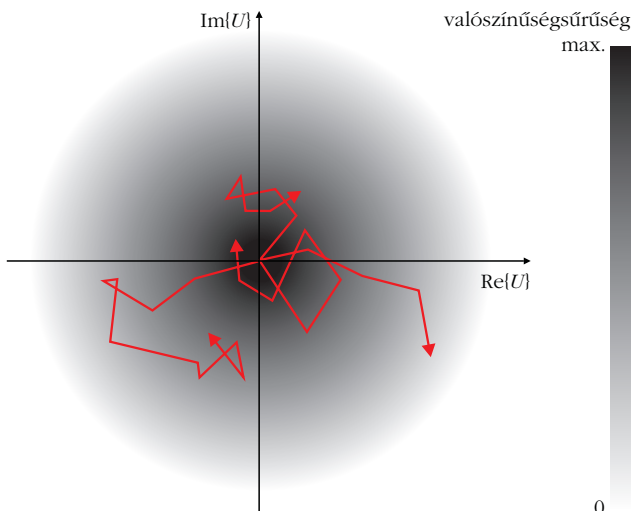
A fentiek alapján látható, hogy a szemcsékép létrejöttéhez sok tényező járul hozzá, így a fény koheren-

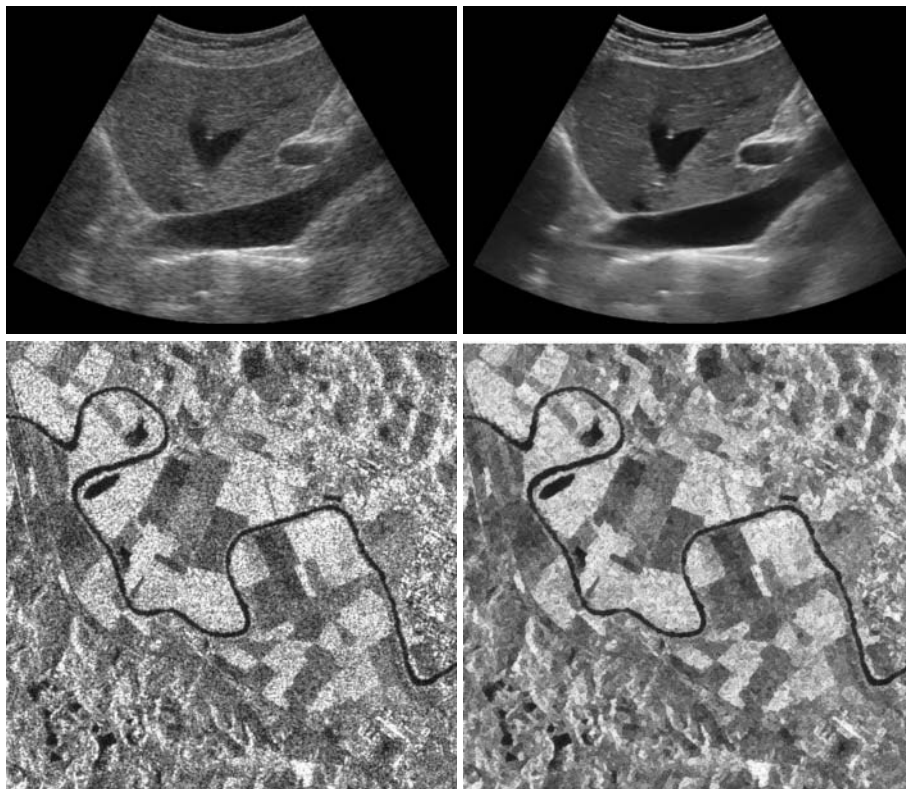
ciájának mértéke, a szóró objektumhoz tartozó véletlenszerűségek mértéke, a résztvevők geometriai elhelyezkedése és akár a megfigyelő leképező rendszerének apertúrája. A leginkább szabályos, matematikailag legegyszerűbben jellemezhető szemcsékép akkor jön létre, ha a fény tökéletesen koherens, és a szóró objektum minden pontja egymástól függetlenül a 0 és 2π között egyenletes fázistolást ad járulékul az interferenciához. Reflexiók esetében ehhez elég, ha a felület érdessége eléri vagy meghaladja a fény hullámhosszát, transzmissziós esetben pedig elegendő mértékű inhomogenitásra, esetleg szintén érdes be- és kilépő felületre van szükség. Ilyenkor a szemcséképet teljesen, a többi esetben pedig részlegesen kifejletnek nevezzük.

A lézerszemcsék tulajdonságai

Az itt nem részletezett levezetések alapján az alábbi tulajdonságok jellemzik a kifejlett lézerszemcséket. A különböző világosságú pontok előfordulásának gyakorisága nem azonos, hanem jól meghatározott (negatív exponenciális eloszlás): a leggyakoribb a sötét pont, a legritkább pedig a világos pont. A fényhullám fázisa pedig tetszőleges pontban teljesen véletlenszerű, egyenletesen vesz fel minden értéket. Ezek a tulajdonságok egyszerűen beláthatók az [1] irodalomban található módon (a központi határeloszlás tétel segítségével). Ennél sokkal szemléletesebb leírást ad a 3. ábrán is látható „ténfergő részeg” modellje, aki, ha korlátos, de véletlen hosszú és véletlenszerű irányú lépésekből sokat megtesz, bármelyik irányba egyenlő eséllyel juthat el, de messzebbre csak exponenciálisan csökkenő valószínűséggel, így szinte kár is elindulnia. Ha minden egyes pontforrást a szóró objektumon/-ban egy lépéssel azonosítunk, akkor a részeg eredő elmozdulása az eredő hullámtérnek felel meg. A valóságban létrejövő és detektálható szemcséképek eloszlása néha eltér ettől az ideálistól, akár már önmagában egy kamera véges pixelmérete miatt is. Részlegesen kifejlett szemcsék esetén az tapasztalható, hogy amiképp a kontraszt csökken, úgy csökken a sötét pontok gyakorisága is.

3. ábra. A fény eredő U amplitúdójának eloszlása a komplex számsíkon a ténfergő részeg modellje szerint.





4. ábra. Ultrahang és SAR radar képek szemcsezajjal és megszürvé (forrás: Google képkereső).

szaoosztva akár a tárgysíkon is értelmezhetjük, és ott is tekinthetünk egy látszólagos szemcseméretet.

Történet és hasonló jelenségek

Amint az eddigiekből látható, részlegesen kifejlett szemcséket vagy hasonló diffrakciókorlátos képzajokat már a lézer feltalálása előtt is észlelhettek, és észleltek is. Az első, csillagászathoz köthető észlelés már *Isaac Newton* idejéből való. Ez annak köszönhető, hogy a távoli csillagok fénye térben eléggé koherens, így a pislákoláson kívül a légkörön szóródva képe szemcsessé válhat. Úgynevezett *Quêtelet*-sávok láthatók, ha kissé poros tükörben olyan fényforrást nézünk, amely közel van a szemünkhöz. Ha a fényforrás egy színű LED, akkor a világos

A szemcsék átlagos méretét több szempontból is meg kell különböztetni. Amikor a lézerfény a szóró objektumtól az ernyőig akadálytalanul terjed az *1.a ábra* szerint, vagy az ernyőt egy csupas, objektív nélküli kamerával helyettesítjük, akkor a rajta létrejött mintázatot objektív szemcsképnek nevezzük. Ekkor az ernyőn vagy a kamerán látott szemcseméret jó közelítéssel $\lambda z/L$, ahol λ a hullámhossz, L a szóró térfogat vagy felület keresztirányú mérete az ernyő felől nézve, z pedig az attól vett távolság az ernyőig. Látható tehát, hogy ha adott méretű lézerfényfolttal világítunk meg egy érdes felületet, akkor annak közelében kicsi, attól távolabb nagyobb átlagos szemcseméretet figyelhetünk meg. Kör alakú folt esetén egy 1,22-es szorzó is megjelenik, ekkor ez a méret megegyezik az azonos geometriához tartozó *Airy*-korong méretével, így a szemcséket egy diffrakciókorlátos zajnak is felfoghatjuk. Az ernyőt előre hátra mozgatva az is megfigyelhető, hogy a szemcsék egy átlagos hosszirányú mérettel is rendelkeznek (lásd a *2.c ábrán*), ami után például egy világos szemcse elsötétül. Ez az átlaghossz körülbelül $15\lambda(z/L)^2$, így nagyobb távolságban egy átlagos szemcse térbeli alakja elnyújtott, „szivarszerű”.

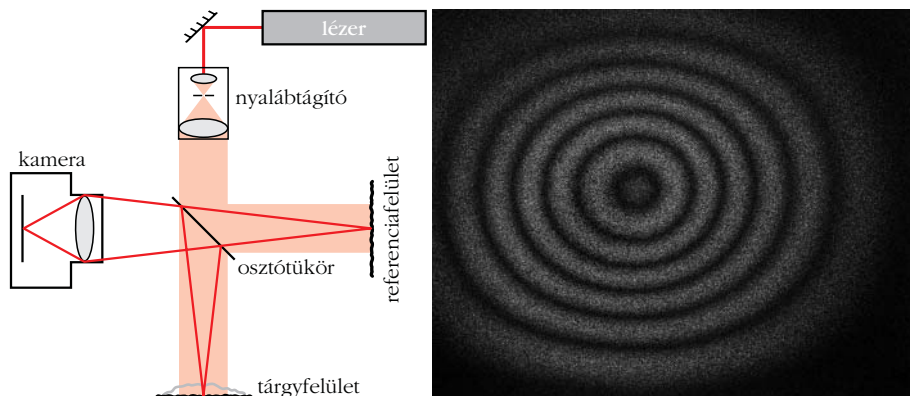
Az *1.b ábra* szerinti másik jellemző esetben, amikor egy megvilágított nagyobb felületet optikai rendszerrel képezünk le, szubjektív szemcséket kapunk. Ekkor a rendszer apertúrája – amely tehát a megfigyelő saját paramétere, innen a szubjektív név – önmagában meghatározza a diffrakciós korlátot, így az érzékelően kialakuló szemcsék átlagos méretét. Azonban ezt a méretet a leképezés nagyításával visz-

sávokban részleges szemcskép is felfedezhető. 1877-ben *Karl Exner* osztrák fizikus radiális szemcséket észlelt egy diffrakciós kép középső világos területén, és hasonlókkal találkozott *Max von Laue* is 1914-ben időben részben koherens fényben.

Az optikán kívül is megfigyelhetők szemcsképek: mivel mind az orvosi diagnosztikában használt ultrahang vagy keményröntgen-sugárzás, mind a rádió- vagy mikrohullámok lehetnek nagyon koherensek, így ezek a képalkotó eljárások is érintettek ezzel a típusú képzajjal. A *4. ábrán* egy-egy példa látható ultrahang és műholdas szintetikus apertúrájú radarképek szemcsezajára zajsűrés előtt és után. A rádiócsillagászatban a turbulens csillagközi plazmán áthaladó jelekben észlelhetők szemcsezaj miatt fellépő ingadozások. Elektron szóródása amorf szénfilmen szintén szemcsezajt okoz a detektálásnál.

A szemcsezaj kiszűrése vagy létrejöttének elkerülése nem egyszerű feladat, az optikai csillagászatban ráadásul a hosszú expozíciós idők alatti légköri ingadozások miatt a zaj állandóan változik, így a végső képen több véletlenszerű szemcsezaj átlagódik ki, és a kép élességét az optikai rendszer diffrakciós határához képest sokszorosán elrontja. Ez különösen a kettőscsillagok képének megfelelő felbontását nehezíti meg, azonban fényesebb kettőscsillagok esetén igen szellemes módon kiküszöbölhetők a szemcsék, és kihasználható az a tulajdonságuk, hogy diffrakciókorlátosak, azaz a teleszkóp felbontási határán vannak. Az amerikai *David L. Fried* 1966-os módszere szerint, ha sikerül megfelelő minőségben rövid expozíciós idejű felvételeket készíteni, akkor ezeken a légkör állapota

„befagy”, tehát a két csillag fényéből két kissé eltolt, de szinte azonos szemcskép összege áll elő minden képen. Egy-egy kép Fourier-transzformáltján éppen ezért interferenciacsíkok jelennek meg, még ha zajosan is. Ezeket a csíkokat intenzitásban összegezve (tehát innentől nemlineáris a képfeldolgozás, és az összegzés nem azonos a hosszú expozíciós idejű esettel) egy sokkal jobb minőségű csíkkendszer áll elő, amelyet inverz Fourier-transzformálva



5. ábra. ESPI elrendezés és egy vele nyerhető csíkkendszer közepén terhelt és szélein befogott négyzet alakú lemez esetén.

már előáll a kettőscsillag felbontott képe (mint az eredeti szemcsés képek átlagolt autokorrelációs függvénye). Ezt a képfeldolgozási módszert laboratóriumban is lehet demonstrálni lámpával, két közeli helyen kilyukasztott fekete kartonlappal, poros üveggel/plexivel és digitális fényképezőgéppel.

Alkalmazások

Az eddigi példákban a szemcsképet főleg zajnak tekintettük, azonban ha belegondolunk, egy szemcskép véletlenszerűsége egyediséget is jelent, ennek forrása pedig a szóró objektum, illetve annak konkrét mikrostruktúrája. Ennek köszönhetően a szemcsképre információhordozóként is tekinthetünk, és segítségével mérések is végezhetők. A legkézenfekvőbb lehetőség a hullámhossznál kisebb felületi érdesség mérése a szemcskép kontrasztja alapján, például fogzománc esetén. Sok más alkalmazás azon alapul, hogy szubjektív szemcsképnél az éles vagy kissé életlen leképezés a tárgy felületének pontjait összerendeli a kamera képének különböző részeivel, így a felület alakváltozása szabályos változásokat okoz a szemcsképen.

Az elektronikus szemcskép fényképezés – amely az 1. b ábra elrendezését követi – a szemcsék szabályos elmozdulását térképezi fel egy képpáron, amelyek a vizsgált tárgy két állapotában készültek, és ebből az elmozdulás-, elfordulás- vagy deformációértékek visszaszámolhatóak. Hasonló számítási módszert alkalmaznak az optikai, különösen a lézeres egerekben, de egy szemvizsgálati módszer is a szemcsék mozgásain alapul. Ha szabad szemmel nézünk egy lézerral megvilágított deformálható kerek membránt, akkor attól függően, hogy a szemlencse a felületre, illetve a felület mögé vagy elé fókuszál, a membrán

deformációjakor vagy nem látunk szemcsemozgást (legfeljebb helyben „zizegnek”), vagy a fókuszhiba előjelétől függő irányú radiális szemcsemozgást észlelünk. Ez a módszer nagyon érzékeny már a kisebb fénytörési látáshibákra is.

Az elektronikus szemcsekorrelációs interferometria (ESPI vagy TV holográfia) azt használja ki, hogy éles leképezés esetén a szubjektív szemcsék bár nem mozognak, de a fázisuk (sötét-világos szemcsé) változik a tárgy kis alakváltozásakor. Ehhez a módszerhez interferométert kell építeni (5. ábra), amelynek mind a tárgy-, mind a referenciaágában diffúz nyalábok haladnak és találkoznak a kamerán. Ennek köszönhetően ez a módszer interferometrikus érzékenységgű, így más interferometrikus módszerekhez hasonlóan roncsolás- és érintésmentes vizsgálatokat tesz lehetővé. Legfőbb vonzereje, hogy a mért mennyiséget jellemző csíkkendszer előállításához a vizsgált tárgy két állapotához tartozó interferenciakép abszolút értékben vett különbségét kell képezni. Így a 4. ábrán láthatóhoz hasonló szemcsés képet kapunk, amelynek további feldolgozása már azonos a más módon készült interferogramokéval.

Összességében tehát elmondható, hogy a szemcsézett képek az elektromágneses és más hullámokkal kapcsolatban számos alkalmazási területen megjelennek, akár mint káros, akár mint hasznosítható jelenségek. Mivel jelen írás csak rövid betekintést kívánt nyújtani a témába, a részletek iránt is érdeklődő olvasók számára két szakkönyvet is ajánlunk, valamint egy korábbi hallgatói mérési leírást [1–3].

Irodalom

1. J. C. Dainty (szerk.): *Laser speckle and related phenomena*. Springer-Verlag, 1975.
2. K. J. Gásvik: *Optical metrology*. 3. kiadás, Wiley, 2002.
3. <http://mf2002.uw.hu/anyagok/szemcskep.pdf>

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacím: elft@elft.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 Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szatmáry Attila ügyvezető igazgató.

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

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

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

INSPIRÁCIÓ A TUDOMÁNYBAN

Gondolatok *Ernst Mach* halálának centenáriuma alkalmából

Radnai Gyula
ELTE Fizikai Intézet

A százéves évforduló mindig jó alkalom a megemlékezésre.

Száz évvel ezelőtt, 1916-ban jelent meg először az *Annalen der Physik* folyóiratban, azután könyv formában is *Az általános relativitáselmélet alapjai*, ez volt *Albert Einstein* első könyve [1]. Fél évszázaddal később jelent meg magyarul *A speciális és általános relativitás elmélete* *Novobátzky Károly* jegyzetével, *Maróti Lajos* szerkesztésében, a Gondolat kiadó gondozásában. Maróti Lajos egy hosszabb tanulmányt is fűzött hozzá, amelyben többek között Einstein világszemléletével kapcsolatban ezt írta [2]:

„Az einsteini pályakezdetés éveiben a tizenkilencedik és a huszadik század mezsgyéjén rendkívül befolyásoló szerepet játszott Ernst Mach (1. ábra), a századforduló évtizedeinek fizikus-filozófusa, és az ő égisze alatt virágzó pozitivisták iskola... Mach szerint, – aki a megismerésben csak a közvetlen empiriának enged szerepet – a világ érzetek komplexuma, s a tér illetőleg idő sem más: érzet-sorok rendszere. Nem vitás – s ezt maga Einstein se mulasztotta el hangsúlyozni – Mach nézetei mély hatást gyakoroltak az einsteini gondolatvilág kezdeti fejlődésére. Elsősorban Mach szkepticismusa és a meggyökeresedett, dogmatizált fogalmakkal szemben táplált kritikai hajlandósága. Így nem meglepő, hogy e hatás nyomain szembeötlőek, olykor filológiai módszerekkel kimutatható módon is, egy-egy einsteini megfogalmazásban, fogalomalkotásban, különösen a korai években...”

A Mach halálának 50. évfordulóján tartott nemzetközi szeminárium előadásait később könyvben is kiadták [3], amelyben *Patkós András* egy érdekes magyar vonatkozást fedezett fel, erről később részlete-

sebben is szó lesz. Most csak *Patkós András* cikkének bevezető sorait idézzük [4]: „Ernst Mach (1838–1916) osztrák–cseh fizikus oktatói módszertanából, kutatói eredményeiből alakította ki pozitivisták világképét, amely nagy hatással volt századunk sok nagy fizikusára és amelyet a dialektikus materializmus képviselői súlyának megfelelő részletes kritikával illettek.” Ernst Mach egyáltalán nem tartotta magát filozófusnak, azonban a tudományról általa is megfogalmazott nézetek, a tapasztalás elsődlegességébe, sőt, kizárólagosságába vetett hit a 19. század végén és a 20. században sok gondolkodót ragadott magával Európában. Mach filozófiai nézetrendszerét *Lenin* nevezte el empiriokriticizmusnak, illetve machizmusnak.

Idén van Mach halálának 100. évfordulója.

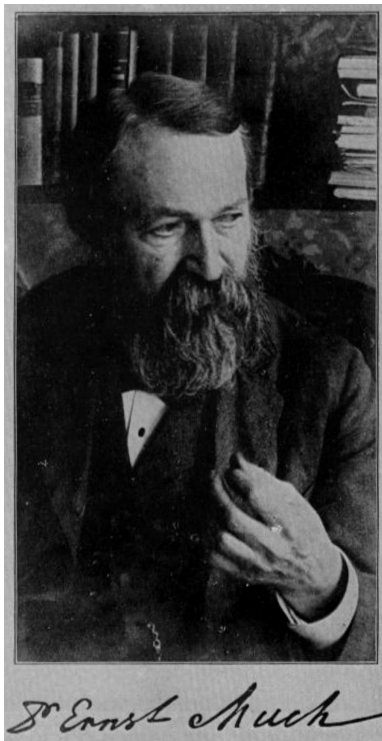
A História Tudósnapárban ezt olvashatjuk róla [5]:

„Mach, Ernst – Chirlitz-Turas, Morvaország (ma Brno része, Csehország), 1838. febr. 18. – Vaterstetten (Haar mellett), Németország, 1916. febr. 19. Morva születésű osztrák fizikus, filozófus.

Tanárgyerek volt, szülei 15 éves koráig nem járaták nyilvános iskolába. A Bécsi Egyetemen matematikát, fizikát és filozófiát hallgatott és már 22 évesen doktorált fizikából.

Bécsben, majd Grazban az optikai és a hangtani Doppler-effektust kutatta. Sikerral pályázta meg 1867-ben a prágai német egyetem kísérleti fizika tanszékét, amelyet azután 28 éven át nem is hagyott el. Fő kutatási területe az érzékelés vizsgálata volt, ezt fokozatosan szélesítette ki pszichofiziológiai irányban. A fenomenológiai kutatás híve volt, amit filozófiailag is igyekezett alátámasztani. Filozófiája nagy hatással volt kora tudósaira, többek között Einsteinre is. Érdekes módon egy magyar fizikatanár, *Antolik Károly* kísérletei terelték figyelmét a hangrobbanások és általában a hangsebességnél gyorsabban repülő testek mozgásának vizsgálatára. Itt elért eredményei nyomán nevét a Mach-szám őrzi a repülés gyakorlati szakemberei körében, míg az érzékeléstudomány művelői a Mach-sávok felismerésének tudósát tisztelik benne. Eredményeit többek között *Békésy György* alkalmazta kutatásaiban.”

Az alábbiakban erről a két magyar vonatkozásról fogunk részletesebben is megemlékezni.



1. ábra. Ernst Mach (1838–1916)



Radnai Gyula ny. egyetemi docens, a fizikai tudományok kandidátusa, matematika-fizika tanári szakon végzett 1962-ben. Az ELTE Kísérleti Fizika tanszékén kapcsolódott be a tanárképzésbe, a fizika hazai kultúrtörténetének kutatásába pedig *Simonyi Károly* ösztönzésére fogott a '70-es években. *Physics in Budapest* című – *Kunfalvi Rezsővel* közös – könyve, valamint a *Fizikai Szemlében* és a *Természet Világában* megjelent számos, ma már az interneten is elérhető publikációja hitelesíti ezt a tevékenységét.

Középiskolai tanár felfedezése inspirálhatja a kutató tudóst

Patkós András már említett cikkében [4] írta Machról: „Nevét a fizikai eredeti eredmények tárában a gázdinamika tárgyköre őrzi, ahol a modern aerodinamika jónéhány alapjelenségére elsőként figyelt fel.” – majd így folytatta: „Kutatói tevékenysége és világnézete kapcsolatának közvetlenségén gondolkodva lapoztam bele a halála 50. évfordulóján tartott szeminárium előadásait tartalmazó kötetbe [3], amikor *W. F. Merz-kirchnek*, a freiburgi Mach-intézet igazgatójának tanulmányában (*Mach's contribution to the development of gas dynamics*) egy számomra eddig ismeretlen adalékra bukkantam a múlt század második felének magyarországi fizikaoktatására (pontosabban oktatóira) vonatkozóan.”

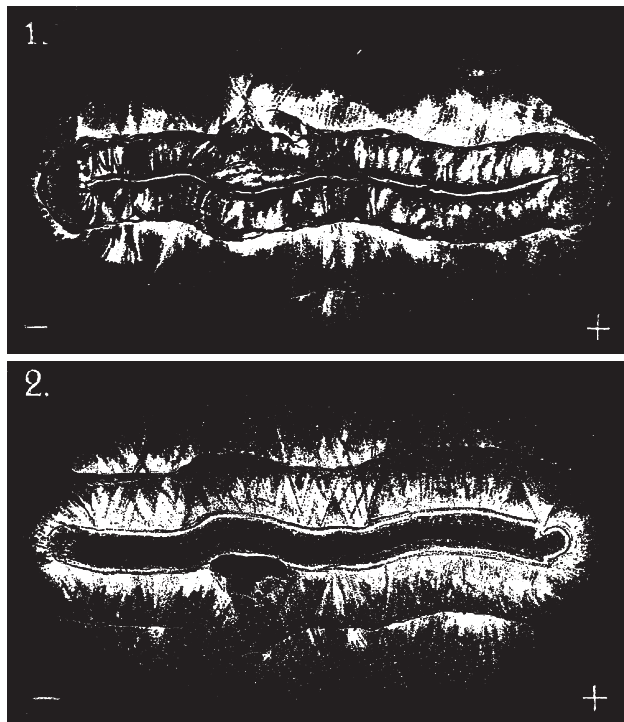
Nos, kezd a dolog izgalmassá válni. „Mach 1867-től a prágai egyetem professzora. Már bécsi diákéveiben erősen hatnak rá az ottani magas színvonalú fiziológiai, biofizikai kutatások. Ő maga is főként ezek iránt érdeklődik és Prágában fiziológiai-akusztikai vizsgálatokat végez. Gyenge kisülésekkel keltenek hanghullámokat és ezek hatását tanulmányozzák. Asszisztense, *Čeněk Dvořák* hívja fel figyelmét Karl Antolik közleményére a *Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie* folyóirat 1875. évi 154. kötetében [6], amely a szerzőnek egy, a 151. kötetben megjelent publikációját folytatja az »elektromos szikrakisülések során létrejövő akusztikus jelenségekről«. Merzkirch véleménye szerint ez a közlemény inspirálta Machot az 1875. és 1885. között a prágai egyetem fizikai laboratóriumában folytatott mérésorozatának megkezdésére, amelynek eredményeként lényeges megállapításokat tett a levegőben terjedő lökéshullámok természetéről és felfedezte a Mach-effektust, a lökéshullámok visszaverődésének anomális törvényszerűségét.”

Lehet, hogy egy középiskolai fizikatanár inspirálta a kutató tudóst a felfedezésében? Patkós András se állta meg, hogy utánanézzem a cikknek. „Antolik cikkét fel lapozva a szerző neve alatt a Professor der Realschule, Kaschau, Ungarn megjelölést találjuk. A cikk stílusa csevegő-leíró jellegű, amely elüt akár a közvetlen szomszédságában található közleményekétől is. Valószínűleg szabad óráiban a kor egyik legizgalmasabb fizikai jelenségkörét vizsgáló tanár munkája, aki elegendő részletességű anyagot gyűjtve össze, azokat rendszeresen a »tanult világ« elé tárja.”

„Vajon ki volt ő?” – tette fel a költői kérdést cikke végén Patkós András.

A feltett kérdésre négy év múlva született meg a válasz a *Fizikai Szemle* hasábjain, *Morovics Miroslav Tibor*, pozsonyi fizikátörténész jóvoltából [7]. Több, mint három évtizede így foglalta össze a szerző Antolik Károly életét:

„Antolik Károly, kísérletező fizikus, az elektromos szikrarajzok és a hártarezgések magyarországi kutatója. 1843. január 28-án született a szepesmegyei Kolbachon. (A falu mai neve Studenec – a Spisská Nová

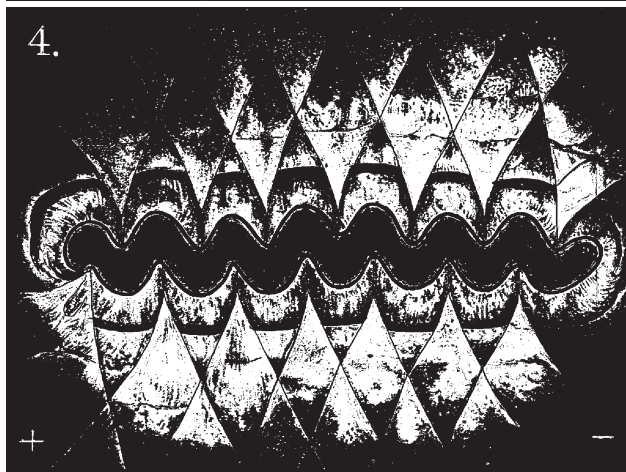
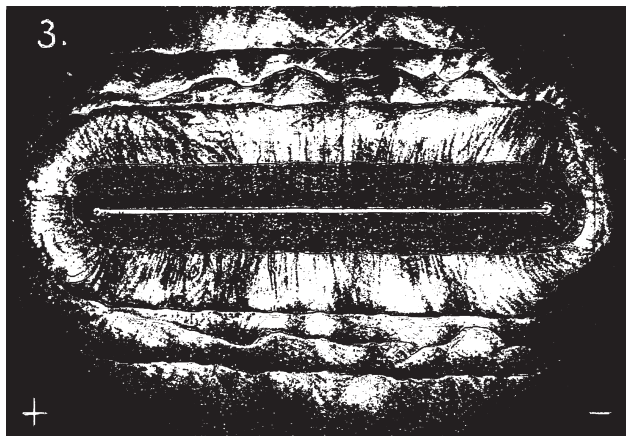


2. ábra. „Befedési módszerrel” készült ábrapár [6].

Ves-i, azaz iglói járásban található Csehszlovákiában.) Lőcsén, Eperjesen és Nagyváradon végezte középiskolai tanulmányait, majd ezeket a pesti egyetem követte, ahol fizikából *Jedlik Ányos* (1800–1895), matematikából pedig *Petzval Ottó* (1809–1883) voltak tanárai. Tanári oklevelét 1867-ben szerezte meg és a matematika-fizika mellett tornatanári képesítést is nyert. 1868-tól a kaposvári főgimnázium, majd 1870 és 1874 között a kassai főreáliskola tanára volt. Az 1874–75-ös tanévet Németországban töltötte fél évig *H. Helmholtz* (1821–1894) laboratóriumában dolgozott, majd a heidelbergi egyetemen *R. W. Bunsen* (1811–1899) és *G. H. Quincke* (1834–1924) előadásait hallgatta. Az egyetemi évek és tanárai – mint később látni fogjuk – nagy hatással voltak tudományos tevékenységére. Németországból hazatérve az aradi főgimnáziumhoz került, ahol 1892-ig dolgozott. Ebben az évben nevezték ki a pozsonyi Állami Főreáliskola igazgatójává, s utóbb mint főreáliskolai igazgató halt meg Pozsonyban 1905. június 20-án, 62 éves korában.”

Említett tudományos kísérleteiről pedig a következőket olvashatjuk:

„Legegyszerűbb kísérleteiben a Holtz-féle influenciagép szikrája két, csúcsban végződő ónelektrod között, egy üveglapra ragasztott sima kartonlap bekormozott felületén sikamlott végig. A koromrétegben a szikra rajzolatot hagyott, kimutatva vele a kisülés útját. Meglepő, hogy az így kijelölt út nem egyszerű szerkezetű, hanem három (sőt a szikra erősségétől függően esetleg több) párhuzamos csíkból, barázdákból áll. A legegyszerűbb esetekben két világos barázdá övez egy vékonyabb (néha csak mikroszkóp alatt látható) sötét vonalat. A világos részek a korom lesöprésével, a sötétek pedig annak lepréselésével és beégetésével keletkeznek.”



3. ábra. Az út előzetes kijelölésével készült szikrarajzok [6].

Később úgynevezett „befedési módszerrel” dolgozott, amely az előbbitől csak annyiban különbözik, hogy az eredeti kormozott lemez fölé néhány milliméter távolságban egy másik hasonlót helyezett, ez utóbbinak azonban nem voltak elektródjai. Kísüléskor így egy olyan ábrapár keletkezett, hogy a két kép vonalai nagyjából megegyeztek, csak a fekete-fehér színezésben voltak egymás ellentettjei (2. ábra). Jobban kifejlődött ábrák esetében nemcsak a barázdás szerkezet figyelhető meg, hanem a szikra útjának hajlataiból kiinduló csóvaszerű nyúlványok is. Ernst Mach magyarázata alapján tudjuk, ezek a szikrakísüléskor keletkező lökeshullámok nyomai, és ugyancsak kimutatható, hogy a korom helyenkénti kisöprésével, illetve lemezhez való préselésével és hozzáégésével keletkeznek. Még érdekesebbek és bonyolultabbak azok az ábrák, amelyek a szikraút előzetes kijelölésével jönnek létre. Antolik a két elektród közé egyenes vagy zezugos utat jelölt ki vezető bronz festékkel, hogy az elektromos szikra ezt az utat kövesse (3. ábra). Ezekben az esetekben a lökeshullámok már összetettebb interferenciaábrákat hoznak létre (3., 4. ábrák). Amint arról Patkós András idézett cikkében bővebben beszámolt, Ernst Mach ezekből a koromábrákból indult ki az aerodinamikai Mach-effektus felfedezéséhez vezető kísérletsorozatában.

Antolik nagyon sokféle formában, különböző körülmények között, légritkított térben is megismételte

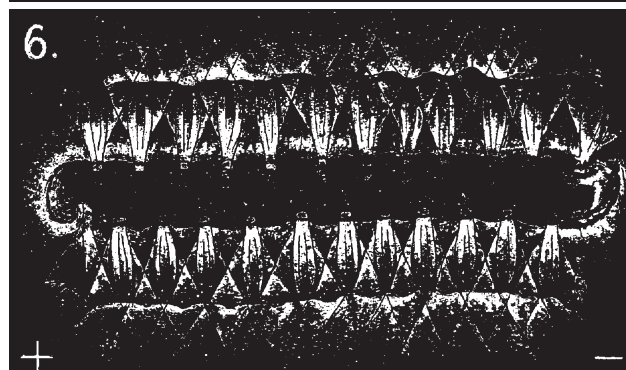
kísérleteit. Mindenáron az elektromos szikra anyagi mibenlétének kérdésére kereste a választ, s így a kísüléskor keletkező légmozgást csak másodlagos hatásként kezelte. Ezért nem kötötték le eléggé figyelmét a Mach által megmagyarázott jelenségek. – Mach már az első Antolik-féle szikrarajzokból kiinduló munkájában felismerte, hogy ezek az Antoliknál mellékjelenségeként kezelt interferenciaábrák kvantitatív jellegű tanulmányozásokra, esetleg mérésekre is alkalmasak – persze akusztikai, illetve aerodinamikai alapon. Érdekes megemlíteni ezzel kapcsolatban Szily Kálmán véleményét Antolik szikraábráiról:

...az így keletkezett idomok... egy új módot szolgáltatnak a villanyosságnak, vagy talán még inkább a levegő mozgásának tanulmányozására. Antolik Károly legfontosabb értekezései a koromábrák témájáról a *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie* című folyóiratban (151, 1874 – 154, 1875 [6]), a kassai főreáliskola értesítőjében (1873–74), valamint a *Természettudományi Közlönyben* (6, 1874) jelentek meg.”

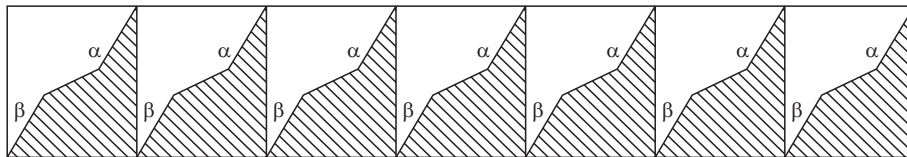
Az igazán értékes kutatás évtizedekkel később is inspiráló lehet

Ernst Mach már egyetemista korában érdeklődött fiziológiai kérdések iránt, egy szemeszter orvosi fiziológiát is hallgatott a bécsi egyetemen. Doktori disszertációját azonban tisztán elektromosságtani témából készítette, és annak sikeres megvédése után bent maradt az egyetemen. *Andreas von Ettingshausen* (1796–1878) lett a főnöke, aki a korán elhunyt *Christian Doppler* (1803–1853) fizikatanszékét örökölte meg Bécsben. Talán

4. ábra. Antolik módszerével létrehozott interferencia-alakzatok [6].



elődje iránt érzett tiszteletből is Ettingshausen a hangtani és a fénytani Doppler-effektus kísérleti tanulmányozását bízta fiatal kollégájára. Mach fáradhatatlan volt a kísérletezésben, miközben fizikából jegyzetet



5. ábra. A Mach-sávok felfedezését segítő minta.

írt orvostanhallgatók számára és anyagilag is jól jövedelmező, tudományos ismeretterjesztő előadásokat tartott az egyetemen. Doppler-effektussal kapcsolatos dolgozatait a bécsi tudományos akadémiához juttatta el. Szűk szakmai körökben ezek a dolgozatok alapozták meg kutatói hírnevét.¹

1864-ben Mach sikeresen pályázott meg egy matematikaprofesszori állást a grazi egyetemen. A természettudományos komplex kutatással azonban itt se hagyott fel: öt cikke jelent meg ezekben az években különböző pszichológiai-fiziológiai témákból. Hangtanban foglalkozott a Helmholtz-féle zeneelmélettel, fénytannal felfedezte az azóta róla elnevezett sávokat. Fizika és fiziológia összeolvadt a tevékenységében, következésképpen a gondolkodásában is. Akkori kutatásainak is jó összefoglalását adta később *Az érzetek elemzése* című könyvében, amely 1886-ban jelent meg először németül, 1897-ben angolul, s végül Erdős Lajos fordításában 1927-ben magyarul [8]. Nem lehet tudni, hogy mikor került ez a könyv az 1961-ben orvosi Nobel-díjjal kitüntetett Békésy György (1899–1972) kezébe, de ha példát keresünk a tudományban arra, hogy egy igazán értékes kutatás évtizedekkel később is inspirálón hat a másik kutatóra, akkor Mach hatása Békésyre a legjobb példa erre.

Az izgalmas történetet most egy Békésy György születésének centenáriuma miatt megjelent cikk alapján idézzük fel [9].

Békésy azt az idegi mechanizmust kutatta, ahogyan a szélesen hömpölygő inger a fülben keskeny ingerletté élesedik. Feltételezte, hogy ez egy olyan mechanizmus, ami nemcsak a fül működésében jelenik meg, hanem más érzékszervekben is. Ezért bővítette ki kutatásait és a Harvard Egyetemen a tapintás, a bőr-érzékelés irányába. Először 1960-ban publikált egy tanulmányt a szemről is.

Honolulu-ban már úgy gondolta, hogy valamennyi érzékszervünk működésének közös vonása az a primer, differenciális jelfeldolgozás, amelynek lényegét az inger-érzet kapcsolatban a laterális (oldalirányú) gátlás mechanizmusára lehet visszavezetni. Olyan jelenségeket keresett tehát, ahol ez valamelyik érzékszerv működésében explicite jelentkezik. Így jutott el a látás vizsgálatához, azon belül a kontrasztjelenségek

tanulmányozásához, és ezek közül is az egyik meglepő, először Ernst Mach által leírt és értelmezett optikai csalódás, a Mach-sávok felléptének körültekintő, tudományos vizsgálatához.

Mik a Mach-sávok?

Az érzetek elemzése című könyvben olvashatjuk *A látási érzeteknek egymásra és más pszichikai elemekre való vonatkozásai* című fejezetben az alábbiakat:

„...az ideghártya valamely helyének megvilágítását a szomszédos helyek megvilágításának középértékétől való eltérés mértéke szerint érezzük meg...” [Példaképpen szerepel az 5. ábra.]

„Ha egy ilyen mintájú papírcsíkot egy hengerre csavarunk és a hengert gyors forgásba hozzuk, szürke mezőt kapunk, amelynek világossága β -tól α felé növekszik, s melyből azonban egy világos $\alpha\alpha$ csík és egy sötét $\beta\beta$ -csík emelkedik ki.”

Nos, ezeket a világos, illetve sötét csíkokat nevezik – azóta, hogy Mach a 19. század 60-as éveiben leírta a jelenséget – Mach-sávoknak.

Ma már az érzékelési csalódásokkal foglalkozó pszichológia-tankönyvekben a Mach-sávok külön fejezetben szerepelnek, és a nemzetközi pszichológiai irodalomban idézett magyar kutatók között előkelő helyen áll Békésy neve.

A Mach-sávok fellépéséhez nincs feltétlenül szükség a Mach által leírt kísérletre; álló, sztatikus ábrán is felfedezhetjük ezeket.

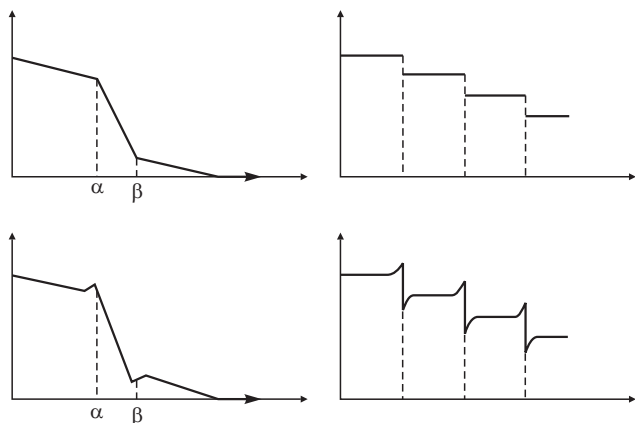
Az 6. ábrán a fehértől a feketéig fokozatosan sötétedő, de önmagukban homogén sávokat látunk. (Ezek még nem a Mach-sávok!) Ha tüzetesen figyelünk két egymás melletti sávra, akkor a határ közelében a világos sáv még világosabbnak, a sötét sáv még sötétebbnek látszik.

Mintha a világos sáv szélén egy még világosabb csík, a sötét sáv szélén egy még sötétebb csík jelenne

6. ábra. Az ábrán a határvonalak mentén észlelhetők a Mach-sávok.



¹ Az emberben önkéntelenül is felmerül a kérdés: nem kerültek ezek a munkák később a fiatal Eötvös Loránd (1848–1919) kezébe? Miután Heidelbergből 1870 nyarán Eötvös hazajött, Szily Kálmán (1838–1924) azonnal be tudta őt vonni a *Természettudományi Közöny* szerkesztőségébe, s az első cikk, amit Eötvös Loránd rovatvezetőként jegyzet és megjelentetett a *Természettudományi Közöny* 1871. januári számában, ezt a címet viselte: *Doppler elve és alkalmazása a hang- és fénytannalban*. Lehet, hogy Machtól jött az inspiráció?



7. ábra. A világosságinger és a világosságérzet változása a hely függvényében.

meg egymás mellett. Ezek a látszólag megjelenő csíkok a Mach-sávok (Mach-Streifen, Mach bands, bandes de Mach).

A hatás azért jelentkezik itt még kifejezettebben, mint Mach eredeti kísérletében, mert itt a csíkok világossága a határon ugrásszerűen változik. Mach kísérletében az objektív világosság folyamatosan változik, csupán a változás gyorsasága ugrik ott, ahol a Mach-sávot látjuk.

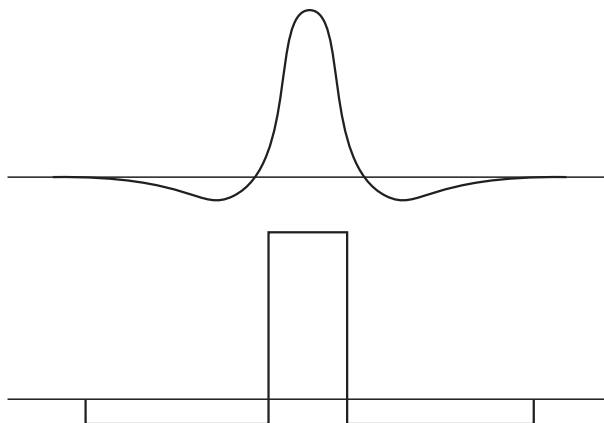
A két eset közti különbséget mind az ingerre, mind az érzetre vonatkozólag a 7. ábrán láthatjuk.

A Mach-sávokban tehát mintegy kiélesedik az objektív világosságok közötti kontraszt: látszólag felerősödik maga a változás. Pontosán ilyen mechanizmust kutatott a halló érzékelésben Békésy, és megtalálta a látás során optikai csalódást okozó mechanizmusban.

E jelenség pontos, részletekbe menő vizsgálata és minél helyesebb értelmezése kötötte le Békésy figyelmét Honoluluban.

Mach magyarázatát, amely szerint a látszólagos sávok megjelenésében a világosság helyfüggvényének második deriváltja a döntő tényező, nem fogadta el. Kísérletileg meg tudta mutatni, hogy kevésbé éles határok esetén is megjelenhetnek a Mach-sávok, amikor tehát a második derivált lényegesen más értéket

9. ábra. A Mach, majd Békésy által használt csillag alakú minta a Mach-sávok előállításához.



8. ábra. A „sombbrero” és a helyettesítő lépcsős függvény.

vesz fel. Nemcsak a határ, hanem a határ kiterjedtebb környezete is számít.

Ezért kutatta Békésy az egymás melletti érző idegsejtek közti kapcsolatokat és ezért szentelt nagy figyelmet az oldalirányú gátlásnak.

A jelenség értelmezésére azt a modellt használta, amely szerint, ha egy érző idegsejtet külső inger ér, akkor az egymás melletti idegsejtek közti kölcsönös kapcsolat, összehangolt működés során az ingerelt sejt közvetlen környezetére is kiterjed az inger, sőt, valamivel távolabb gátlást is okoz. (Ez az oldalirányú gátlás.) Egyetlen „idegi egységnek” tekintette az ingerelt sejtrel együtt annak kis környezetét, amire az inger, illetve a gátlás kiterjed. Feltételezése szerint ezt egy „sombbrero” függvény írja le (8. ábra).

A megfigyelés öröme azonban nem az értelmezés nyújtotta Békésy számára, hanem az a sok-sok szíporozó, pofonegyszerű ötlet, a kigondolt és véghez vitt mérésorozat, amellyel mérhetővé tette a mérhetetlent, a csupán optikai csalódásként megjelenő Mach-sávokat. Amit Eötvös dicséretére felhozott – „egy probléma több különböző oldalról való makacs megközelítésének egyszerűsége” – jellemző volt rá is.

Visszatér Mach eredeti kísérletéhez, legalábbis annyiban, hogy ő is szaggatott, villogó fénnel ingerelte a szemet. Ezt a villogási frekvenciát persze lehetett olyan nagyra választani, hogy a villogás már nem volt észrevehető.

Kísérleteit két nagy csoportra lehet osztani. Az egyikben, lényegében Mach nyomán, egy mintegy 30 cm átmérőjű körbe írt 8 ágú csillagot forgatott (9. ábra). A csillag fehér alapon fekete, vagy fekete alapon fehér volt, és olyan alakú, hogy forgás esetén a világosság Mach említett kísérletéhez hasonló módon változzék a kör sugara mentén. A Mach-sávok persze ilyenkor körök voltak. Kísérleteinek másik csoportjában egy álló fekete-fehér minta felett forgatott egy négyzet-keresztmetszetű üveghasábot, amelyen át nézve a fekete-fehér ábra helyről helyre más tónusú szürkének látszott. A Mach-sávok itt a forgásirányra merőleges csíkként jelentek meg.

Legutolsó nagy cikke, amely 1972. január 21-én érkezett be az angliai *Vision Research* tudományos folyóirathoz, az alábbi címet viseli: *Mach-sávok mérése*

kompenzációs módszerrel. Ekkor már súlyos beteg volt, nemsokára kórházba került és június 13-án meg is halt. Miközben a cikket írta, Békésy már valószínűleg tudta, hogy nem sok ideje van hátra. Semmi közvetlen utalás nincs erre a cikkben, egyedül a szokásosnál kissé bővebb irodalmi visszatekintés, valamint a hivatkozások széles spektruma jelzi, hogy ezt az írást a szerző összegzésnek is szánta.

Ugyanakkor maga a kompenzációs módszer ötlete teljesen „Békésy-szerű”: egyszerű és zseniális egyszerű. Úgy méri a Mach-sávok erősségét, hogy azon a helyen, ahol a Mach-sávok megjelenének a forgatott csillagon, kissé megváltoztatja a csillag alakját. Világos Mach-sáv esetén egy kicsit több feketét tesz oda, sötét sáv esetén kicsit több fehéret. Addig változtatja ezt a kompenzációs alakot, amíg eltűnik a Mach-sáv. Ennyi. Megmérte a mérhetlent.

Ez az eszköz a csillagokkal együtt benne volt abban a hagyatékban, amely Magyarországra került, és ma már újra működésükben látható Diósdon, a Békésy Emlékkiállításon.

Irodalom

1. Radnai Gyula: Einstein Nobel-díjáról négy tételben. *Fizikai Szemle* 65 (2015) 413.
<http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1512/RadnaiGy.pdf>
2. A. Einstein: *A speciális és általános relativitás elmélete*. Gondolat kiadó, Budapest (1967) 181. o.
3. R. S. Cohen, R. J. Seeger (eds.), Ernst Mach: *Physicist and Philosopher*. D. Reidel Publishing Comp., Dordrecht (1970)
4. Patkós András: Egy kutató középiskolai tanár Kassán a múlt század végén. *Fizikai Szemle* 30 (1980) 159.
<http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz8004/patkos8004.html>
5. <http://tudosnapar.kfki.hu/historia/egyen.php?nanev=mach>
6. Karl Antolik: Das Gleiten elektrischer Funken. *Annalen der Physik und Chemie* 154 (1875) 14–37.
<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15238m/f23.item>
ábrák: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15238m/f170.item>
7. Morovics Miroslav Tibor: Egy múlt századi kísérletező fizikus, Antolik Károly életművéről. *Fizikai Szemle* 34 (1984) 222.
<http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1984/morovicsantolik.html>
8. E. Mach: *Az érzetek elemzése*. (Fordította Erdős Lajos) Franklin Társulat, Budapest (1927)
http://web.archive.org/web/20091013142018/http://www.fil.hu/uniworld/egyetem/restricted/filtort/Mach_cont.htm
9. Radnai Gyula: A megfigyelés öröme. Békésy utolsó tudományos vállalkozása a Mach-sávok kutatása Hawaii szigetén. *Természet Világa* 130 (1999) 314.
<http://www.termeszetvilaga.hu/tv99/tv9907/bekesy2.html>

A FIZIKA TANÍTÁSA

LICHTENBERG-ÁBRÁK KELTÉSE BOLYAI FARKAS IDEJÉN ÉS MA – 2. RÉSZ

Gündischné Gajzágó Mária
Hatvan

Lichtenberg-ábrák keltése saját készítésű eszközökkel

2014 nyarán *Csegzi Sándor*, az EMT Fizika Szakosztálya elnökének felkérésére az erdélyi fizikatanárok szeptemberi konferenciájára, a Körmöczi János Fizikus Napokra készültem *Bolyai Farkas fizikája...*¹⁵ könyvbemutatójával. Mivel az elektromosságot tárgyaló Bolyai-kéziratok első oldalai, az érdekesnek ígérkező Lichtenberg-ábrákkal együtt, csak a könyv elkészülte előtt nem sokkal kerültek elő az MTA Könyvtárának Mikrofilmtárában, felébredt bennem az óhaj a Lichtenberg-ábrák előállítására és bemutatására.



Gajzágó Mária a kolozsvári Babeş-Bolyai Egyetem Fizika Karán szilárdtestfizika szakon végzett, majd 1980-ban ugyanott szerzte az I. tanári fokozatot. 1986-ig, 15 éven át a marosvásárhelyi Bolyai Farkas Líceumban, 1987-től Szombathelyen, Békéscsabán és Hatvanban tanított. 1983-tól kutatja Bolyai Farkas kéziratban maradt fizikajegyzeteit. 2013-ban jelent meg – férjével, Gündisch Györggyel és Szenkovits Ferencsel írt – *Bolyai Farkas fizikája és csillagászata* című könyve.

Emlékeztem, hogy *Bíró Tibor* 10-15 éve Marosvásárhelyen már bemutatta a régi szertárban őrzött, saját kezűleg restaurált elektroforot és egy saját készítésűt is. Így természetesen hozzá fordultam a problémával. Bíró Tibor beszerezte a szükséges speciális anyagokat és az említett elektroforok igénybevételével Lichtenberg-ábrák keltésével próbálkozott. Sikeres! Így a lakásán kialakított laborban a Körmöczi Napok előtt már videofelvétel készülhetett a Lichtenberg-ábrák létrehozásáról. A cikkünkben mellékeltem Lichtenberg-ábrák fotóinak is fele Bíró Tibor házi laborjában készült, a többi utóbb Hatvanban.

A 8. ábra fényképein az 1913-ból származó elektrofor¹⁶ látható a Marosvásárhelyi Bolyai Farkas Elméleti Líceum szertárából. Jól felismerhető a szigetelő nyéllel ellátott fémfedél (ónkorong). A kör alakú fémtálcát újraöntötték olvasztott gyantával. A második fotó éppen az elektrofor kisütésének pillanatát örökíti meg: az előzőleg megdörzsölt gyanta pogá-

¹⁵ Gündischné Gajzágó Mária, Szenkovits Ferenc, Gündisch György: *Bolyai Farkas fizikája és csillagászata. Másfél évszázada lappangó kéziratok*. Magyar Tudománytörténeti Intézet, Budapest, 2013. (Beszerezhető a MATI-nál, e-mail: tudomanytortenet@gmail.com).

¹⁶ Készült: Erdély és Szabó laboratóriumi felszerelések és tanszerek gyára, Budapest, 1913.



8. ábra. Az 1913-ban gyártott elektrofor restaurálás után.

zó kábelt félretéve, a szigetelő nyéllal megfogott fémfedéllel pozitív töltés szállítható a kívánt helyre.

A Bíró Tibor által készített elektrofornál a „forma” egy inoxtálca, a „pogácsa” vagy „lepény” egy PVC-, illetve plexi- vagy sztiroflexlap, a töltést szállító „fedél” – vagy Bolyai szavaival élve a „berzvivő” – egy befőttes üveg fedeléből és egy műanyagtöl-

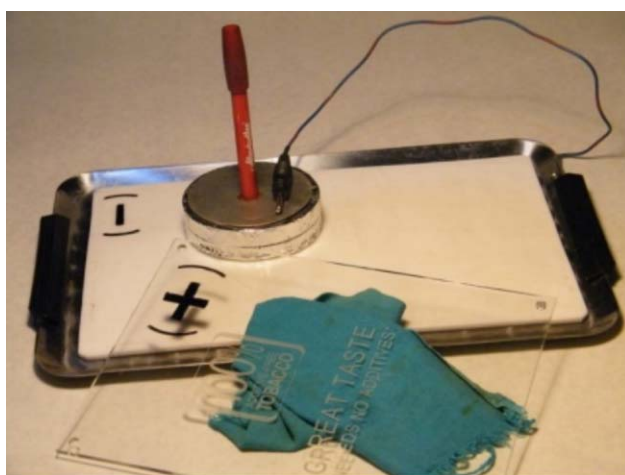
csára rátették a fémfedelelet, és épp ekkor érintik hozzá a fémformához csatlakozó kábelt. (Bolyai elektrofor-leírásánál ezt a kisütési műveletet az óntányér ujjal történő megérintése helyettesítette.) A csatlako-

csérből vagy egy szigetelő rúdból alakítható ki, amint az a 9. ábra fényképein is látható.

A PVC-lemez dörzsöléssel negatívan, a plexi- és sztiroflexlemez pedig pozitívan töltődnek fel. Nyilvánvaló tehát, hogy ha az inoxtálcára tett PVC-lemezt megdörzsöljük, és a töltést szállító fedelet ráhelyezük majd kisütjük, a fedél szigetelő fogantyúját megfogva pozitív töltést szállíthatunk a kívánt helyre.

Ha plexi- vagy sztiroflexlapot teszünk az inoxtálcára, dörzsölés és kisütés után negatív töltés szállítható a szigetelő nyéllal ellátott fedéllel.

9. ábra. Bíró Tibor házilag összeállított elektroforja.



10. ábra. Rézcsövek, amelyeken keresztül az elektrofor fedeléről töltések jutnak a szigetelő felületére, kúszókisülést okozva rajta.



Lichtenberg-ábrák létrehozása

A kísérletek elvégzésénél az 1. részben már idézett, itt megismételt, 1847-ből származó Bolyai Farkas leírásokat követtük.

I. kísérlet¹⁷

„Ha egy simán öntött spanyolviasz vagy szurok táblára két gyűrű tételik, egymástól bizonyos távra; az egyik berzített üveggel, a másik berzített spanyolviaszszal érintetik, s péld. licopodium hintetvén reá, a felesleg lefuvatik, az üveggel érintett kereknek sugárzó alakú lesz, a másik magába vonulo hold. Honnan amazt üvegberzinek, ezt szurokinak hívják; sőt azt napinak, ezt holdinak Franklin azt +ε, ezt –ε nek nevezte.” B. F.

Lassú melegítéssel megolvasztottuk, majd vízszintes fémtálcára kiöntöttük a spanyolviaszt, illetve gyantát úgy, hogy közel 2 mm vastag, sima felszínű réteg képződjön. A Bolyai által említett két gyűrű helyett egy 8–15 mm átmérőjű, 10–20 mm magasságú, vékony falú rézcsődarabot használtunk (10. ábra), amelyet a spanyolviasz vagy gyanta, esetleg írásvetítőnél használatos fólia bal oldali részére állítottunk.

Az elektrofort a már ismert módszerrel pozitívan feltöltöttük, és a töltést szállító fedéllel hozzáértünk a rézcsőhöz úgy, hogy az ne mozduljon el. Ezután a rézcsövet megfogtuk, áttettük jobb oldalra és az elektroforról negatív töltéseket vittünk rá, majd eltávolítottuk a csövet. Végül az egész felületre finom port: likopodiumot, kénport stb. szórtunk. A tálcát közel függőleges helyzetbe hoztuk és könnyedén kopogtattuk.

¹⁷ Lásd a könyv 189. oldalát, B 561/6v

Ekkor láthatóvá váltak a Lichtenberg-ábrák, esetünkben bal oldalt a csillagszerűen elágazó, jobb oldalt pedig koncentrikus körökre emlékeztető, Bolyai szavaival a „napi”, illetve „holdi” alakzatok.

Vegyük észre, hogy a Bolyai által leírt kísérleti módszer előrelépés a Baumgartner által javasolthoz képest, mert ő az elektromozott üveget, illetve elektromozott gyantát nem közvetlenül a simára öntött spanyolviasz vagy gyanta felületéhez érinti, mint Baumgartner, hanem egy-egy fémgyűrűhöz és ez nagyobb mennyiségű töltés átvitelét teszi lehetővé. Persze az elektrofor „berzvivő”-jeként szolgáló öntányérral nagyságrendileg több töltés vihető át, és fémgyűrű vagy vékony falú rézcső használata esetén egy körkerület mentén nagy töltéssűrűséggel jut a spanyolviasz vagy gyanta felületére. A latin jegyzetből közölt Lichtenberg-ábrák rajza fölé nyilván nem véletlenül írta a jegyzetíró az „electrophorum” szót, bizonyára elektrofort használtak előhozásukhoz.

Különben, mint láttuk nevezetes előadásában, Lichtenberg is használt elektrofort, leideni palackot és kis fémcsöveket ábráinak előállításánál. Tekintsünk meg néhány ilyen módon létrehozott Lichtenberg-ábra fényképét (11–15. ábrák)!

Megállapítható, hogy az ábrák alakját, minőségét jelentősen befolyásolja az alaplap minősége, a rézcső átmérője, a használt por szemcsézettsége, az elektrofor megfelelő működése, és ezen kívül elengedhetetlenül szükséges a levegő alacsony páratartalma!

II. kísérlet¹⁸

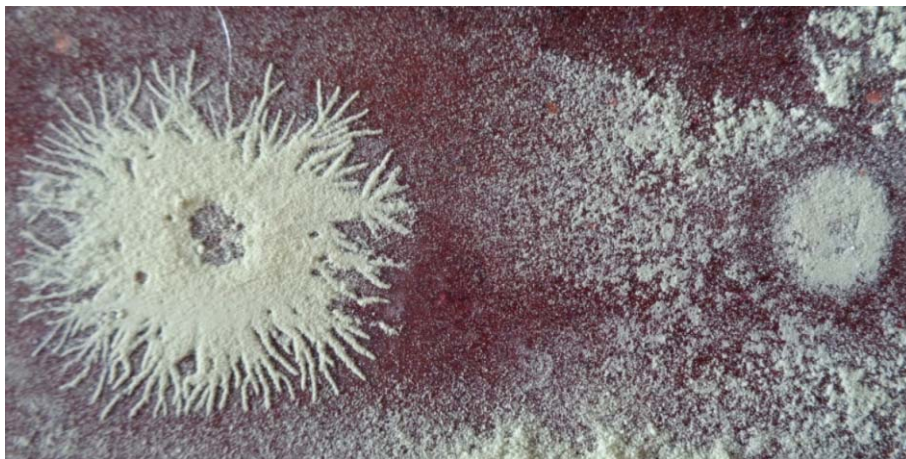
„Továbbá ha egy simán öntött spanyolviasz vagy szurok táblára, egymás után betűk irodnak, az első berzített üveggel, a másik berzített spanyolviaszszal s ugy tovább; és minium s kénvirág elegyül szitáltatik reá, az 1, 3, 5-ik esat. betű veressen jelenik meg; a 2, 4-ik esat. sárgán, ha a feleslegi por lefuvatik.” B. F.



11. ábra. Lichtenberg-ábrák fémtányérra öntött zöldes színű spanyolviaszon, likópódiumporral.



12. ábra. Lichtenberg-ábrák fémtányérra öntött zöldes színű spanyolviaszon, kénporral.



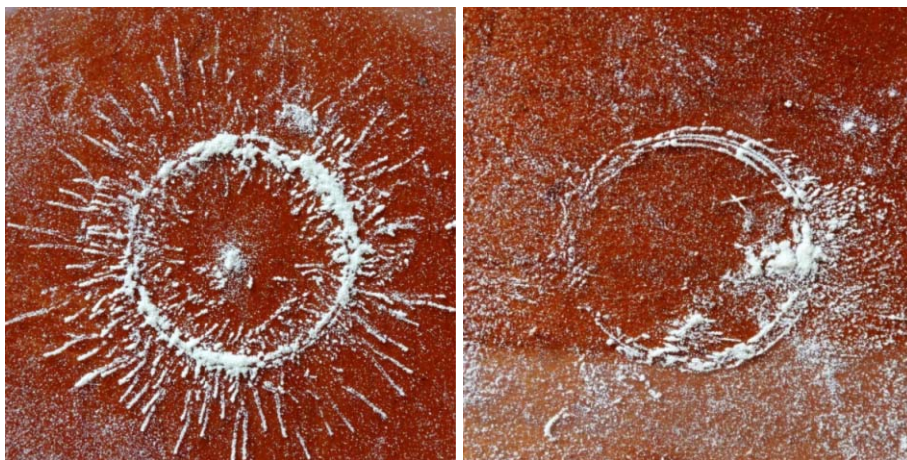
13. ábra. Lichtenberg-ábrák fémtányérra öntött bordó-barna spanyolviaszon, kénporral, kisebb átmérőjű rézcső esetén.

A II. kísérletet is módosítva végeztük, különböző színű betűk helyett különböző színű Lichtenberg-ábrákat hoztunk létre a következőképpen: írásvetítőnél használatos átlátszó fólia felső felére helyeztük a rézcsövet, és elektroforról pozitív töltést vittünk rá, azután a rézcsövet áttettük a fólia alsó felére és ekkor

¹⁸ Lásd a könyv 189. oldalát, B 561/6



14. ábra. Lichtenberg-ábrák fémtányérra öntött hegedűvonó-gyantán, kénporral.



15. ábra. Lichtenberg-ábrák barna asztalra tett írsvetítő-fólián, kénporral.

A 17. ábrán a mínium- és kénpor keverékével beszórt fóliát látjuk megkopogtatása – a fölösleges porkeverék eltávolítása – előtt és után. Az alsó ábrán jól látható, hogy a fólia felső részén, ahová a pozitív töltéseket vittük, sugárszerűen elágazó, sárga színű, „napi” ábrát rajzolt a kénpor, a negatív töltésű alsó részen pedig behúzódnó, vörös színű, „holdi” ábrát írt a míniumpor.

Cikkünk elején, a II. kísérletben leírt sorokat újból elolvasva, megállapíthatjuk, hogy elírás történt a Bolyai-szövegben, mert a „szurok táblára berzített üveggel írt” betűknek sárgán, a „berzített spanyolviaszszal” írtaknak pedig vörösre kellene megjelenüek – a fentebb tapasztalt kísérleti megfigyeléseink szerint. Ezzel egybehangzik a II. kísérletnek Baumgartner által adott leírása is (cikkünk 1. részének elején), amely szerint a sima gyantafelület pozitívan feltöltött részeit a kénpor, a negatíván feltöltötteket pedig míniumpor fedi be, ha bizonyos magasságból mínium- és kén-

már negatív töltést szállítottunk a csőre. A rézcsovet eltávolítva a fólia egész felületére mínium- és kénpor keverékét szórtuk egy teaszűrő segítségével. Ezt a mozzanatot örökíti meg a 16. ábra. Megfigyelhetők a kialakuló Lichtenberg-ábrák, de még a teaszűrőt elhagyó, leszálló por is.

16. ábra. Mínium- és kénpor keverékének szórásakor alakulnak ki a Lichtenberg-ábrák.



17. ábra. Lichtenberg-ábrák a fölösleges mínium- és kénpor keverékének eltávolítása előtt (föül) és lefújás után (alul).



por keveréket szítalunk rá, amint a 18. ábrán látható.

Felhívnam a figyelmét azon a kollegáknak, érdeklődőknek, akik esetleg kedvet kaptak a Lichtenberg-ábrák előhozására, hogy nem szükséges pecsétviaszal, gyantával bajlódniuk, próbálkozzanak inkább különféle fóliákkal, sőt fóliák helyett CD- vagy DVD-lemezekkel; finom porként kézenfekvő a kénpor használata, miniumot csak végső esetben és vigyázva használjanak, mert mérgező.



18. ábra. Lichtenberg-ábrák fémtányérra öntött zöldes színű spanyolviaszon, kén- és miniumporral.

KÖZÉPISKOLÁBAN TANULT MOZGÁSOK ELEMZÉSE DOPPLER-EFFEKTUSSAL – AVAGY »LÁTNI A HANGOT«

Stonawski Tamás, Gálik Tamás
Nyíregyházi Egyetem

A középiskolai természettudomány-oktatásban előforduló mozgástípusok időbeliségének megjelenítésére különböző $x-t$, $s-t$, $v-t$, $a-t$ grafikonokat használunk. A grafikonok egy bizonyos időintervallum elvileg végtelen sok időpillanathoz rendelik az említett fizikai mennyiségeket, ezáltal értelmezhetővé válik a mozgás folyamata. Ezen fizikai mennyiségek mérése visszavezethető egyszerű távolság- és időmérésre, és ezzel kapcsolatosan a különórákon

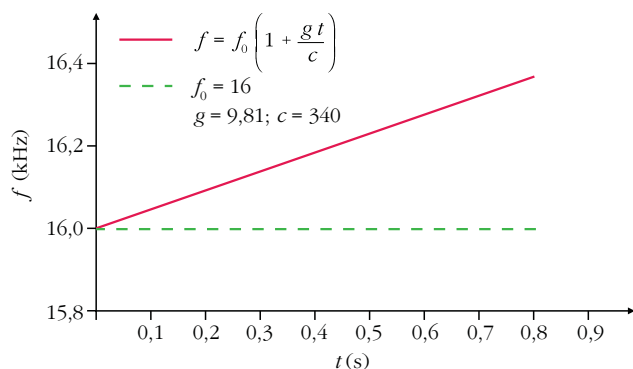
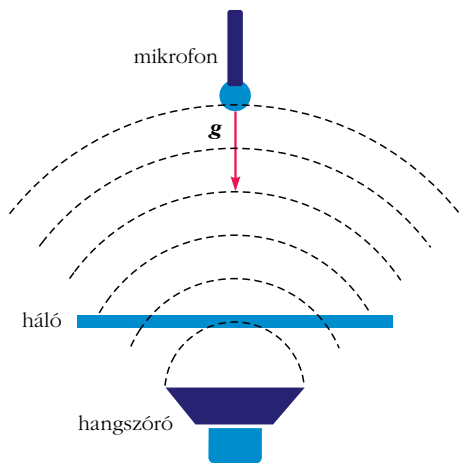


Stonawski Tamás a Nyíregyházi Egyetemen főiskolai adjunktus, óraadó az Ecsedi Bátor István Református Gimnáziumban. Az ELTE Fizika Tanítása doktori program doktorjelöltje. Kutatási területe a digitális média alkalmazása a tanulói kreativitás, problémamegoldás és önálló kísérletezés fejlesztésére általános és középiskolában.



Gálik Tamás a Nyíregyházi Főiskolán fizikusként végzett, jelenleg a Nyíregyházi Egyetem I. éves fizika-kémia mesterszakos hallgatója. Kísérleti és demonstrációs eszközök tervezésével és készítésével foglalkozik. Rendszeresen tart tudománynépszerűsítő előadásokat korosztálytól függetlenül az ország számos pontján.

mélyebb matematikai összefüggések is feltárhatók (idő szerinti differenciálás). A diákok későbbi tanulmányaik során viszont olyan fizikai mennyiségekkel is találkozhatnak (például hőmérséklet), amelyek közvetlenül nem, csak a makroszkopikus test valamilyen más fizikai tulajdonságának változásán keresztül mérhetők. Ez a fajta közvetett szemlélet, amikor például egy folyadékos hőmérő használatánál már nem a térfogatot, hanem egy hőmérsékletre kalibrált értéket olvasnak le a tanulók, bizonyos absztrakciót követel. A diákok már a fizikatanulmányaik előtt is használtak folyadékos hőmérőt, de annak alkalmazhatósági korlátait csak a hőmérséklet és hőtágulás fenomenologikus tárgyalásakor érthetik meg. A hőmérők más típusainál további közvetett mérésre alkalmas fizikai jelenségeket is tárgyalhatunk, mint például az ellenállás- vagy a frekvenciaváltozás. Hogy az anyag milyen tulajdonságát választhatjuk ki egy bizonyos fizikai mennyiség mérésére, azt a vele kapcsolatosan feltárt összefüggés határozza meg (hasonlóan a skálázást és az érvényességi határokat is). Azaz a matematikai összefüggésekből mérési eljárásokat dolgozhatunk ki. A képletek kreatív felhasználása gazdagíthatja a tanórák, szakkörök anyagát. Érdemes tehát a hőmérsékletméréshez hasonló, más közvetett méréseket is bemutatni a tehetséges tanulóknak, és ha van rá lehetőség, igazolni is az összetartozó mennyiségek kapcsolatát. A különböző témakörök szakkörön történő összekapcsolása növeli a problémamegoldó-képességet, élénkíti a kreativitást és a memorizálásban is sokat segít.



1. ábra. Fölül a mérés elvi vázlatja, alul pedig a (4) összefüggés grafikonja látható.

Mozgások elemzése Doppler-effektussal

11. osztályos fizikasakkörön a hullámmozgás témakörénél járva a diákokkal elhatároztuk, hogy a tanult

$$f = f_0 \frac{c}{c - v}, \quad (1)$$

$$f = f_0 \frac{c + v}{c} \quad (2)$$

Doppler-összefüggések segítségével is meg fogjuk vizsgálni a 9. osztályban tanult speciális mozgásokat. (Az f_0 az álló hangforrás frekvenciája, c az aktuális hangsebesség, f pedig a v sebességgel mozgó megfigyelő által észlelt frekvencia.) A (2) összefüggésben a megfigyelő sebessége a számlálóban van és a nevező sem összetett, így annak matematikai vizsgálata az egyszerűbb feladat. A (2) egyenlet számlálójának összetettségét megszüntetve a

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (3)$$

összefüggéshez jutunk.

A kísérletben alkalmazott mikrofon a mozgó megfigyelő, míg a nyugalomban lévő hangszóró a hangforrás szerepét játszotta. Ahhoz, hogy valós idejű f - t grafikon kaphassunk, egy valós idejű hanganalizátorra is

szükségünk volt. Mi a Realtime Analyser [1] programcsomagot használtuk méréseink során. A szoftver rendelkezik olyan jelgenerátorral, amelynek segítségével 0–24 kHz-es tartományban kényelmesen állíthatunk elő különböző hullámformájú, amplitúdójú és frekvenciájú hangokat. A program használatakor lehetőségünk van frekvenciapásztázásra is, ami nagyon hasznosnak bizonyul például a legnagyobb hatótávolságot biztosító frekvencia megtalálásához. A szoftver számunkra legfontosabb képessége a spektrogramkészítés volt, amit megadott frekvenciasávban, adott érzékenységgel és kiválasztható jelforrással végeztünk el.

Az egyes mozgástípusoknál tanult sebesség-idő összefüggéseket a (3) egyenletbe írva tanulmányoztuk az abból kapott frekvencia-idő összefüggéseket (lásd később).

Szabadesés

A (3)-ba helyettesítve a szabadesés $v(t) = gt$ sebességét az

$$f = f_0 \left(1 + \frac{gt}{c} \right) \quad (4)$$

egyenletet kapjuk (1. ábra, alul). Ezt rendezve az $f(t)$ függvényre az

$$f = \frac{f_0 g}{c} t + f_0 \quad (5)$$

lineáris összefüggés adódik. Az m meredekségből a nehézségi gyorsulás kifejezhető:

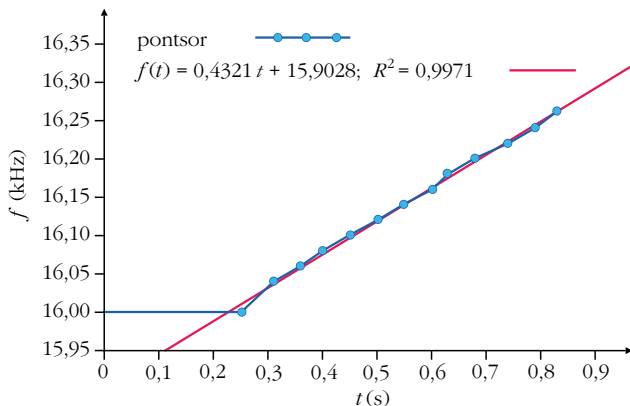
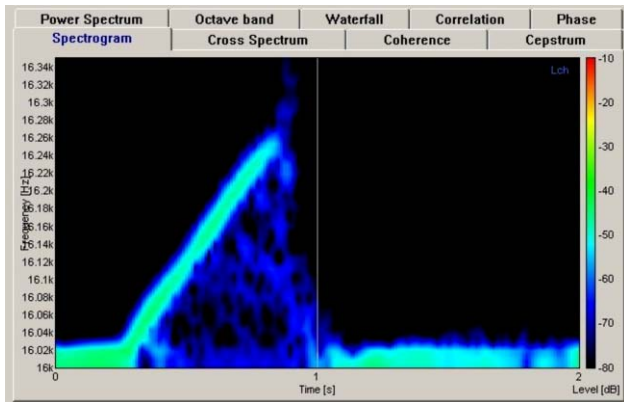
$$g = \frac{m c}{f_0}. \quad (6)$$

Azaz, ha a mikrofont ejtjük a hangszóró felé (1. ábra, fölül), a mikrofon által detektált f - t grafikon alapján – ha ismert az alapfrekvencia és a hangsebesség – a helyi nehézségi gyorsulás mérésére nyílik lehetőségünk.

A kísérletet elvégezve a 2. ábrán látható f - t grafikon kaptuk. A meredekséget a grafikon alapján intervallumfelezéssel kinyert adatok ábrázolásával határoztuk meg:

$$g = \frac{(0,43 \pm 0,02) \frac{\text{kHz}}{\text{s}} \cdot 350 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{16 \text{ kHz}} = (9,4 \pm 0,4) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \quad (7)$$

A g számított értéke itt a hangsebességtől is függ, amit a levegő hőmérséklete alapján táblázatból kereshetünk ki – ha időnk és lehetőségünk engedi, a helyszínen a kísérlet előtt érdemes megmérni a hangsebességet. A mérés legnagyobb hibáját a frekvenciaértékek körülbelül 20 Hz-es szórása adta. (A mérést befolyásoló tényező még a közegellenállás, és a mikrofon vezetéke, tehát g -nél kisebb értéket kellett kapnunk.)



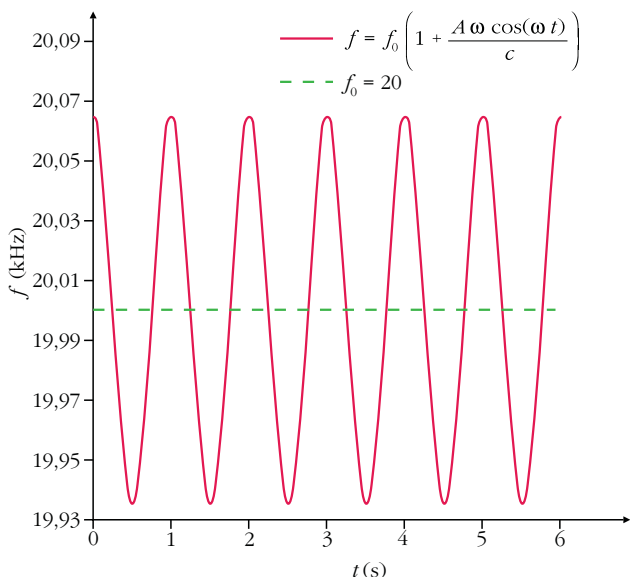
2. *ábra.* A szoftver adatai alapján 0,02 kHz frekvenciaváltozásokhoz tartozó intervallumok alapján elkészített f (kHz) – t (s) grafikon. A grafikon 0,25–0,86 s intervallumára illesztett egyenes meredekségét a Graph [2] program számította ki.

Harmonikus rezgőmozgás

A harmonikus rezgőmozgás pillanatnyi sebességére vonatkozó

$$v = A \omega \cos(\omega t) \quad (8)$$

3. *ábra.* Bal oldalon a (9) összefüggés grafikonja, a jobb oldalon az összeállított kísérlet látható.



összefüggést behelyettesítjük a (3)-ba, ekkor az

$$f = f_0 \left(1 + \frac{A \omega \cos(\omega t)}{c} \right) \quad (9)$$

egyenletet kapjuk. Néhány egyszerű matematikai átalakítás után az

$$\begin{aligned} f &= \frac{A \omega f_0}{c} \cos(\omega t) + f_0 = \\ &= A' \cos(\omega t) + \text{konst.} \end{aligned} \quad (10)$$

összefüggéshez jutunk, ami egy megváltozott, A' amplitúdójú,

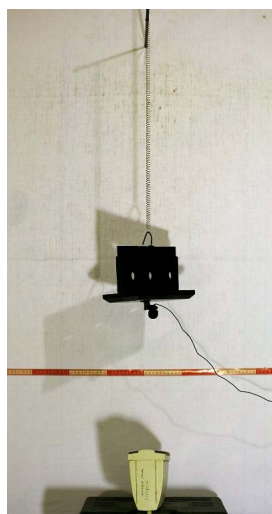
$$A = \frac{A' c}{\omega f_0} \quad (11)$$

(úgynevezett virtuális amplitúdó) koszinuszfüggvény (3. *ábra* bal oldala).

A kísérlet során egy M tömegű testet és egy mikrofont erősítettünk a rugóra, a hangszórót pedig az összeállítás alatt helyeztük el (3. *ábra* jobb oldala). A mikrofon által detektált f - t grafikon alapján leolvastuk a periódusidőt és kiszámoltuk az amplitúdót. A kapott eredményeket manuális mérésekkel (stopper, vonalzó) és videoanalízissel (rögzített videofelvételek alapján) is ellenőriztük (4. *ábra*).

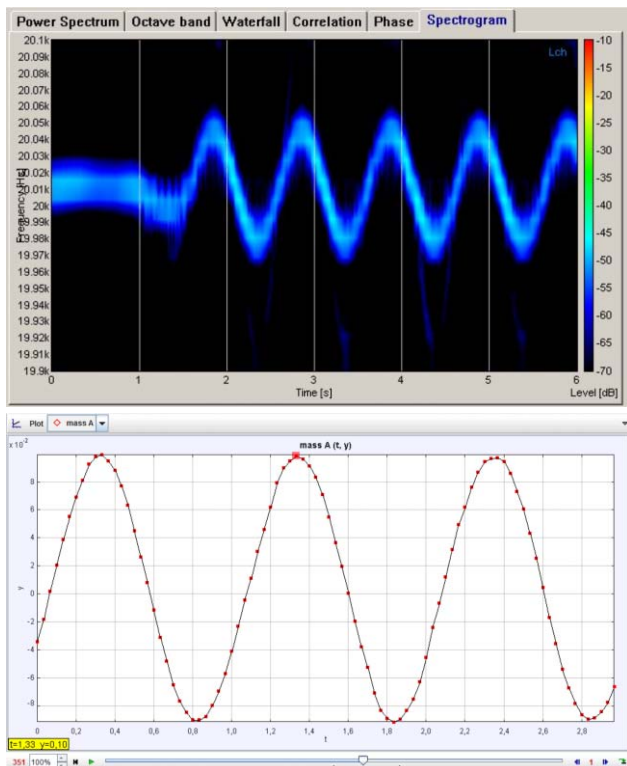
A kísérletben viszonylag nagyobb rugóállandójú rugót választottunk (így a közegellenállás és a kábel miatt disszipálódó energia elhanyagolható a rugó energiájához viszonyítva). Esetünkben a 7 kg-os súly hatására 25 cm-rel megnyúlt rugó rugóállandója 275 N/m volt. A rezgésidő 1 másodpercnek adódott. Ezt az értéket stopperes méréssel, videoanalízissel és az f - t grafikon alapján is megkaptuk.

Az f - t grafikon alapján leolvasott virtuális amplitúdó és az aktuális hangsebesség alapján ($A' = 0,07$ kHz, $c = 341$ m/s) a (11) képletbe helyettesítve a legnagyobb kitérésre 19 cm adódott, ami jól közelíti a videoanalízis és a manuális mérések 18 cm-es eredményeit.



Körmozgás

A körmozgás vizsgálatához 26 cm átmérőjű, állandó szögsebességű, elektromos fazekaskorongót használtunk. A korong külső részére, a hangszóróval megegyező magasságba mikrofont erősítettük (5. *ábra*). A mikrofon által felvett hang frekvenciáját az idő függvényében vizsgáltuk: a grafikon képe szinuszgörbének adódott. A grafikon képeről (6. *ábra*, fölül) megállapítottuk, hogy az jellegét te-



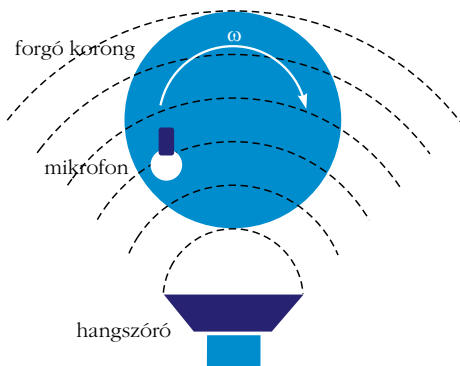
4. ábra. Fölül a harmonikus rezgőmozgás $f-t$, alul a videoanalízis [3] alapján meghatározott $y-t$ grafikon látható.

kintve megegyezik a harmonikus rezgőmozgás $f-t$ grafikonjával (4. ábra). Ezzel mintegy áttélesen igazoltuk, hogy a harmonikus rezgőmozgás az egyenes körmozgás merőleges vetülete.

A mikrofon által detektált $f-t$ grafikon alapján meghatároztuk a periódusidőt, a szögsebességet és a mikrofon kerületi sebességét. A mérést manuálisan és videoanalízissel is megismételtük (6. ábra, fölül).

A 6. ábrán nemcsak frekvencia-, hanem intenzitásváltozásokat is megfigyelhetünk. A grafikon pontjainak színeihez (a feketétől a piros színűig) a decibelskála értékei vannak hozzárendelve, így a mozgás során a hang erősségét is leolvashatjuk. Az ábrán látható szinuszrezgés felső részénél a hangerősség 10 decibellel erősebb, mint az alsó részénél, azaz a mikrofon ekkor van a hangszóróhoz legközelebbi pozícióban. A nagyobb hangerősség a grafikon szétfolyását is eredményezi. A frekvencia-diagramon még megfigyelhető a

5. ábra. A körmozgás vizsgálatához tartozó mérés elvi vázlata.



falról visszaverődött hang is (a hullámvonalatok tükörképe), amit például néhány hangcsapdának használt szembehelyezett tojástartóval lehet kiküszöbölni.

Ingamozgás

Egy szabadságfokú, csillapítatlan, szabad lengéseket végző rendszerre:

$$v = -\varphi_0 \omega l \sin(\omega t), \quad (12)$$

ahol v a pillanatnyi sebesség, φ^0 a kezdeti kitérés szöge, l az inga fonálhossza, ω a lengés frekvenciája. Ezt (3)-ba beírva az

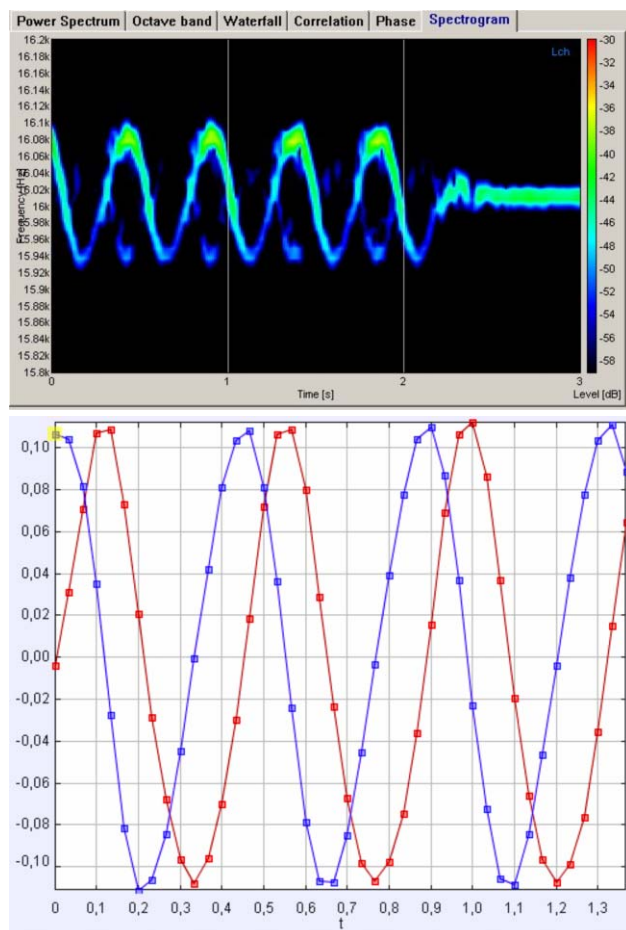
$$f = f_0 \left(1 - \frac{\varphi_0 \omega l \sin(\omega t)}{c} \right), \quad (13)$$

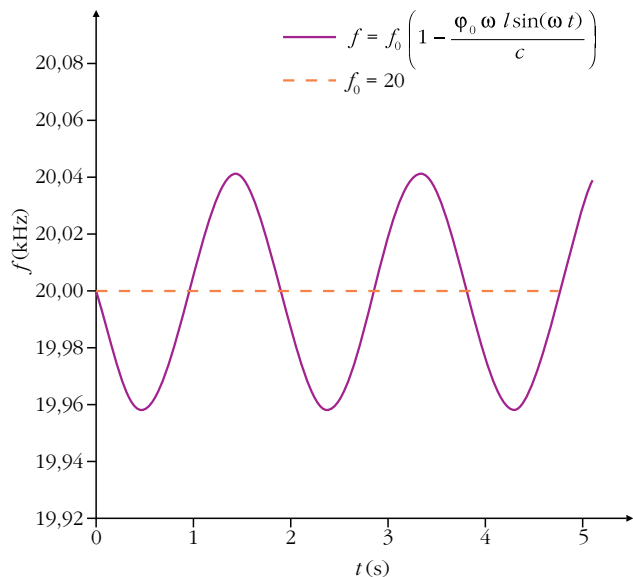
illetve az

$$\begin{aligned} f &= -\frac{\varphi_0 \omega l f_0}{c} \sin(\omega t) + f_0 = \\ &= A' \sin(\omega t) + \text{konst.} \end{aligned} \quad (14)$$

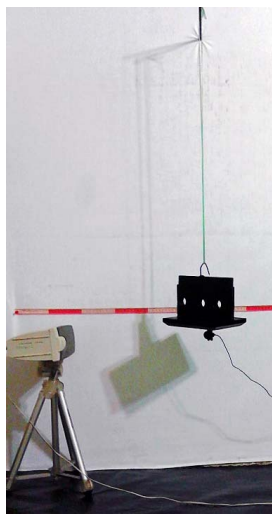
kifejezéseket kapjuk.

6. ábra. Fölül az $f-t$ grafikon (halványan a visszhangok is látszanak), alul a videoanalízissel kirajzoltatott $x-t$ és $y-t$ grafikonok közös rendszerben ábrázolva.





7. ábra. A (13) összefüggés függvényképe a kezdeti értékekkel és az ingás kísérlet összeállítása.



vencia 20 kHz volt. A T periódusidőt az $f-t$ grafikon alapján leolvastuk, amit ezt követően videoanalízissel és stopperes méréssel is ellenőriztünk ($\phi_0 = 13^\circ$, $T = 1,9$ s, $l = 0,93$ m, $f_0 = 20$ kHz).

Az ingamozgás $f-t$ grafikonjának világosabb részei (8. ábra, fölül) a mikrofon hangszóróhoz közeli félperiódusait jelölik ki.

Egyenes vonalú, egyenletes mozgás

Tudjuk, ez a legegyszerűbb mozgásforma, a mérések során mégis ez okozta a legnagyobb gondot. Ahhoz, hogy értékelhető grafikont kapjunk,

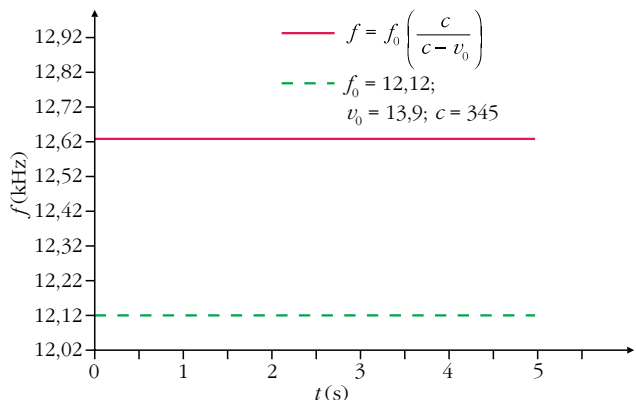
legalább 20 km/h sebességre kell felgyorsítani egy testet, és azt néhány másodpercig tartania is kell. Ehhez legalább 20 méter hosszú szabad területre van szükség, az osztályterem alkalmatlan a kísérlethez. A vezetékes mikrofont vezeték nélkülire kell cserélni. Külső helyszínt választottunk tehát, és egy személyautóval végeztük el a mérést. A terv szerint a kocsi szerelt mikrofon vette volna a nagyobb teljesítményű hangforrás jeleit, amíg a kocsi egyenletesen haladt volna felé. Sajnos a menetszél igen nagy háttérzajt okozott (a grafikon értékelhetetlen lett), így megcseréltük a jeladót és a -vevőt: a mikrofont helyeztük az út szélére és az autó beépített hangszóróit használtuk hangforrásként. Ekkor azonban a (3) helyett az (1) összefüggést kellett felhasználnunk.

A (1) összefüggésbe helyettesítve az egyenes vonalú egyenletes mozgás v_0 sebességét, kapjuk:

$$f = f_0 \left(\frac{c}{c - v_0} \right) = \text{konst.}, \quad (16)$$

ahogy a 9. ábra is mutatja. A (16)-ból kifejezhetjük az egyenletes mozgás sebességét:

9. ábra. A (16) összefüggés grafikonja vízszintes egyenes.



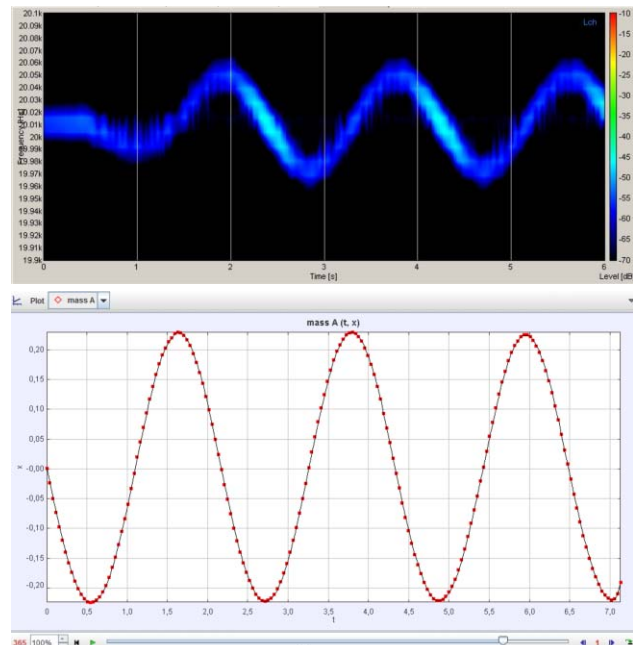
A (14)-ben A' -vel jelölt virtuális amplitúdót is értelmezhetünk, amiből a hangsebességet kifejezve a

$$c = - \frac{\phi_0 \omega l f_0}{A'} \quad (15)$$

összefüggést kapjuk. A (15) alapján akár hangsebességet is számolhatunk, de a grafikon kiszélesedése miatt csak igen nagy hibával.

Ingatestként a rezgőmozgásnál is alkalmazott viszonylag nehéz, 7 kg-os súlyt alkalmaztuk (7. ábra jobb oldala). A kezdeti kitérítés szögét és az inga hosszát, a szemből készített fotó segítségével, szög- és pixelmérő szoftverrel mértük meg [4], az alapfrek-

8. ábra. Ingamozgás Doppler-képe. Az $f(\text{kHz}) - t(\text{s})$ grafikon képe szinuszhullám, amelynek periodicitása megegyezik az ingamozgás lengésidejével.



$$v_0 = c - \frac{c f_0}{f}. \quad (17)$$

Leolvasható, ha v állandó akkor f is az, azaz amíg a hangforrás (vektoriális értelemben, nem csupán nagyságára nézve) állandó sebességgel mozog, a mikrofon által detektált frekvencia is állandó marad.

A gépkocsi sebességmérője 50 km/h-t mutatott, az f - t grafikon alapján (10. ábra) 45,5 km/h sebességet számoltunk. (Meggjegyezzük, hogy ilyen tempónál minden gépjármű „kilométerórája” a valóságosnál körülbelül 10%-kal magasabb értéket mutat.) A mérést most is videoanalízissel is ellenőriztük.

Konklúzió és a hogyan tovább

A doppleres mérések izgalmasak és különlegesek voltak. Kivitelezésük csak középiskolai matematikatudást igényelt, mégis betekintést engedtek a fizikaképek gazdag világába. Felfedeztük, hogy egy-egy összefüggés más irányú megközelítése nagyon érde-

kes lehet és elmélyítheti a fizikai mennyiségek közötti kapcsolatok értelmezését is.

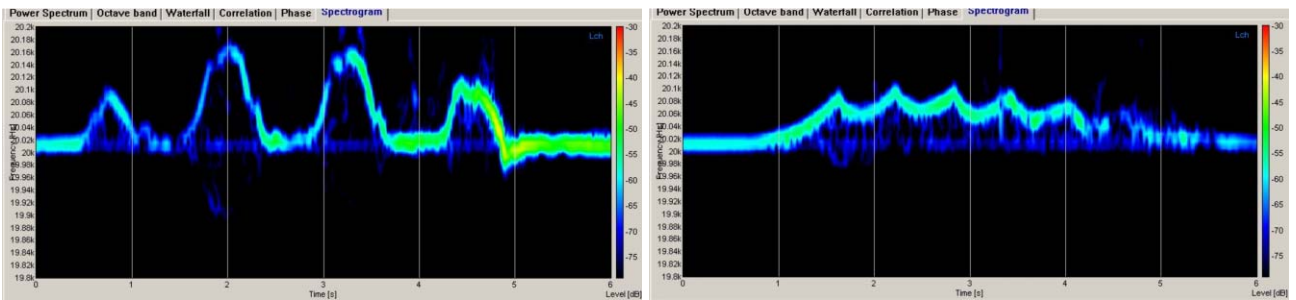
A kísérletezés során sok ötlet hangzott el, de a legeredetibbnek az tűnt, ha a doppleres méréseinket olyan mozgások vizsgálatára tudnánk felhasználni, amelyek más mérésekkel nem, vagy csak nehezen kivitelezhetőek (11. ábra). A továbbiakban ilyen mozgástípusok keresésével és mérésével szeretnénk foglalkozni.

A kísérletezés során sok ötlet hangzott el, de a legeredetibbnek az tűnt, ha a doppleres méréseinket olyan mozgások vizsgálatára tudnánk felhasználni, amelyek más mérésekkel nem, vagy csak nehezen kivitelezhetőek (11. ábra). A továbbiakban ilyen mozgástípusok keresésével és mérésével szeretnénk foglalkozni.

Irodalom

1. <http://www.ymec.com/products/dssf3e/>
2. <https://www.padowan.dk/download/>
3. <http://physlets.org/tracker/>
4. <http://ngwin.com/picpick>

11. ábra. Az emberi séta tanulmányozása a Doppler-effektussal. A lábra (bal oldalon) és a köldökvonalra (jobb oldalon) elhelyezett mikrofon által detektált f - t grafikon.



Jobb egy mentőötlet mint öt mentő egylet

– írta Karinthy Frigyes az egyletistápolás margójára.

Most Társulatunknak lenne szüksége egyletmentő ötletekre!



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



ODÜSSZEUSZ ÍJÁNAK TITKA

Az íj feszítési görbéjének hőmérsékletfüggése, avagy hogyan tudta Odüsszeusz felajzani az erős íját?

Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Tihanyi Janka, Király Kata, Gudmon Olivér

Kiskunhalasi Fazekas Mihály Általános Iskola

Kövécsvévente, Horváth Gábor

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Odüsszeusz íjának legendája:
ami a versből kiolvasható az íj felajzásáról

Az irodalomórán találkozhatnak a tanulók *Homérosz Odüsszeia* című eposzával. Ezen időmértékes versfolyam 21. énekében olvashatunk a híres-hírhedt íjversenyéről, amelyben Odüsszeusz király felesége, Pénélope kérőinek utolsó erőpróbája az volt, hogy az elűttnék hitt Odüsszeusz íjával 12 fejsze fokán átlóva, a győztes elnyerje az özvegynek hitt királynő kezét. Ehhez először fel kellett ajzani Odüsszeusz íját, vagyis a meghajlított íjtest ágainak végére be kellett akasztani a húrt. Ez azonban a kérők egyikének se sikerült. Egyedül csak az áluhában, inkognitóban megjelenő Odüsszeusz tudta az erős íjat felajzani, majd egy nyílal átlóni a fejszefokokon, végül kilétének fölfedése után, némi segítséggel lenyilazta a Pénélope udvartartásán évek óta élősködő, elszemtelenedett, erőszakos kérőket.

Az eposzból nem derül ki egyértelműen az íj felajzásának mikéntje, viszont az Odüsszeusz legendájáról szóló számos filmváltozat némelyikében az íjat Odüsszeusz úgy ajzza föl, hogy előtte láng fölé tartva

fölmelegíti az íjtestet, aminek hatására az kissé megpuhul és már föl lehet rá akasztani a húrt. Más filmváltozatokban emellett vagy ehelyett Odüsszeusz a húrt dörzsölgeti kezével a felajzás előtt. Az eredeti versszöveg és különféle filmadaptációi egyaránt homályban hagyják az íj felajzásának pontos módszerét.

Cikkünk célja az odüsszeuszi íjfelajzás lehetséges módozatainak kiderítése ürügyén iskolákban is kivitelezhető néhány egyszerű fizikai, íjmechanikai mérés és számítás elvégzése. Az irodalomórán megismert Odüsszeusz íjának kapcsán egy olyan kísérleti projektet mutatunk be, amely a diákoknak kedvet csinálhat a fizikához, és egy jó példát mutat arra, hogy a fizikai ismeretek fontosak lehetnek hétköznapi kérdések, problémák megoldásában.

Idézzük – *Devecseri Gábor* gyönyörű – fordításában *Homérosz Odüsszeia* eposzának íjversenyt leíró sorait. A következő napon a mit sem sejtő kérők tovább folytatják a mulatozást. Pénélope versenyt hirdet a kérők között:

„Isteni hős Odüsszeusz íját versenyre bocsátom:
mert aki legkönnyebben tudja felajzani íját,
s mind a tizenkét fejsze fokán átló a nyílalval,
majd ahhoz megyek én, elhagyva e hitvesi házat.”

XXI. ének, 74–77. sor



Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna mesterpedagógus, a Kiskunhalasi Fazekas Mihály Általános Iskola matematika-fizika szakos tanára és igazgatója. A hatásos tanulási-tanítási eljárások alkalmazása mellett azok fejlesztésével és kutatásával is foglalkozik. A tudástérképek tanulás- és gondolkodásfejlesztő módszeréről könyvet és folyóiratcikket írt. Tapasztalatait pedagógus szakvizsgát adó képzésben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem oktatójaként is továbbadja.



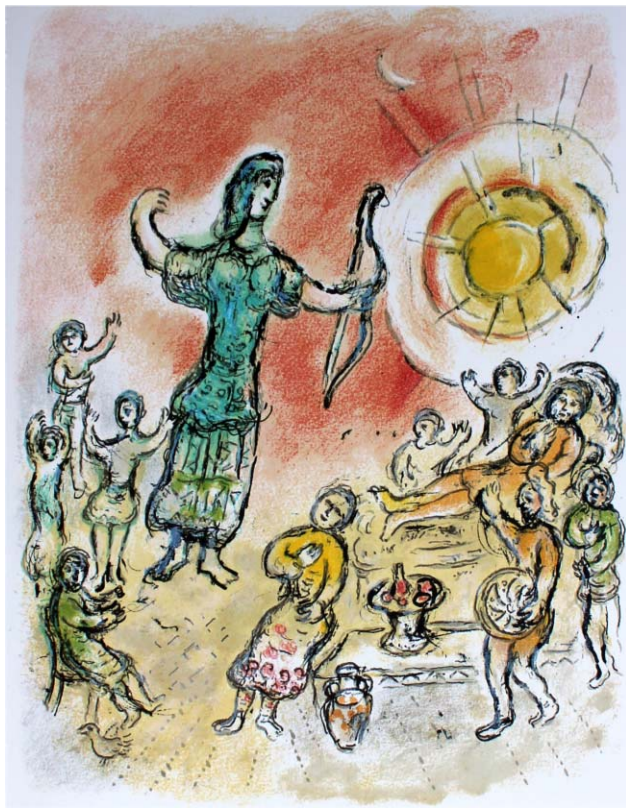
Kövécsvévente jelenleg az ELTE fizika-földrajz tanárszakos hallgatója. Aktívan űzi az íjászatot. BSc szakdolgozatát az íjászat fizikájáról írta.



Király Kata, 7. valamint Tihanyi Janka és Gudmon Olivér 8. osztályos, tanulók az iskola tehetségprogramjának tagjai. Olivér kreatív ötleteivel járul hozzá a kutató diák programok sikeréhez.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa.



Pénélopé és Odüsszeusz íja, Marc Chagall litográfiája.

Antinoosz és Eurümakhosz, a legelvetemültebb kérők vezetésével a kérők próbát tesznek, de már az új felhúrozásánál elakadnak. Elpuhult nemzedék elpuhult gyermekei. Odüsszeusz eközben felfedi kilétét Eumaiosz, a kondás és Philoitiosz, a csordás előtt, és beavatja őket a tervébe. A kérők sikertelen próbálkozása után a koldusgúnyába bújt Odüsszeusz próbál szerencsét. A kérők eleinte nevetnek rajta, de amint Odüsszeusz az íjat fogja, furcsa félelemérzés keríti hatalmába őket:

„Ejnye, be érthet az íjhoz, mily ravaszul *tapogatja*.
Tán bizony otthon ilyen van néki a háza ölében,
vagy készíteni kíván éppilyet, és *a kezében*
erre meg arra ezért *forgatja* a csúnya csavargó.”

XXI. ének, 397–400. sor

Odüsszeusz hibátlanul céloz, majd miután felfedte kilétét, így szól a kérőkhöz:

„Ennek az áldatlan versenynek végeszakadt már;
most más célt keresek, mire ember még sose célzott:
hátha sikerre jutok s diadalt ad nékem Apollón.”

XXII. ének, 5–7. sor

„Hát idebent némán egyetek, vagy sírjatok ottkinn,
eltakarodva a házból, és hagyjátok az íjat,
áldatlan versenyre a kérőknek: mivel én azt
nem hinném, hogy akadna, ki egykönnyen felidegzi.
Mert hisz ezek közt nincs olyan egy sem, mint
amilyen volt

bajnok Odüsszeusz, kit magam is láttam szememmel,
s emlékszem még rá, pedig akkor kisfiu voltam.

„Így szólt, ám közben kebelében a lelke remélte:
ő lesz majd, aki fölhúrozza s a sok vason átlő.
És bizony ő lett az, ki megízlelhette először
nyílvevesszőjét hős Odüsszeusznak, akit lakomázva
sértegetett a teremben s ráusztatotta a többbit.”

(XXI. ének, 89–100. sor)

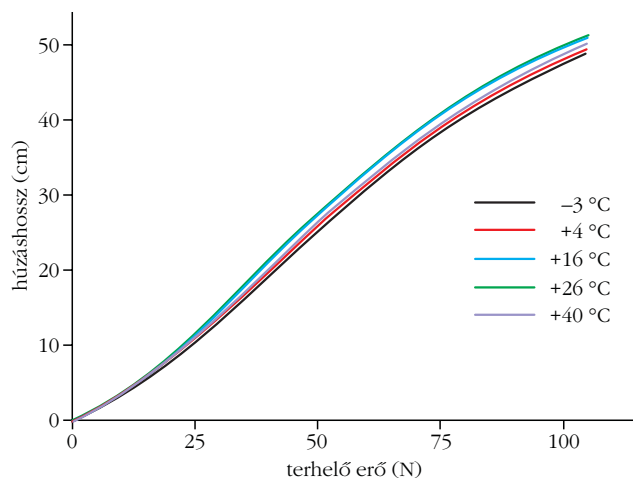
„Hát így szóltak a kérők; ám leleményes Odüsszeusz
nyomban, amint *fölemelte az íjat, megtapogatta*.
S mint aki nagyszerű énekmondó s ért is a lanthoz,
és könnyen kifeszíti a húrt, új szegre csavarva,
és a juh-bélt mindkétoldalt megerősíti szépen,
úgy idegezte föl azt, nem erőlködve, nagy
Odüsszeusz.

Próbát tett azután, jobbkézrel nyúlva a húrhoz:
fölszándult, s mint fecskéé, szép hangja olyan volt.
Bosszankodtak a kérők szörnyen, mindnek a színe
megsápadt. Zeusz jelt mutatott, dörgött a magasból.
Örvendett ezután a sokattúrt isteni férfi,
hogy csodajelt küldött a ravasz Kronosz égbeli
sarja.

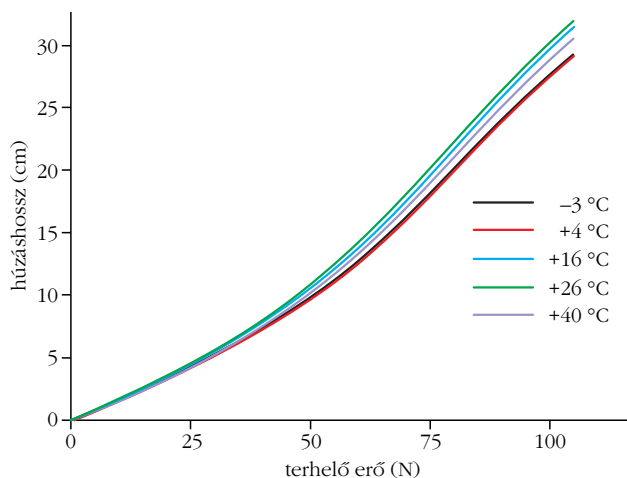
Fogta a gyors nyílvevesszőt, mely mellette kihúzva
asztalon ott feküdt: öblös tegezében a többi
várt, de hamar meg kellett még ízlelniök azt is.
Húrra helyezve, rovátkáit most vonta magához,
s még ugyanonnan, a székéből célozva szilárdul,
lőtte ki azt a nyilat, s egyetlen fejsze fokát sem
tévesztette el ő, hanem átsuhogott valamennyin
részterhes nyila. Ő pedig így szólt Télemakhoszhoz:
Télemakhosz, nem hoz vendéged rád a teremben
szégyent: nem vétettem a célt el, az íj idegével
sem bajlódtam hosszan: erőm sértetlen, egész még.”

(XXI. ének, 404–426. sor)

E sorokból egyáltalán nem következik Odüsszeusz íjának – a filmadaptációkban gyakran szereplő – láng fölé tartással történő melegítése, ami vélhetően az oszmán török íjászoktól eredhet. Nekik olyan erős íjaik voltak, hogy normál hőmérsékleten nem tudták felajzani azokat, ezért minden harc előtt tűz fölé tartották íjaikat, így a hő hatására könnyebben hajlíthatóvá váltak, s már föl lehetett ajzani őket. Az íj versbéli *kézi forgatását és tapogatását* azonban lehet úgy értelmezni, hogy ekkor Odüsszeusz kézzel markolgatta és dörzsölgette az íjat annak fölmelegítése céljából. Ugyanezen célja lehetne a húr simogatásának is, amint az egyes filmverziókban szerepel. Kérdés, van-e értelme az íjtestet és/vagy a húrt dörzsöléssel vagy lánggal melegíteni a felajzás előtt vagy után, ahogyan az a filmek némelyikében látható. S ha van, akkor csak a felajzást teszi könnyebbé, vagy segíti a nyílvevesszőt „átsuhogni” a fejszék fokán, tehát nagyobb erővel lövi-e ki a nyilat, annak nagyobb kezdősebességet biztosítva? E kérdésekre választ keresve, mértük modern íjak feszítési görbéjét a lég hőmérséklet függvényében. Mellesleg pedig meghatároztuk az íj hatásfokát is.



1. ábra. A 27 fontos íj feszítési görbéje -3 , $+4$, $+16$, $+26$ és $+40$ °C léghőmérséklet mellett. A feszítési görbék -3 és $+4$ °C hőmérsékleteken gyakorlatilag egybeesnek.



2. ábra. A 45 fontos íj feszítési görbéje -3 , $+4$, $+16$, $+26$ és $+40$ °C léghőmérséklet mellett. A feszítési görbék -3 és $+4$ °C hőmérsékleteken gyakorlatilag egybeesnek.

Az íj feszítési görbéjének mérése a hőmérséklet függvényében

Három különböző íjat vizsgáltunk: (1) 27 fontos ($F = 100$ N, $x = 65$ cm) honfoglaló magyar íj. (2) 45 fontos ($F = 160$ N, $x = 65$ cm) honfoglaló magyar íj. (3) 18 fontos ($F = 67$ N, $x = 57$ cm) reflex íj (Samick Polaris). Az íjakat egy adott környezeti hőmérséklet mellett vízszintes húrral rögzítettük és a húr közepét súlysorozattal terheltük, közben mérve az úgynevezett feszítési görbét (más néven íjkarakterisztikát), ami az adott F erővel terhelt húr közepének x távolsága az eredeti vízszintes húrtól (x az úgynevezett húzáshossz). Eredményül kaptuk az $F(x, T)$ feszítési görbét T léghőmérséklet esetén. A méréskor ügyeltünk arra, hogy az íjtestnek legyen ideje fölvennie a környező levegő hőmérsékletét, ami a mérés során állandó volt.

A különböző hőmérsékleteket egyrészt az időjárásra bízunk: nyár végén magasabb hőmérsékletű napokon kezdtük a méréseket, s az ős haladtával egyre alacsonyabb hőmérsékleteken tudtunk mérni. Az ennél magasabb hőmérsékleteket szaunában mérve biztosítottuk. Egyes alacsonyabb hőmérsékleteket pedig egy jégpálya sátrában és egy hűtőkamrában értük el, nem győzvéni kívárni a kellően hideg időjárást. Mikor az idő hidegebbre fordult, megismételtük a méréseket. Egy adott hőmérsékleten több, ismételt mérést is végeztünk, hogy megállapítsuk, mennyire megbízhatók, milyen pontosan reprodukálhatók mérési eredményeink. A későbbi eredmények megerősítették az előbbieket.

Kézi dörzsöléssel, súrlódási munkával is melegítettük a reflex íj testét. Az erős, kitarító, simogató mozgatlansorok hatását kontakthőmérővel mértük. Mivel a hőmérséklettel a levegő relatív páratartalma fordítottan változik, nem tudtuk elérni, hogy mindig azonos legyen a páratartalom. Ez azonban nem gond, mert ez egy természetes jelenség, ami Odüsszeusz korára is nyilván jellemző volt. Az íj húrját terhelő súlysorozat-

tot az egyik íjnál rögzített tömegű súlyokkal értük el, a másik íjnál pedig egy vödörrel, amibe folytonosan változtatható, ismert súlyú vizet öntöttünk.

Az 1. és 2. ábra a 27 és 45 fontos íj feszítési görbéjét mutatja -3 , $+4$, $+16$, $+26$ és $+40$ °C hőmérsékletek esetén.

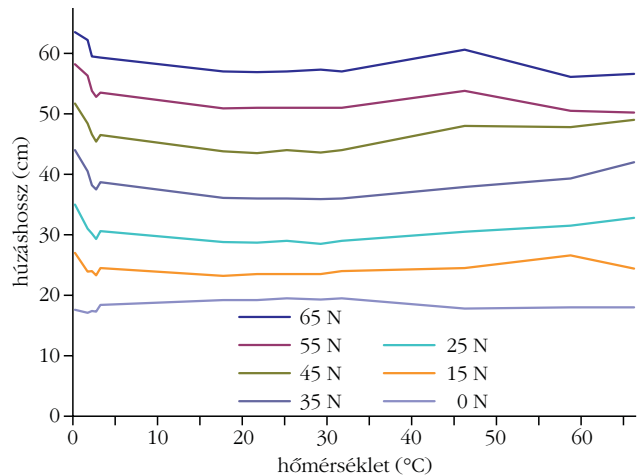
Mindkét íjnál kis feszítőerők mellett nagyjából lineárisan nő a húzáshossz, és a különböző hőmérsékletekhez tartozó feszítési görbék gyakorlatilag egybeesnek. (Itt érdemes felhívni a tanulók figyelmét arra, hogy Hooke törvénye csak bizonyos határok között érvényes.) E görbék hőmérséklet-eltérés miatti szétválása a 27 fontos íjnál közel 20 N feszítőerőnél kezdődik, míg a 45 fontosnál 40 N-nál. E szétválás egyre nő a feszítőerő növekedésével. Azon várakozásunk, hogy nagyobb hőmérsékleten adott feszítőerő mellett nagyobb a húzáshossz, egyik íjnál sem következett be. Az 1. és 2. ábrán a -3 és $+4$ °C-hoz tartozó feszítési görbék nagyjából egybeesnek a mindössze 7 °C-os hőmérséklet-különbségnek köszönhetően. Vegyük figyelembe, hogy ugyanazon feszítőerőnél az íjak húzáshosszának mindig van egy közel 1 cm-es játéka. Ezért legalább 10 °C-os hőmérséklet-különbség esetén várható a feszítési görbék szétválása. Ezt szépen mutatják a -3 és $+4$ °C-hoz tartozó feszítési görbék fölött húzódó $+16$ °C-os és az a fölötti $+26$ °C-os görbék az 1. és 2. ábrán. A váratlan eredményt a $+40$ °C-os szaunás mérés adta, amennyiben a feszítési görbe ekkor nem a $+26$ °C-os görbe fölött halad, hanem a $+16$ °C-os és $+4$ °C-os görbék között (1. és 2. ábra). Ennek mi lehet az oka?

Az egyik lehetséges magyarázat, hogy a szaunában jelentősen magasabb volt a levegő relatív páratartalma, mint a többi mérés helyszínein. Az íj testének és húrjának anyagai megszívhatják magukat nedvességgel, amitől fölkevényedhetnek, s ez vezethet a feszítési görbe szóban forgó hőmérséklet-függési anomáliájához. Ez azonban valószínűtlen, mert az íjtest külső lakkrétege nem engedi át a vizet és a légpárát, így a páratartalomnak gyakorlatilag nincsen hatása az íj belső anyagára.

1. táblázat

A 18 fontos íj különböző terhelőerők melletti húzáshossza (cm) a hőmérséklet függvényében

hőmérséklet (°C)	terhelőerő (N)						
	0	15	25	35	45	55	65
0	17,6	27,0	35,0	44,0	51,7	58,2	63,5
1,5	17,1	23,9	31,0	40,5	48,4	56,3	62,2
2	17,4	24,0	30,2	38,2	46,6	53,8	59,5
2,5	17,3	23,3	29,3	37,5	45,4	52,8	59,4
3	18,4	24,5	30,6	38,7	46,5	53,5	59,3
17	19,2	23,2	28,8	36,1	43,8	50,9	57,0
21	19,2	23,5	28,7	36,0	43,5	51,0	56,9
24	19,5	23,5	29,0	36,0	44,0	51,0	57,0
28	19,3	23,5	28,5	35,9	43,6	51,0	57,3
30	19,5	24,0	29,0	36,0	44,0	51,0	57,0
44	17,8	24,5	30,5	37,9	48,0	53,8	60,6
56	18,0	26,6	31,5	39,3	47,8	50,5	56,1
63	18,0	24,4	32,8	42,0	49,0	50,2	56,6



3. ábra. A 18 fontos íj eltérő terhelőerők melletti húzáshossza a hőmérséklet függvényében az 1. táblázat adatai szerint.

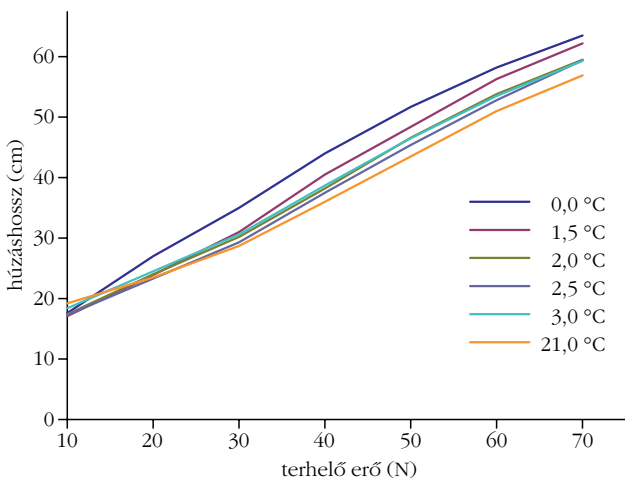
Egy másik magyarázat az íj összetett anyagával függhet össze: a vizsgált íjak műszál-fa-műanyag keverék (kompozit) anyagának dinamikai jellemzői nem monoton változhatnak a hőmérséklettel. Egy kritikus hőmérséklet (ami esetünkben +40 °C közelében van) elérésekor megfordul az íjkarakterisztika hőmérsékletfüggése.

Részletesen vizsgáltuk a 18 fontos íj dinamikai viselkedését 0 és 63 °C között a hőmérséklet függvényében (1. táblázat, 3–5. ábra). A 3. ábra szerint 3 °C alatt a hőmérséklet csökkenésével az íj ereje rohamosan csökkenni kezd, vagyis adott terhelőerőnél nő a húzáshossz. Nagy melegben, 40 °C fölött hasonló jelenség lép fel: megpuhul, legyengül az íjtest, lecsökken az ereje, megnő az adott terhelés melletti húzáshossza. A 3. ábrán az a trend látható, hogy amint me-

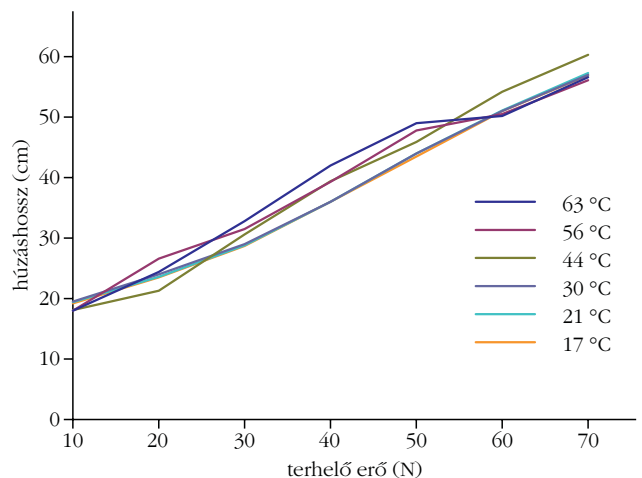
legben nő a terhelőerő (0 N-ről 65 N-ra), úgy csökken (63 °C-ról 44 °C-ra) azon hőmérséklet, amelyen az íj meggyengül. A 4. és 5. ábra az alacsonyabb, illetve magasabb hőmérsékleteken mért íjkarakterisztikákat, vagyis a „hideg”, illetve „meleg” feszítési görbéket mutatja. Az 5. ábrán jól látszik, hogy normál hőmérsékleten (17–30 °C) milyen stabil az íjkarakterisztika, vagyis gyakorlatilag nem függ a hőmérséklettől.

Súrlódással is próbáltuk melegíteni az íjat: két diák egyidejűleg dörzsölte az íjtest két oldalát, majd dörzsölés után egy harmadik diák kontakthőmérővel gyorsan megmérte az íj felületi hőmérsékletét. Kezdetben az íjtest felületi hőmérséklete 13,3 °C volt a bal és 14 °C a jobb oldalon. Dörzsölés után 23,5 és 24 °C volt a bal és jobb oldal. E közel 10 °C-os hőmérséklet-különbség azonban nem okozott lényeges változást a feszítési görbében. Ennek oka, hogy a kézi dörzsölés hatására szinte csak az íj legkülső rétege melegedett, mert az íj anyagai rossz hővezető-képességűek. Ez az eredményünk nem támasztja alá az *Odüsszeiában* leírt íjverseny azon értelmezését, hogy Odüsszeusz tapogatással, dörzsölgetéssel annyira fölmelegítette az íjat, hogy az megpuhult, és így föl lehetett ajzani.

4. ábra. A 18 fontos íj „hideg” feszítési görbéi 0, 1,5, 2, 2,5, 3 (és összehasonlításként 21) °C-on az 1. táblázat adatai szerint.



5. ábra. A 18 fontos íj „meleg” feszítési görbéi 63, 56, 44, 30, 21 és 17 °C-on. A 17, 21, 30 °C-on mért görbék gyakorlatilag egybeesnek.



Az íj hatásfokának meghatározása

Mikor egy íjat egy nyílvesző kilövésének céljából felhúzzunk, munkát végzünk az íjtest erejének ellenében. E munka az íjtestben tárolódik E_r rugalmas energia formájában, aminek egy része az m tömegű és v kezdősebességű nyílvesző

$$E_m = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

mozgási energiájára, mint célra fordítódik, másik része pedig az íjtest ágainak mozgási energiájává alakul, majd az íjat és a levegőt melegíti, miután disszipálódik. 7 nyílvesző együttes tömegének mérésével és 7-tel való osztással egy nyílvesző tömegére $m = 28,6$ gramm adódott. Egy kerítés ismert távolságú függőleges rácsai előtt kilőtt nyílvesző kezdeti mozgását egy 80 kép/másodperc sebességű kamerával vettük föl. Néhány egymást követő képpár kiértékelésével megkaptuk, hogy a nyílvesző $t = 1/80$ másodperc alatt $s = 44,5$ cm utat tett meg, ahonnan a vessző kezdősebességére $v = s/t = 35,6$ m/s = 128,2 km/h adódott. Így a kilőtt nyílvesző mozgási energiája $E_m = mv^2/2 = 18,12$ J.

A nyílsebesség meghatározására *Kövécsvé Levente* [1] egy általános iskolában vagy gimnáziumban elvégezhető, több, egyszerű mechanikai kísérletből álló olyan mérést javasolt, amely iskolai projektmunkaként adható ki diákoknak: lőjjük a nyílveszőt egy vízszintes aljzaton nyugvó, homogén, téglatest alakú, puha (például karton vagy szivacs) anyagú dobozba, egyik oldalára merőlegesen. Mérjük a nyílvesző dobozba hatolási mélységét és a doboz aljzaton való elcsúszási távolságát. Egy másik kísérletben ugyanezt a dobozt fonálra akasztva ballisztikus ingaként lógtatjuk függőlegesen, majd ugyanakkora sebességgel (amit az íj ugyanakkora húzáshosszával biztosítunk) belelőjük a nyílveszőt és mérjük az inga maximális kilendülési szögét. Mindkét kísérletre fölírva és megoldva az energiamegmaradás törvényét, végül megkapjuk a nyílvesző kezdősebességét.

Az íj hatásfokának számításakor befektetett energiának az E_r rugalmas energia számít, hasznos energiának pedig az E_m mozgási. Az íj

$$Q = \frac{E_m}{E_r} \quad (2)$$

hatásfoka megadja, hogy az íj rugalmas energiájának hányad része fordítódik a kilőtt nyílvesző mozgási energiájára. A rugalmas energia az $F(x)$ feszítési görbe alatti területtel arányos (1., 2., 4., 5. ábra). Mivel az általános és több középiskolában sem várható el a diákoktól, hogy analitikusan vagy numerikusan tudjanak integrálni, ezért a megnyúlást okozó, növekvő erőgörbe alatti terület meghatározását egyszerű tömegméréssel, majd arányossági számítással oldhatjuk meg: az íj $F(x)$ feszítési görbét egy papírlapra nyomtattuk, amiből kivágtuk az $F_{\max}(x_{\max})$ és x_{\max} oldalhosszúságú téglalapot, amit az $F(x)$ görbe mentén

két részre vágtunk. E két papírdarabot körülrajzolva átvittük egy egyenletes vastagságú és tömegeloszlású vastagabb farostlemezre, amiből szintén kivágtuk a feszítési görbének megfelelő két alakzatot, amelyek tömegét digitális konyhai mérlegen mértük. Ezután a feszítési görbe alatti területet, vagyis az íj rugalmas energiáját a következőképpen kaptuk:

$$E_r = \frac{F_{\max} x_{\max} G_a}{G_a + G_f} = 57,645 \text{ J}, \quad (3)$$

ahol G_a és G_f az $F(x)$ görbe alatti és fölötti területrészt súlya. A vizsgált 40 fontos íj hatásfoka $Q = E_m/E_r = 18,12/57,645 = 31\%$ -nak bizonyult, míg a 27 fontos íjé 32,5% volt.

Odüsszeusz íjlegendájának értelmezése méréseink tükrében

Mi 18, 27 és 45 fontos íjakat vizsgáltunk. A honfoglaló magyarok íjai legföljebb 50 fontosak lehettek a lóról való könnyű nyilazást elősegítendő, a később használt ősi íjak pedig 60-70 font körüliek voltak [2]. Az ilyen erős íjakat csak nehezen lehetett felajzani. Erre utal az Odüsszeusz-féle íjlegenda is. Régészeti leletekben sok olyan emberi csontváz bukkan föl, amelyek gerince elferdült [2]. Ők gyermekkoruk óta íjászok voltak, nehezen felajzható íjakkal, mindig ugyanazon kezükkel feszítve a húrt. Az aszimmetrikus terhelés okozta gerincferdülésüket.

A régi íjak agancsból/szaruból és/vagy fából készültek, és az agancs/szaru részeik hőre lágyultak [2–5]. Manapság gyakran rétegelt lemezek alkotják az íjtestet, aminek az íjász felőli oldalán szaru, míg másik oldalán szarvasín fokozza a rugalmasságot. A régi fajjakat gyantázták, s a gyanta megrege lágyult, miáltal könnyebbé vált a felajzásuk, de a túl magas hőmérséklet már káros volt. Az íj húrját régebben állati ínból vagy emberi hajból sodorták, ami a hőmérséklet növekedésével nyúlik. A modern húrok azonban gyakorlatilag nem nyúlnak -5 és $+40$ °C között. A különböző anyagösszetevőkből készült íjtest dinamikai sajátsága (feszítési görbéje) nem mindig monoton változik a hőmérséklettel az eltérő hőviselkedésű alkotóanyagoknak köszönhetően (3. ábra).

Az íjászok is jól ismerik a filmművészetből származó legendát, hogy Odüsszeusz tűzön melegítette az íját felajzás előtt. Ennek az adhat értelmet, hogy az íjtest renyhébbé, könnyebben felajzhatóvá válik melegítés hatására. A felajzott íj lehűléskor visszakeményedhet, és így nagyobb kezdősebességgel lőheti ki a nyílveszőt, a célpont nagyobb sérülését okozva. Viszont ilyen lánggal történő íjmelegítés csak egyes Odüsszeusz-filmekben szerepel, de mint cikkünk elején láttuk, az eredeti *Odüsszeia* nem tartalmaz ilyet. Egyes filmadaptációkban Odüsszeusz a már felajzott íj testét melegíti lánggal. Ennek nem látjuk sok értelmét, ha az íj hőre lágyulva gyengül, hiszen a felajzott melegített íjjal löve kisebb kezdősebességgel repül ki a nyílvesző,

mint egy hidegebb és ezért erősebb íjból, ugyanakkora húzáshossz mellett. A versben csak az íj kézzel való dörzsölgetése, simogatása és tapogatása szerepel. Így viszont csak mintegy 10 °C-kal lehet fölmelegíteni az íjtest külső rétegét, ami méréseink szerint alig változtatja meg a feszítési görbét, mert az erő zömét szolgáltatató mélyebb rétegek hőmérséklete nem változik az íjtest rossz hővezető-képessége miatt. Vagyis egy erős íj kézi melegítéssel alkalmasint nem gyengíthető meg annyira, hogy ez jelentősen könnyíthetné a felajzást. Ezért továbbra sem tiszta, hogy Odüsszeusz íjának tapogatása, simogatása mennyiben és miért segítette, könnyítette a felajzást.

Egyes filmadaptációkban Odüsszeusz a már felajzott íj húrját simogatja. Ez lehet (i) lövés előtti sztereo-típ kézmozdulat, vagy (ii) szolgálhatja a húr tisztogatását (például portalanítását), illetve (iii) bőrszírral való bekenését a feszítő ujjak és a húr közti súrlódás növelése érdekében. A húr dörzsölgetése kissé és rövid ideig fölmelegítheti a húr, némileg megnyújtva azt. Ennek sem látjuk értelmét, mert amíg a melegebb húr hosszabb, mint eredetileg a hidegebb, addig adott húzáshossz mellett kisebb az íj röpitő ereje, ami nem lehet cél, mert csökken a kilőtt nyílvevessző kezdősebessége.

A fenti értelmezéseink csak akkor helytállóak, ha az íj dinamikája monoton változik a hőmérséklettel. Azonban azt tapasztaltuk, hogy 40 és 3 °C körül kissé legyengülnek a vizsgált íjaink, csökken a feszítőerejük (3. ábra, 1. táblázat), vagyis dinamikájuk nem monoton változik a hőmérséklettel. Ennek egyik következménye, hogy 40 és 3 °C körül könnyebb felajzani az íjat, mint más hőmérsékleteken. A filmek szerinti lánggal való melegítéssel elérhető az íjtest 40 °C hőmérséklete, de a vers nem erről szól. A 3 °C-ra lánggal történő melegítés pedig csak fagyott íjtest esetén jöhetne szóba, de a vers szerint az ithakai íjverseny nem fagyponthoz közelében zajlott le, ami egyébként sem jellemző görög földre. Ha az íjversenykor mégis fagyponthoz közel hideg uralkodott Ithakában, akkor a hideg íjat kézzel dörzsölve, simogatva, tapogatva fölmelegíthető 3 °C-ra, amikor Odüsszeusz könnyeben ajzhatta fel az íjat. Ez az egyetlen fizikailag elfogadható, íjmechanikai méréseinkkel alátámasztható értelmezése a versben írtaknak.

Mi volt a fontos Odüsszeusz íjazásakor? A célzás pontossága bizonyosan, hogy el tudja találni a nyílvevesszővel a fejszesor fokait. A pontosságot nem befolyásolja a felajzás módja. Ugyancsak fontos a nyílvevessző nagy kezdősebessége, vagyis a felajzott íj nagy ereje, hogy a sebesen haladó vessző jól tartsa az irányát, mialatt áthalad a fejszék fokán. A felajzott íj erejét általában csökkenteni a bármilyen módon történő melegítés, főleg 3 és 40 °C körül. De a legfontosabb, hogy az íjat egyáltalán fel lehessen ajzani. Ezt bizonyosan megkönnyíti az íjtest 3 vagy 40 °C körüli hőmérsékletre történő fölmelegítése kézi dörzsöléssel vagy lánggal. Az előbbinek csak fagyponthoz közel van értelme, az utóbbi pedig kézzel nem, csak tűzzel kivitelezhető.

Marad tehát némi bizonytalanság az Odüsszeusz-féle íjversenyről szóló versrészlet fizikai értelmezésében. Méréseinkkel azonban néhány filmadaptációbeli hibára felhívtuk a figyelmet, és behatároltuk azon hőmérséklet-tartományt, ahol fizikailag jól értelmezhető a versrészlet. Méréseink kivitelezését az *Odüsszeia* inspirálta, s mindez fölkeltheti a diákok érdeklődését a fizika iránt. Persze tudatában vagyunk annak, hogy modern íjakat vizsgáltunk és nem az ókori görögök által használtakat. De Odüsszeusz íjának anyagáról végképp semmi információt nem tartalmaz az íjversenyt leíró versrészlet. Iskolai fizikai mérési projektünk mellékes haszna a kutató diákok kreatív ötleteiben, kitartó méréseikben, mérési jegyzőkönyveikben, ok-okozati összefüggések keresésében, az elméleti ismeretek gyakorlati alkalmazásában és a fizikai törvények érvényességi korlátaival történő szembesülés megélésében nyilvánul meg.

Irodalom

1. Kövecés Levente: *A fizika alkalmazása az íjazásban néhány íjmechanikai probléma megoldásában*. B.Sc. Diplomamunka, ELTE TTK, Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium, Budapest, 41 o. (2015), témavezető: Horváth Gábor.
2. Szöllösi Antal: *Nyílegyenesen*. Magánkiadás, Gödöllő, (2004).
3. Sebők Attila: *Az íjazás és a test nevelése*. Szakdolgozat, Testnevelési Főiskola, Küzdősportok Tanszék (1993), bíráló: Kun László.
4. Szöllösy Gábor: Mennyivel voltak jobb íjaik a honfoglaló Magyaroknak, mint a korabeli Európa más népeinek? *Keletkutatás* 1995/6sz, 37–51.
5. Mark Denny: Bow and catapult internal dynamics. *European Journal of Physics* 24 (2003) 367–378.

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY



A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41

GYŐZZÖN A JOBB! – VITAINDÍTÓ

Természettudományos oktatásunk eredményességét a hazai innováció és szakmódszertan eredményeinek felhasználásával növelhetjük

Az Európai Unióban jelenleg ezer főből átlag háromszor annyian rendelkeznek természettudományi végzettséggel, mint hazánkban. Gazdasági érdekünk, hogy felzárkózzunk és ismét észszerű harmóniát alakítsunk ki az egyes képzési területek között.

Sajnos az elmúlt 15-20 évben Magyarországon fokozatosan visszaszorult a természettudományos tárgyak oktatása, ami megmutatkozott az óraszámok megfogycsökkenésében és a tantárgyak szerepének kisebbedésében is az érettségi és felvételi vizsgákon. Az intézkedések hatására a fizikatanárok jelentős része feleslegessé vált. Az intézkedések egyenes következményeként csaknem nullára esett a fizikatanárok képzése is. Volt, ahol még a fizikasertárt is felszámolták. A presztízsveszteség és az óraszámcsökkentés miatt a természettudományok súlya visszaesett, s a fizika és a természettudományos tantárgyak egyre inkább a diákok által nem kedveltek közé kerültek. Eközben eltűntek a szemléltető eszközök készítésével és a kísérletekkel kapcsolatos pályázati kiírások, a hazai természettudományos könyvkiadás is megcsappant. Ezzel párhuzamosan gomba módra megszaporodtak az áltudományos kiadványok.

Kísérletező tanárként megfelelő szertár hiányában rákényszerültem arra, hogy saját környezetem tárgyait használjam fel szemléltetésre tantárgyaim (matematika és fizika) oktatására. Lehetőségeim korlátozott volta idézte elő, hogy eszközeim ugyan igen egyszerűek voltak, mégis bámkulatosan sok mindent tudtam szemléltetni általuk, pedig előállításuk költsége töredéke volt annak, mint amennyibe a tanszergyártók szemléltető eszközeinek megvásárlása került volna. Rájöttem arra, hogy a saját előállítású szemléltető eszközök egyszerűsége egyáltalán nem hátrány, hanem jelentős didaktikai előny, hiszen a tanulók többnyire még könnyebben megértik a segítségükkel szemléltetett jelenségeket. Ennek ellenére a tanszergyártók nem vállalkoztak gyártásukra. Világossá vált, hogy az eszközgyártók számára az eszközök didaktikai hasznánál is fontosabb szem-

pont – saját fennmaradásuk érdekében is – az eszközök forgalmazásából eredő profit. Ezzel szemben a tanulók és az eszközöket felhasználó tanárok elsősorban az eszközök felhasználhatóságát – didaktikai hasznát – becsülik.

Megállapíthatjuk, hogy *az eszközök jósága és a hazai oktatás eredményessége nem a gyártók eszközök után kapott profitjával arányos, ezért elemi érdekünk, hogy a tanítási anyag elsajátítása a lehetőleg legjobb eszközök által történjen. Ezt úgy lehetne elérni, ha a méregdrága külföldi szemléltető eszközök beszerzése előtt azok hasznát összevetnénk a hazai innováció kínálta eszközökkel. Győzzön a jobb!*

1844-ben Kossuth Lajos Védegyletet alapított a hazai ipar segítése érdekében. Azt hiszem *évtizedekre visszanyúló hiba a hazai szakmódszertan fejlesztésének elmaradása és a hazai szemléltető eszközök figyelmen kívül hagyása, amit – reményeim szerint – egy nemzeti elkötelezettségű politikai vezetésnek mielőbb orvosolnia kell.* Valószínűleg nem vagyok egyedül, aki úgy látja, hogy *e szakmódszertan számára kiemelten fontos területen a hazai innovációra nem irányul kellő figyelem.*

Ennek számos következménye van, amelyek közül néhányra felhívom a figyelmet:

1. Mindennapos tapasztalat, hogy *az ember ismereteinek legnagyobb hányadát (80-90%-át) a leggyorsabban és leghatásosabban vizuálisan szerzi meg. Ha tehát időt akarunk nyerni az időhiány miatt káros módon kihagyott ismeretek tanítására, a szövegolvasásra és a feladatmegoldásra is, akkor ennek egyetlen lehetséges módja ha nagyobb energiát fordítunk az elmaradhatatlan szemléltetésre és a kísérletek bemutatására.* Saját gyakorlatomban megtapasztaltam, hogy az időzavaron egyszerű, de látványos kísérletekkel kerekedhetek felül, s csak így maradhat időm arra, hogy matematika- és fizikaóráimat színessé, vonzóvá és szórakoztatóvá tegyem.

Az egyszerűség további előnye, hogy *egyes eszközöket a tanulók maguk is elkészíthetnek. A tanulók által – egyszerű anyagokból (például papír, szívószál, fa, műanyag stb.) – házilag elkészített eszközök a népszerű interaktív eszközök közé sorolhatók, amelyek a használat során több érzékszervünkkel is megtapasztalhatók. Miközben a diák játszik az eszközökkel, számára szinte észrevétlenül és játékosan saját-*

A *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottsága az 1972-ben meghirdetett VÉLEMÉNYEK sorozatát tovább folytatja ez évben is. A szerkesztőbizottság állásfoglalása alapján „a *Fizikai Szemle* feladatát vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatásra és fizika oktatására vonatkozó véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem”. Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóink, várjuk a magyar fizikusok leveleit.

títja el az ismereteket. Előnyös lehet a szemléltető eszközök játékos alakíthatósága, ami hozzájárulhat a térszemlélet, s esetleg a mozgáskoordináció fejlesztéséhez is.

Ide illik az évezredes kínai bölcsesség felidézése: „Hallom és elfelejtem, látom és elbiszem, csinálom és megértem”,¹ ami jól kifejezi, hogy a tanulási folyamatban a szemléltetés mellett, a tanuló aktív részvétele is rendkívül jelentős.

2. A külföldről vásárolt szemléltető eszközök költséges volta jelentős anyagi terheket ró a magyar államra és megakadályozza a szükséges szemléltető eszközök megfelelő mennyiségben való beszerzését. Befektetéseink előtt ezért is érdemes figyelembe venni az évtizedek óta mostohán kezelt hazai innováció kínálatát, figyelembe véve, hogy az egyszerűbb szemléltetés lehetősége nem csak azzal jár, hogy a szemléltetés sokkal olcsóbbá válik, hanem számos esetben elősegíti az eszközzel elsajátítható ismeretek gyorsabb és mélyebb megértését is. Ezen túlmenően az egyszerű eszközökkel – időnként – számos olyan tudnivalót és jelenségcsoportot is szemléltethetünk, amire a bonyolult és drága eszközök – gyakorta – lehetőséget sem adnak. Válasszuk tehát a jobbat, különösen, ha az többet tud és olcsóbb is! Ezzel növelhető hazai iskoláink szertárainak ellátottsága, azokat jelentős versenyelőnyhöz segítve. Az importeszközök behozatala mellett, a versenyképes hazai termékek révén előbb-utóbb mi is exportálhatnánk szemléltető eszközöket.

Javaslom szakértő bizottságot (újítási bizottságot) létrehozni a hazai innováció elősegítésére és felkarolására! Meggyőződésem, hogy a hazai eszközök gyártása kigazdálkodható volna azon eszközök árából, amelyeket hazai termék híján külföldről veszünk meg, s akkor még nem is említettem az oktatás segítségéből fakadó hasznot. Minderre azért is szükség van, mert csak úgy tudjuk csökkenteni elmaradásunkat a külföldtől, ha a szolgai utánzás helyett bizonyos dolgokat jobban csinálunk, mint azt határainkon kívül teszük.

3. A hazai szakmódszertan fejlődéséhez támogatásra is szükség van. Az utóbbi 10-15 évben elfelejtődtek a szemléltető eszközök készítését elősegítő pályázatkiírások, illetve a pályázók közül kizárták a nagy tapasztalattal rendelkező idősebb, illetve nyugdíjas korúakat. Ez az indokolatlan és demokratikusnak sem nevezhető szűkítés gazdasági hátrányokkal jár, s csökkenti versenyképességünket. Avagy az ötlet milyensége életkorhoz kötött? Az idősebb generáció által alkotott kiváló eszközökre és tapasztalataikra nincs szükségünk? Miért ne lehetne a nagyobb tapasztalattal rendelkező idősebb korosztálynak is hasznosítható ötlete!

Sajnálatosan megfogytakozott az ismeretterjesztő természettudományos könyvek kiadása, miközben

túlburjánzanak az áltudományos kiadványok. Véleményem szerint az oktatáspolitikai nem szemléltetheti tetlenül ezt a folyamatot.

4. A hazai innováció figyelmen kívül hagyása miatt egy sor hasznos lehetőséget engedünk el magunk mellett. Megemlítem például, hogy a kereskedelmi forgalomból napjainkban kiszoruló katódsugaras televíziókészülékek segítségével a mágnességet minden más módszernél teljesebben és esztétikusabban (színesen és dinamikusan) lehetne szemléltetni. Ezt világszerte számos tudományos bemutatóközpontban (science center) megteszik. Kár erről lemondani.

Más példát említve egyes, a kereskedelmi forgalomból kivont, de kísérleti célra megfelelő szívószál-típusok újra gyártása révén olcsó és kiváló szemléltető eszközök készítésével segíthetnénk valamennyi iskolánk matematika- és fizikaoktatását.

Hasonló eszközök bevonásával ismét érdekessé és vonzóvá tehetnénk természettudományos oktatásunkat. Ez nem csoda, hiszen a természettudományok tele vannak szép és izgalmas jelenségekkel. Bizonyítják ezt olyan iskolán kívüli intézmények, mint a Csodák Palotája vagy a hozzá hasonló intézmények. Némi átgondolt támogatással a fizikaoktatás minden iskolában létrehozhatná a maga hasonló helyi csodáit. Így iskoláink természettudományos szempontból ismét jól képzett diákokat bocsáthatnának útjukra, akik nélkül hosszú távon az ország gazdasági fejlődése elképzelhetetlen.

Tömören összefoglalva a szükséges teendőket: a szakmódszertanra figyelő, de tökeszegény tanárokat segíteni kell céljaik megvalósításában. Szakítani kell azzal a szemlélettel, hogy hasznos és szükséges oktató és tudományos tevékenységeket (beleértve a szakmódszertant is) ingyen, támogatás nélkül, saját zsebből kell végezni (cikkírás, könyvkiadás, szemléltetőeszköz készítés stb.).

Úgy tűnik, hogy ezen – a hazai gazdaságot is érintő – célok megvalósításához és a hazai döntéshozó szervezetek meggyőzéséhez a természettudományos szervezetek egységes kiállítására és összefogására is szükség van.

Okkal, mert ez nem lehet csak nekünk fontos. Egy európai összehasonlításban szegény országnak, amely korábban tiszteletet vívott ki a fizika és a természettudományok tanítása terén elért eredményeivel, gazdaságilag is jelentős megtakarítást jelentene a hazai újítások alkalmazása.

Lovász László, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke egy riport során lényegre mutatónan megfogalmazta, hogy „fontos a szakmódszertan kutatása”. Bölcs intelme valószínűleg sok tanártársamnál is visszhangra talált. Ezért kérjük és várjuk a Fizikai Szemle olvasóitól, hogy írják meg előrevivő javaslataikat és elképzeléseiket a természettudományos oktatás megújításának elősegítésére!

Márki-Zay János
matematika és fizika szakos tanár

¹ Konfucius, kínai közmondás.

HÍREK ITTHONRÓL

Rátz tanár urak nélkül nincs felemelkedés

2015. december 8-án immár tizenötödik alkalommal adták át a Rátz Tanár Úr Életműdíjakat a Magyar Tudományos Akadémia dísztermében. Az Ericsson Magyarország, a Graphisoft SE és a Richter Gedeon Nyrt. által létrehozott Alapítvány a Magyar Természettudományos Oktatásért évente díjazza két-két matematika, fizika, kémia és biológia szakos középiskolai tanár kiemelkedő munkásságát tantárgya népszerűsítésében és a fiatal tehetségek gondozásában elért eredményeiért. A jubileumi díjátadón – az alapító cégek képviselői mellett – ünnepi beszédet mondott *Czúnyiné dr. Bertalan Judit* köznevelésért felelős államtitkár. A Rátz Tanár Úr Életműdíj a reálszakos tanári pálya társadalmi elismertségének és anyagi megbecsülésének ösztönzése mellett az elmúlt 15 év során a hazai természettudományos oktatás és egyben a közoktatás egyik legrangosabb elismerése lett.

Amikor világhírű, magyar származású tudósainkkal büszkélkedünk, talán méltatlanul kevés szó esik tanáraikról. *Rátz László* a legendás Fasori Gimnázium tanára volt és többek között *Neumann Jánost* és *Wigner Jenőt* indította el pályáján a világhír felé. Az alapítvány az ő nevét választotta, hogy adózzon nagy múltú és kiváló oktatási kultúránk előtt és méltányolja azon pedagógusainkat, akik ma is áldozatos szakmai munkájukkal és kiemelkedő eredménnyel képzik a jövő tehetségeit.

„Mindannyian tudjuk, hogy a mérnökképzés nem az egyetemen kezdődik, a valódi tudás erős alapokra építkezik, amely már a közép- és az alapfokú oktatásban elkezdődik. Az Ericsson Magyarország közel 2000 munkatársa nagyrészt mérnökökből áll, így a vállalat elemi érdeke, hogy a magyar mérnökképzés és az azt megalapozó természettudományos képzés megtartsa jelenlegi színvonalát. A pedagógus életpályamodellel és a természettudományos pedagógusok munkájának megbecsülése elemi érdeke valamennyiünknek.” – hangsúlyozta *Éry Gábor*, az Ericsson Magyarország vezérigazgatója.

„Piaci sikerünk elsősorban azon múlik, hogy mennyire tehetséges fiatal kutatókat, mérnököket tudunk alkalmazni. Ezt a forrást pedig csakis a magyar természettudományos oktatás tudja számunkra biztosítani, ezért tehát alapvető érdekünk ennek ápolásához és fejlesztéséhez erőnkhez mérten hozzájárulni.” – emelte ki *Bojár Gábor*, a Graphisoft SE Igazgatótanácsának elnöke.

„A »magyar szürkeállomány« adta páratlan lehetőségeket aligha lehetne konkrét haszonra fordítani megfelelő szakember-utánpótlás nélkül. A természettudományos oktatás, a képzés magas színvonala, a tanárok

szerepe kulcskérdés. A természettudományos tárgyak tanításával foglalkozó szakemberek felelőssége óriási a jövő sikereinek szempontjából. Anyagi, társadalmi, erkölcsi megbecsülésükre áldozatos, odaadó munkájuk okán is kiemelt szükség van.” – tette hozzá *Bogsch Erik*, a Richter Gedeon Nyrt. vezérigazgatója.

2015. Rátz Tanár Úr Életműdíjas fizikatanárai

Honyek Gyula fizikus diplomájának megszerzése után 1975-től az Eötvös Loránd Tudományegyetemen végzett oktatói, kutatói munkát. A kiegészítő tanári szak elvégzése után 1985-től először az ELTE Trefort Ágoston Gyakorlóiskolában, majd az ELTE Radnóti Miklós Gyakorlóiskolában végezte tanítói hivatását. Irigylésre méltó életművel rendelkezik, tevékenysége sokszínű és szerteágazó.

Tanári munkájában kezdettől fogva kereste a tanulókkal való foglalkozás, együttműködés különböző formáit. Sikeres kutató fizikus: több mint 20 cikk szerzője a kísérleti fémfizika területéről. Komoly szaktudásával példát mutatva és színvonalas, következetes oktató munkájával diákok százaival szerezte meg a fizikát.

Pontossága, rendszeretete, igényessége kiemelkedő. Munkáját egyaránt a felelősségtudat és a tudomány, az iskola iránti elkötelezettség jellemzi.

Termékeny tankönyvíró, a Sulikom 3 kötetes és a Calibra Könyvek 4 kötetes fizika tankönyvsorozatok, valamint a *123 Furfangos Fizika Feladat* példatár társszerzője. Idegen nyelvű kiadványa, a *200 Puzzle Physics Problems* japán, kínai, orosz fordításban is megjelent. A közelmúltban adták ki *333 Furfangos Feladat Fizikából* című gyűjteményét.

Igényes feladatkitűző, feladatai az országos fizika-versenyeken többek között a Mikola- és Eötvös-versenyen, OKTV-n is megmérették a diákokat. Számos publikációja jelent meg a *Középfiskolai Matematikai és Fizikai Lapokban*. Tanítványai minden évben fényesen szerepeltek a legkülönbözőbb tanulmányi és tehetségkutató megmérettetésekben. Közülük is kiemelkedett



Halász Gábor, aki 2005-ben és 2006-ban aranyérmes volt a Nemzetközi Fizikai Diákolimpián, az egyik évben abszolút első, a másikkban a világ második legjobb versenyzőjeként. Honyek tanár urat a tanítványok eredményei az ország legjobb fizikatanárai közé emelik.

Mező Tamás a József Attila Tudományegyetem Természettudományi Karának kémia-fizika tanári szakán szerezte meg egyetemi diplomáját, majd nyolc éven át a Szegedi Orvostudományi Egyetem Radiológiai Klinikáján fizikusként dolgozott. Az egyetemi doktori diplomát biofizikából, illetve radiológiából szerezte.

1988 augusztusa óta a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium és Általános Iskola tanára. Munkáját szakmai és pedagógiai feladataival kapcsolatosan is nagy lelkesedéssel végzi. Segítőkézsége, lelkiismeretes, odaadó munkája eredményeként kollégái érdekvépviseletükkel bízták meg. Szívesen gondolja a pályakezdő pedagógusok útkeresését, tanácsaival, péld-



damutatásával segítve őket a szakma elsajátításában. Felkészültsége és emberi tulajdonságai alapján nem véletlen, hogy pedagógiai, nevelő-oktató munkája eredményessége nemcsak a gimnáziumon belül, de országos szinten is jelentős.

Az elmúlt években egyik legeredményesebb felkészítő tanára a Szegedi Tudományegyetem által országosan meghirdetett Budó Ágoston fizikaversenynek. Hosszú évek óta nagyszámú tanítványa sikeres a Nemzetközi Fizikai Diákolimpiákon, a Nemzetközi Junior Természettudományos Olimpiákon, az Eötvös- és Mikola-versenyeken, az Öveges József Emlékversenyeken, valamint az Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyeken. Diákjai – szép eredményeket elérve – folyamatosan részt vesznek a *KöMaL* különböző pontversenyeiben is. 2004 óta tagja a Mikola Sándor és a Vermes Miklós Tanulmányi Versenyek szervezőbizottságának. Színvonalas tevékenységének köszönhetően harmadik éve ő állítja össze a Vermes Miklós verseny mechanika feladatsorát.

Tankönyvszerzőként is aktív tevékenységet folytat. Megjelent sorozata *Út a tudáshoz* tankönyvcsalád, valamint a *Mindennapok tudománya*, *FIZIKA* tankönyv az új kerettantervnek megfelelően.

Mező Tamás – aki az idei évtől mestertanár – nemcsak szűkebb környezete, de az ország szakmai közössége szerint is hazánk egyik legkiválóbb pedagógusa, fizikatanára.

Science on Stage Hungary 2016 fesztivál – jelentkezési felhívás

Megnyílt a jelentkezés a 2016. október 7–9. között, Debrecenben, az Agórában megrendezésre kerülő *Science on Stage Hungary 2016* fesztiválra, ahol általános és középfokú oktatásban tanító biológia-, kémia-, fizika-, matematika- és informatikatanárok, valamint óvodai nevelők mutatják be egymásnak innovatív és kreatív kísérleteiket, legjobb oktatási gyakorlataikat. Várjuk végzős tanárszakos hallgatók jelentkezését is, határidő: *2016. április 11.* A fesztivál szórólapja letölthető a <http://szinpadon-a-tudomany.hu/wp-content/uploads/2016/01/flyer2016.pdf> címről, a jelentkezési lap pedig a <http://szinpadon-a-tudomany.hu/wp-content/uploads/2016/01/sons2016.doc> címről.

A 2017-es debreceni nemzetközi *Science on Stage* fesztiválon kivételesen 70 hazai tanár 40 projektje vehet majd részt, hiszen mi leszünk a vendéglátó ország. Ezért a „válogató” *Science on Stage Hungary 2016* fesztiválra összesen legalább 100-120 projektet várunk! Pályázhatnak általános és középfokú oktatásban résztvevő tanárok és végzős tanárszakos hallgatók (akiknek 2017. július 1-jén már meglesz a tanári diplomájuk) matematika, fizika, kémia, biológia és informatika szakterületekről, valamint óvodapedagógusok.

A FESZTIVÁL VEZÉRTÉMÁI

Ajánlott, hogy a projektek a felfedezésen alapuló tanulási módszert (inquiry based learning) használják.

Tudomány a legfiatalabbaknak – Óvodai és általános iskolai projektek.

Természettudomány és környezet – Projektek, amelyek környezeti, egészségi és fenntarthatósági kérdéseket vizsgálnak.

IKT a természettudományok tanításában – Projektek, amelyek információs és kommunikációs technológiákat használnak az osztályban.

Befogadó természettudomány – Természettudományos projektek, amelyek szociális-gazdasági, nemi és kulturális egyenlőtlenségekkel foglalkoznak.

Együttműködés az oktatásban – Projektek, amelyeket iskolák az iparral, vagy egyetemekkel együtt dolgoztak ki.

Alacsony költségű tudomány – Egyszerűen, olcsón, hétköznapi eszközökkel bárki által megvalósítható projektek.

Közös projektek – Különböző országok pedagógusai által közösen megvalósított projektek. A partnerek közül legalább az egyik részt kellett vegyen egy korábbi Science on Stage fesztiválon. Jelentkezési lap: www.science-on-stage.eu.

A Science on Stage Hungary weblapján – <http://szinpadon-a-tudomany.hu> – sok további információ található a Science on Stage mozgalomról, a múlt nemzetközi fesztiváljairól és az ezévi hazai fesztivál folyamatosan frissülő híreiről.

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira

Az ELFT Díjbizottsága jelöléseket, illetve pályázatokat vár a Társulat 2016. évi kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira. Kérjük a Társulat szakcsoportjait, területi csoportjait és valamennyi tagunkat, hogy a kitüntetésre érdemes kollégákat és tudományos eredményeiket bemutató **javaslataikat legkésőbb 2016. március 25-ig** szíveskedjenek eljuttatni a Társulat titkárságára (1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint 3.). A tudományos díjakat a kutatók saját kezdeményezésükre is megpályázhatják.

A Társulat elnöksége 2015. január 14-i ülésén pontosította az egyes Társulati díjakkal elismert tudományos teljesítmények jellegét. Meghatározta azokat a hosszabb időszakban végzett, egyenletesen magas színvonalú tevékenységet elismerő díjakat, *amelyek kiegészítik a tudományos kiválóságnak az MTA doktora címmel történő elismerésébe tartozó kört*. Mellettük definiálta a kutatói pálya kezdeti (az MTA-doktor cím elnyerése előtti) szakaszán elért, tematikusan jól körülhatárolt eredményeket elismerő díjak körét. Megfelelően módosította a két körbe tartozó jelölések/pályázatok benyújtására szolgáló adatlapokat, a díjak jellegéhez igazította az előírt mellékleteket. Immár legendó a mellékletek nagy részének nyilvános (speciális esetben a Díjbizottság tagjaira korlátozott) adatbázisokból történő elérhetősége.

Az adatlapok letölthetők az ELFT honlapja (<http://www.elft.hu>) díjszekciójából, ahol egyben az elbírálási eljárás részleteire vonatkozó ismertetés is megtalálható. Kérjük, hogy a jelölések megfogalmazásában vegyék figyelembe az ismertető információit. Az ismertetés minden díjat hozzákapcsol legalább egy szakcsoport kutatási területéhez, amely szakcsoport ajánlásának beszerzése ajánlatos, de nem kötelező. A tudományos díjak elnyerésének nem előfeltétele a társulati tagság.

A társulati kitüntetéseket és a tudományos és felsőoktatási díjakat a Társulat 2016. május végi Küldöttközgyűlése keretében, valamint az augusztusi Vándorgyűlésen ünnepélyesen osztjuk ki.

Társulati kitüntetések

Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem adományozható a Társulat azon tagjának, aki a fizika területén hosszú időn keresztül folytatott kutatási, alkalmazási vagy oktatási tevékenységet, valamint a Társulatban kifejtett munkásságával kiemelkedően hozzájárult a fizika hazai fejlődéséhez.

Prométhéusz éremmel „A fizikai gondolkodás terjesztéséért” tüntethető ki az, aki a fizikai műveltség terjesztéséhez országos hatással hozzájárult.

Eötvös Plakett elnevezésű emléktárgy adományozható annak a társulati tagnak, aki hosszú időn keresztül aktív társadalmi munkával járul hozzá a Társulat egészének vagy valamelyik csoportjának, szakcsoportjának eredményes működéséhez; olyan személynek, aki társadalmi munkában vagy egyéb módon rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat célkitűzéseinek megvalósításához; neves külföldi vendégnek a Társulat valamely rendezvényén tartott előadása alkalmából.

A két éremre a Társulat Elnöksége tesz javaslatot a Küldöttközgyűlés felé, a plakettekről az Elnökség dönt és arról a Küldöttközgyűlést tájékoztatja.

Tudományos és felsőoktatási díjak

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az alábbi tudományos, illetve felsőoktatási díjakat adományozhatja:

Marx György felsőoktatási díj „A fizika felsőfokú (egyetemi és főiskolai) oktatásában és a tanárképzésben sok évtizedes kiemelkedő alkotó- és nevelőmunkáért”;

Bozóky László-díj „A sugárfizika és a környezet-tudomány területén hosszú időn át végzett magas színvonalú munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”;

Bródy Imre-díj „Magas színvonalú elvi megfontolásokkal a fizika alkalmazási területén hosszú időn át végzett színvonalas munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”;

Selényi Pál-díj „Az alapvető jelenségek kísérleti vizsgálatában, továbbá azokon alapuló technikai eszközök nagy eredetiségű fejlesztésében hosszú időn át végzett magas színvonalú munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”;

Budó Ágoston-díj „Az optika és a molekulafizika területén, elsősorban kísérleti vizsgálatokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó kiemelkedő eredményért”;

Detre László-díj „A csillagászatban, valamint bolygónkkal és annak kozmikus környezetével foglalkozó fizikai kutatások területén elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó kiemelkedő eredményért”;

Gombás Pál-díj „A kvantumelmélet atom- és molekulafizikai alkalmazásában, továbbá a statisztikus fizikában végzett elméleti kutatásokkal elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Gyulai Zoltán-díj „A szilárdtestek és a kondenzált anyag fizikájának kísérleti módszerekkel történő kutatásában elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Jánossy Lajos-díj „A nagyenergiás fizika (kozmosz sugárzás, részecskefizika és nehézion-fizika) kísérleti kutatása és a kísérleti eredmények fenomenologikus értelmezése területén elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Novobáczky Károly-díj „Az elméleti fizikai kutatásokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Schmid Rezső-díj „Az anyag molekuláris szintű szerkezetét felderítő, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Szalay Sándor-díj „Az atom- és atommagfizikában, illetve ezek interdiszciplináris alkalmazási területén elért, jelentős nemzetközi figyelmet kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Szigeti György-díj „A lumineszcencia és félvezető kutatásokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”.

Újfalussy Balázs
főtítkár

Kamarás Katalin
a Díjbizottság elnöke

SAJTÓKÖZLEMÉNY

Befejeződött a tizedik, jubileumi CERN-i továbbképzés 40 magyar fizikatanár részére

Tizedik alkalommal szervezte meg az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 40 magyar fizikatanár számára az egyhetes, CERN-i továbbképzést 2015. augusztus 14. és 23. között. A tanárok az egyhetes továbbképzés alatt előadásokat hallgattak, meglátogatták a CERN gyorsítóit és azokat a detektorokat, amelyek a Higgs-részecske felfedezéséhez is vezettek, továbbá működő ködkamrát és kozmikus részecskéket érzékelő elektronikus detektorokat építettek, valamint egyéb fizikai kísérleteket is végeztek. Az augusztusi továbbképzésről képekkel is illusztrált írásbeli beszámolókat készítettek. A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap támogatásával is végrehajtott projektet 2015. december 5-én egy záró rendezvényen közösen értékelték a résztvevők és a CERN-i kutatócsoport vezetője, Horváth Dezső professzor Budapesten, az Elektrotechnikai Múzeumban.

Magyarország 1992 óta tagja a svájci székhelyű CERN-nek, a világ legnagyobb nagyenergiájú fizikai kutatóintézetének. A kutatói utánpótlás biztosításának és a tehetségek felkutatásának és kinevelésének érdekében a CERN már évek óta különös figyelmet fordít a középiskolai diákokra és a fizikatanárokra. Felismerve, hogy az angol nyelv sok esetben akadályt jelent a fizikatanárok többségénél a helyszínen meghallgatott előadások megértésében, ezért 2005-ben a CERN elhatározta, hogy egy újszerű tanár-továbbképzési programot indít 2006-tól. Ennek keretében a tagországok tanárainak egy nagyobb csoportja (30-40 fő) egyhetes továbbképzési programon vehet részt, amely az illető ország nemzeti nyelvén folyik. E tanár-továbbképzési programnak három eleme van: előadások, laboratóriumi látogatások és kiscsoportos, önálló munka.

Hazánk fizikatanárait tömörítő Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöksége felvállalta, hogy megszervezi a magyar középiskolai tanárok részvételét egy ilyen programban. **2006-ban** – a CERN tagországok között elsőként – megszerveztünk és végrehajtottunk egy ilyen programot, és azóta is minden évben indítunk egy körülbelül 40 fős tanárcsoportot. Ennek köszönhetően már több mint 340 magyar fizikatanár láthatta testközelből a CERN rendezéseit, és ismerkedett meg a fizika élvonalába tartozó kutatási eredményekkel, tölthetett fel szakmailag.

A továbbképzésen eddig részt vett tanárok közül többen is szerveztek már tanulmányi kirándulást a CERN-be diákjaik számára, vagy pedig „virtuális látogatást”, amelynek során élő videóközvetítéssel teremtettek kapcsolatot a CERN-ben dolgozó magyar kutatókkal. Ezt egyrészt a továbbképzésen tapasztalt élmények, másrészt a továbbképzésen a CERN-i kutatókkal kialakított személyes kapcsolatok tették lehetővé.

A továbbképzés előadásai – egyes esetekben az ott készült videófelvételek is – felkerültek az Internetre, ezek bárki által letölthetők és meghallgathatók.

Lásd még: http://education.web.cern.ch/education/Chapter1/Page3_HU.html

NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL
H-1077 BUDAPEST, KÉTHLY ANNA TÉR 1.
TELEFON: +36 1 795 9500
PÁLYÁZATI E-MAIL: NKFIALAP@NKFIH.GOV.HU
HIVATALI E-MAIL: NKFIHIVATAL@NKFIH.GOV.HU
HONLAP: WWW.NKFIH.GOV.HU; WWW.NKFIA.KORMANY.HU

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

NEMZETI KUTATÁSI,
FEJLESZTÉSI ÉS
INNOVÁCIÓS ALAP

BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

FROM TEACHERS
FOR TEACHERS

JELENTKEZZEN!

A MAGYAR SCIENCE ON STAGE
(Színpadon a Természettudomány)
FESZTIVÁLRA!
2016. október 7–9.



2016. október 7–9. | Debrecen, Agóra

MAGYAR SCIENCE ON STAGE FESZTIVÁL 2016

MUTASSUNK UTAT A TERMÉSZETTUDOMÁNYOK OKTATÁSA JÖVŐJÉHEZ!

<http://szinpadon-a-tudomany.hu>

A Science on Stage Hungary felhívja az óvodai, az általános és középiskolai oktatásban természettudományos tárgyakat tanító pedagógusokat, hogy osszák meg kollégáikkal oktatási tapasztalataikat és innovatív, kreatív gyakorlataikat! Végzős tanárszaki hallgatók is jelentkezhetnek. Bemutatót tartóknak a **szállás és ellátás ingyenes.**

Jelentkezési határidő: **2016. április 11.**

Jelentkezési lap: <http://szinpadon-a-tudomany.hu/wp-content/uploads/2016/01/sons2016.doc>
Szórolap: <http://szinpadon-a-tudomany.hu/wp-content/uploads/2016/01/flyer2016.pdf>

SCIENCE ON STAGE 2017
DEBRECEN

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

SZERVEZŐK:

