

fizikai szemle

An aerial photograph of a forest. The trees are densely packed, creating a complex, textured pattern of green and brown. A winding path or stream cuts through the forest, and a small, irregularly shaped clearing or pond is visible in the upper left quadrant. The overall scene is captured from a high angle, looking down on the forest canopy.

2013/10

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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba zánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

Mozgó felhőtakaróban keletkezett
Kármán-örvénysor, amelyet
a dél-koreai Cheju Do sziget
1950 méter magas Halla hegye okozott
2011 márciusában (fotó©: NASA–
Terra–MODIS, Jeff Schmaltz).

TARTALOM

<i>Zölei-Szénási Dániel, Smausz Kolumbán Tomi, Bari Ferenc, Domoki Ferenc, Hopp Béla:</i> A lézeres szórás interferencia jelenségének felhasználása szöveti vérellátás nagy pontosságú, költséghatékony mérésére	329
<i>Szállás Attila, Rátkai László, Pusztai Tamás, Gránásy László:</i> Helikális mintázat eutektikus ötvözetekben	333
<i>Földes B István:</i> Magas harmonikusok és attosekundumos impulzusok	337
<i>Abonyi Iván:</i> Megemlékezés Kármán Tódorról halálának ötvenedik évfordulóján	342
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Simon Péter:</i> Ilyen még nem volt	348
<i>Szeidemann Ákos:</i> Fizika és földrajz határán – tanítható-e a Coriolis-erő?	352
<i>Biróné Kabály Enikő:</i> „... jó szóval oktasd, játszani is engedd...”	357
<i>Radnóti Katalin:</i> XVI. Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – beszámoló 3. rész	359
Eötvös-verseny 2013	362
HÍREK – ESEMÉNYEK	362

D. Zölei-Szénási, T. Smausz, F. Bari, F. Domoki, B. Hopp: A high precision and low cost method of determining the blood supply of tissues: the analysis of laser speckle patterns

A. Szállás, L. Rátkai, T. Pusztai, L. Gránásy: Spherical patterns in eutectical alloys

I. B. Földes: High harmonics and attosecond pulses

I. Abonyi: A semicentenary remembrance of T. von Kármán

TEACHING PHYSICS

P. Simon: An exceedingly gifted young student

Á. Szeidemann: The Coriolis force: a concept to be taught at the border of both physics and geography

E. Biró-Kabály: The Quiz plays applied in the teaching of physics

K. Radnóti: Report on the XVI. Leo Szilárd Contest in nuclear physics – part III
Eötvös contest 2013

EVENTS

D. Zölei-Szénási, T. Smausz, F. Bari, F. Domoki, B. Hopp: Eine genaue und kostengünstige Methode zur Bestimmung der Blutversorgung von Geweben: Analyse der Beugungs-figuren von Laserlicht

A. Szállás, L. Rátkai, T. Pusztai, L. Gránásy: Spiralmuster in eutektischen Legierungen

I. B. Földes: Hohe Obertöne und Attosekunden-Impulse

I. Abonyi: Zum fünfzigsten Jahrestag des Ablebens von T. von Kármán

PHYSIKUNTERRICHT

P. Simon: Ein aussergewöhnliches Talent

Á. Szeidemann: Die Coriolis-Kraft: ein Begriff aus Grenzgebieten von Physik und Geographie

E. Biró-Kabály: Quiz plays im Physikunterricht

K. Radnóti: Bericht über den XVI. Leo-Szilárd-Wettbewerb in Kernphysik – Teil III.
Eötvös-Wettbewerb 2013

EREIGNISSE

Д. Золеи-Сенаши, Т. Шмаус, Ф. Долюки, Б. Хопп: Аккуратный и недорогой метод определения снабженности кровью тканей: анализ рассеянных лазерных пучков

A. Szállás, L. Rátkai, T. Pusztai, L. Gránásy: Spirальные структуры в сплавах

И. Б. Фёльден: Высокие гармоники и аттосекундные импульсы

И. Абони: Пятилетка кончины Т. фон Карман

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

П. Шимон: Студент редкой одаренности

A. Сейдеман: Сила Кориолиса – предмет обучения на грани физики и географии

Э. Биро-Кабаль: Метод izbora правильного ответа из набора предложенных оправдан и в обучении физике

K. Radnóti: Отчет о XVI. студентском конкурсе им. Л. Силарда по ядерной физике – часть третья

Конкурс им. Этвеша 2013

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXIII. évfolyam

10. szám

2013. október

A LÉZERES SZÓRÁSI INTERFERENCIA JELENSÉGÉNEK FELHASZNÁLÁSA SZÖVETI VÉRELLÁTÁS NAGY PONTOSSÁGÚ, KÖLTSÉGHATÉKONY MÉRÉSÉRE

Zölei-Szénási Dániel,^{1,3} Smausz Kolumbán Tomi,² Bari Ferenc,³ Domoki Ferenc,⁴ Hopp Béla¹

¹Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szegedi Tudományegyetem

²MTA–SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport, Szegedi Tudományegyetem

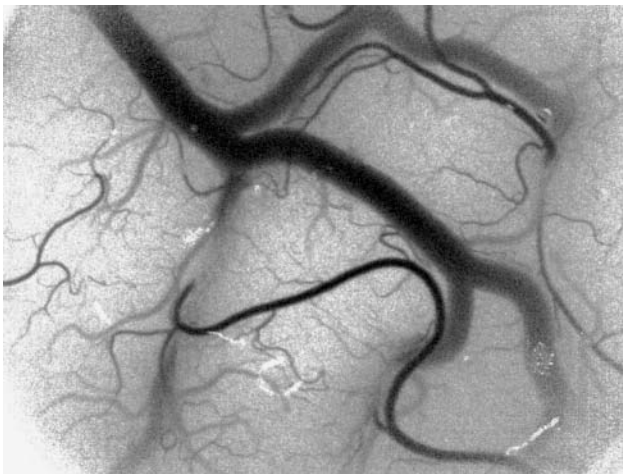
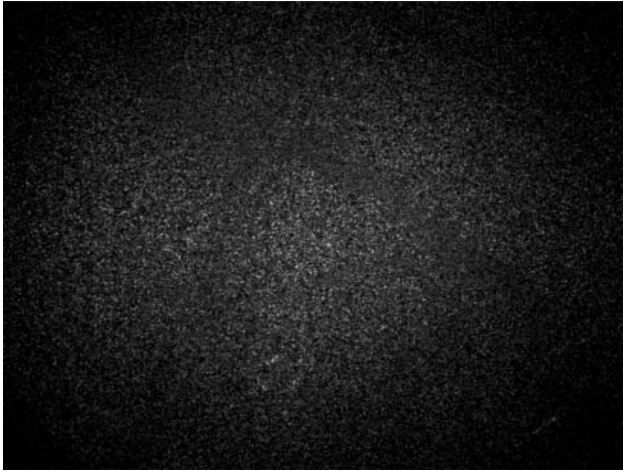
³Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézet, Szegedi Tudományegyetem

⁴Élettani Intézet, Szegedi Tudományegyetem

Égési sérülést, transzplantációt (szervpótlást), leszádkadt végtag visszavarrását követően, illetve a bőrdaganatos elváltozásai vagy éppen előrehaladott cukorbetegség esetén rendkívül fontos lehet a bőr – egészen pontosan az erekkel átszőtt irha – vérellátásának gyors és pontos vizsgálata. Ezen esetekben sokszor olyan eszközre van szükség, ami a vizsgált – általában nagyobb – szövetterület vérellátását térképszerűen, viszonylag nagy tér- és időbeli felbontással képes megmutatni. A ma létező és ezeket a kritériumokat kielégítő, kereskedelmi forgalomban hozzáférhető eszközök nem nyújtanak kellő pontosságot a vizsgálat során, ami hibás diagnózishoz és a vizsgált szövet, végtag visszafordíthatatlan károsodásához vezethet.

Jelenleg a fentebb említett biológiai „minták” vérellátásának nem invazív (nem a szervezetbe hatoló eszközökkel történő) vizsgálata és egyes orvostudományi, véráramlással összefüggő alapkutatások során általában két optikai módszer adott: a hagyományos vagy a pásztázó lézer Doppler-rendszer alkalmazása. Mindkét eljárás nagy pontosságot biztosít, azonban korlátaik miatt általában kompromisszumokat kell kötni, amelyek veszélyeztethetik a mérés elvégzését, leronthatják annak pontosságát. Az első módszer igen jó időbeli felbontást ad, de csak néhány rögzített ponton, ahol is körülbelül 1 mm^3 térfogatban vizsgálható a szöveti perfúzió (a vér rendezetlen irányú haladása

a kapillárisokban). A pásztázó Doppler-rendszerekkel nagyobb testfelületek is megfigyelhetők, azonban egy-egy perfúzió- vagy áramlásterkép elkészítése több percig is eltarthat, amely idő alatt többször, akár jelentősen is megváltozhat a vizsgált szövet vérellátása, illetve mozgási műtermékek (artifaktumok) torzítják a mérési eredményeket. Ráadásul az utóbbi típusba tartozó eszközök beszerzési költsége meglehetősen magas. A lézer Doppler-rendszerek mellett ígéretes alternatívát jelenthetnek a lézeres szórási interferencia képalkotáson (*Laser Speckle Imaging*, LSI) vagy lézeres szórási interferencia kontrasztelemzésen (*Laser Speckle Contrast Analysis*, LASCA) alapuló eljárások, amelyeket már eredményesen alkalmaznak az agyfelszín, illetve a szemfenék vérellátásának vizsgálatára. Azonban a jelenleg kereskedelmi forgalomban elérhető ilyen eszközök nem biztosítják a lézer Doppler-eszközökkel összemérhető pontosságot, a mért és megjelenített eredmények torzulnak, ha a vizsgált szövet mozdulatlan, statikus szóró elemeket tartalmaz [1]. Márpedig ez a feltétel gyakran fennáll, különösen a többrétegű felépítéssel rendelkező bőr esetén. Írásunkban egy olyan szegedi fejlesztést mutatunk be, amely jelentősen megnöveli a LASCA-rendszerek pontosságát. Ez a költséghatékony technológia alkalmassá vált a bőr véráramlásának közel valós idejű vizsgálatára.



1. *ábra*. Altatott malac agyfelszínéről készített nyers szórás interferenciakép és az ez alapján számított kontrasztterkép. Az ereknél a kontraszt alacsonyabb, mint a környező szövetnél.

A lézeres szórás interferencia kontrasztelemezésen alapuló véráramlásmérés

Ha egy optikailag egyenetlen felületre koherens fény esik, és a felületről szóródó fotonokat egy ernyőn felfogjuk, jellegzetes szemcsés mintázatot láthatunk. A jelenség neve lézeres szórás interferencia. Hasonlót tapasztalhatunk akkor is, ha ernyő helyett egy leképező rendszert (például egy kamerát objektívvel) használunk, azonban ekkor a keletkező foltok kialakulását az optikai elemek is befolyásolják. Ugyanilyen szemcsés szerkezetű képet látunk, ha szabad szemmel figyeljük meg a lézerral megvilágított érdes felületet, amely esetben az interferenciakép a retinán alakul ki. Ha a lézerral megvilágított minta mozog, vagy mozgó elemeket tartalmaz (például áramló vörösvértesteket), akkor a szórás interferenciakép időben változik. Mivel a képek rögzítése során a kamera nem végtelenül rövid ideig exponál, a keletkező szórás interferenciakép elmosódottá válik: minél intenzívebb a mozgás (vagy minél hosszabb az expozíciós idő), annál elmosódottabbá válik a rögzített kép. Az 1. *ábra* felső képe egy altatott malac agyfelszínéről készült, nyers szórás interferenciaképet mutat. A szórás interferen-

ciakép egyik objektív statisztikai tulajdonsága a kontraszt, amelynek segítségével egyértelműen jellemezhető a kép elmosódottsága. A kontraszt az egyes képpontok intenzitásértékei szórásának és az átlagos intenzitás hányadosa:

$$K = \frac{\sigma}{\langle I \rangle}.$$

Minél elmosódottabb a kép, annál alacsonyabb a kontraszt. Ezt mutatja az 1. *ábra* alsó képe, amely az előbbi területről készült 20 felvétel alapján számított kontrasztterképek átlaga. Ebben az esetben a kontrasztterképeket 5×5 képpont nagyságú ablakkal számítottuk ki és az ablakot 1 képpontonként léptettük vízszintes és függőleges irányban, hogy megkapjuk a kontrasztterképet. A kontrasztterképek átlagolására azért volt szükség, hogy csökkentjük a statisztikai zaj mértékét.

A kontraszt értéke alapján megbecsülhető az áramlási sebesség az adott területen, azonban közöttük az összefüggés nem lineáris. Ehelyett az átlagos sebesség az egyes képpontok által mutatott fényességértékek időbeli változásaihoz tartozó autokorrelációs idővel (τ , röviden korrelációs idő) fordítottan arányos, így a T expozíciós idő esetén mért K kontraszt értéke alapján függvényillesztéssel határozhatók meg a vizsgált szövet vérellátásában bekövetkező változások:

$$K^2(T) = \frac{1}{T} \int_0^T C^2(t) dt, \quad (1)$$

ahol $C(t)$ az egyes képpontok fényessége időbeli változásainak autokovarianciája, amely lorentzi sebességeloszlást feltételezve

$$C(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

valamint

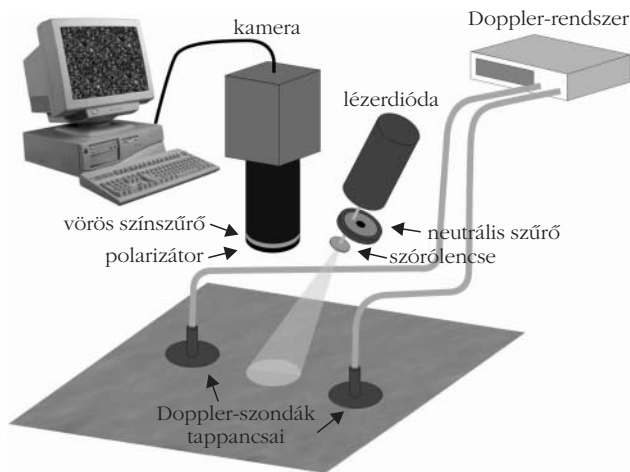
$$\lim_{T \rightarrow 0} K(T) = 1 \text{ és } \lim_{T \rightarrow \infty} K(T) = 0,$$

lásd [2].

A módszer kiterjesztése bőrfelületeken történő mérésekre

Valós méréseknél a kontraszt maximális értéke számos nem ideális körülmény következtében nagyon rövid expozíciós idő esetén sem érheti el az 1-et [3], sőt, statikus szóróelemek jelenléte mellett nagyon hosszú expozíciós idővel sem közelít a 0-hoz, hanem afölött marad. Feltételeztük, hogy a fentebb említett problémákra megoldást jelenthet több expozíciós idő és egy új, bővített formula alkalmazása. Ennek vizsgálatához egy alkalmas elrendezést kellett összeállítanunk, amelynek vázlatát a 2. *ábra* mutatja.

A modellkísérletek elvégzéséhez egy küvetát latex mikrogömbök 2 térfogatszázalék koncentrációjú szuszpenziójával töltöttünk meg, és egy részét $50 \mu\text{m}$ vastag



2. ábra. A mérések során alkalmazott elrendezés vázlata.

teflonfóliával takartuk le. Ezzel olyan szövetet imitáltunk, amelyben mozdulatlan szóróelemek is vannak. Mivel a teflonfóliával fedett területen számított kontrasztértékek nagy expozíciós idők esetén sem közelítik meg a 0-t, így egy módosított kontraszt – expozíciós idő összefüggést vezetünk be:

$$K^2(T) = P_1^2 \frac{\tau^2}{2 T^2} \left[\exp\left(-\frac{2 T}{\tau}\right) - 1 + \frac{2 T}{\tau} \right] + P_2^2, \quad (2)$$

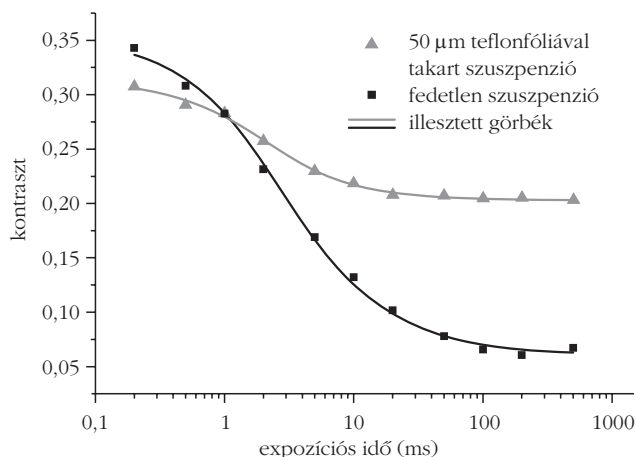
ahol

$$P_1^2 + P_2^2 = \lim_{T \rightarrow 0} K^2(T) \text{ és } P_2^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} K^2(T);$$

itt P_1 a mozgó, míg P_2 a statikus szóróelemek hozzájárulását jellemzi a kialakult szórási interferenciaképhez. A (2) formula segítségével a $K(T)$ értékek alapján függvényillesztés segítségével feltérképezhetők a minta szórási tulajdonságai, és egyúttal meghatározható a minta mozgó elemeire jellemző valós korrelációs idő, ahogyan azt a 3. ábra is mutatja [4].

Bár a 3. ábra elkészítéséhez az expozíciós időt 0,2 és 500 ms között változtattuk, a legtöbb mérés esetén, amikor nagyobb területek megfigyelésére volt szükség,

3. ábra. 50 μm vastag teflonfóliával takart és fedetlen szuszpenzióról különböző expozíciós időkkel készült képek alapján számított kontrasztértékek és a (2) összefüggés alapján rájuk illesztett görbék.



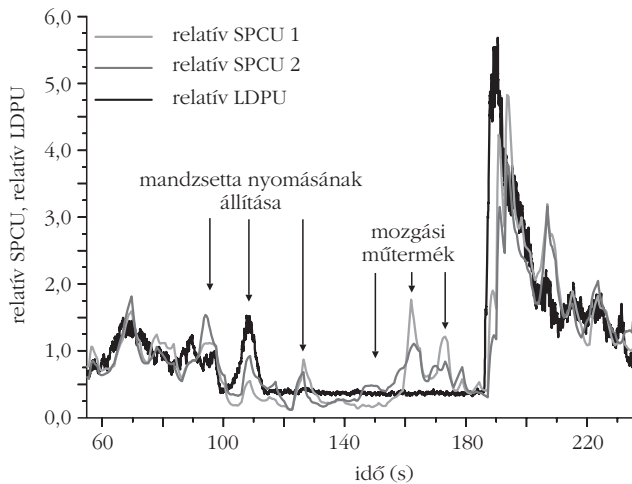
a kamera által látott megfelelő fényerősség biztosítása és a mérés időtartamának csökkentése érdekében 1, 2, 5, 10, 20, 50 és 100 ms-os expozíciós idők alkalmaztunk. Módszerünk segítségével sikeresen követtük a latex szuszpenzió áramlási sebességének változásait [5]. Velünk közel egy időben hasonló eredményre jutottak Parthasarathy és munkatársai [6], valamint Zakharov és munkatársai [7], azonban a két csoport által kidolgozott formulák az itt közölnél lényegesen bonyolultabbak, és a velük történő függvényillesztés nehézkes.

Munkánkat az emberi alkar fedő bőr vérellátásában bekövetkező változások vizsgálatával folytattuk. Megmutattuk, hogy az általunk kidolgozott eljárás segítségével bőr esetén a jelenleg elterjedten alkalmazott módszereknél megbízhatóbban becsülhető meg a hámszövet vérellátásában bekövetkező változások posztokkluzív reaktív hiperémia (PORH, a végtag vérnyomásmérő mandzsettával történő elszorítása, majd fölengedése) során [8].

Az időbeli felbontás javítása

A fent bemutatott módszer segítségével végzett egyetlen mérés közel egy percre is elnyúlhat, mivel a kontrasztértékeket terhelő számottevő statisztikai zaj csökkentése érdekében minden expozíciós idő mellett legalább 5 képet kell rögzíteni. Ez ugyan vetekedhet a pásztázó Doppler-rendszerek időbeli felbontásával, azonban közel sem elegendő gyorsabb folyamatok nyomon követésére. Így egy, a területen még nem alkalmazott eljárás dolgoztunk ki a fényerő szabályozására, valamint a mintavételezésre és a valós idejű kiértékelésre.

A fejlesztés első lépéseként lehetővé kellett tenni, hogy az expozíciós időt és a hozzá tartozó fényerőt képről képre, néhány ezredmásodperc alatt lehessen változtatni. A lézerdíoda folytonos meghajtó áramának változtatásával ez nem volt megoldható, mivel az ezzel járó módusugrások az interferenciaképek ugrásszerű változásait eredményezték, a célnak megfelelő elektrooptikai vagy akusztiooptikai modulátor [6] pedig nem állt rendelkezésünkre. Ennek érdekében egy rendkívül költséghatékony megoldást dolgoztunk ki, amely a mintát megvilágító lézer áramának kapcsolóüzemű szabályozásán alapult. A módszer lényege, hogy az egyes expozíciók azonos számú és azonos tulajdonságú felvillanásokból állnak, és az expozíciós időt a felvillanások között eltelt idő hangolásával lehet beállítani. A kamera integrációs idejét eközben állandó értéken lehet tartani, ami csökkenti a kamera nemlineáris tulajdonságai által okozott torzulásokat. Az optimális paraméterek feltérképezését követően elértük, hogy a kamera által érzékelt fény átlagos intenzitása jó egyezést mutasson minden expozíció során [9]. A fejlesztés második lépéseként egy új mintavételezési eljárást dolgoztunk ki. A mérés a gyakorlatban a következőképpen történt: kezdetben a rendszer minden expozíciós idő segítségével (1, 2, 5, 10, 20, 50 és 100 ms) 5 képet készített az előzetes kalibráció elvégzéséhez. Ezután a mérésekhez kiválasztott, például 5 ms-os expozíciós idő esetén ... – 5 – 0 – 5 – 1 – 5 – 2 –



4. ábra. A speckle- és a Doppler-rendszer által mutatott eredmények egy reprezentatív mérés során. A speckle-rendszert jelentősen megzavarhatja a vizsgált szövet elmozdulása, amelynek következtében mozgási műtermékek (artifaktumok) keletkezhetnek. Mivel a Doppler-szondák rögzítve voltak a vizsgált bőrfelszínhez, azok nem érzékenyek az elmozdulásra. Figyelemre méltó, hogy a felkarra helyezett vérnyomásmérő mandzsetta nyomásváltozásának hatása mindkét mérőrendszer eredményeiben megjelent, és a mozgási műtermékektől eltekintve jól egyeznek az eredmények. A speckle-rendszer két, a kezelő által kijelölt területet vizsgál egy szerre.

5 – 10 – 5 – 20 – 5 – 50 – 5 – 100 – ... ms ciklusokban rögzítette a képeket, ahol 0 ms a háttérvilágítás korrekcióját szolgáló kép volt. Ez lehetővé tette, hogy a mérőrendszer minden második, 5 ms-mal rögzített képet követően megadja a vizsgált területre jellemző reciprokorrelációs idő ($1/\tau$) értékét, a változó expozíciós idők segítségével pedig folyamatosan újralibrálja magát a minta szórási tulajdonságaiban bekövetkező esetleges változásoknak megfelelően. A mérésekhez kiválasztott (a fenti példában 5 ms hosszú) expozíciós idő megadása a minta tulajdonságai alapján történt úgy, hogy az expozíciós idő – kontraszt görbe inflexiós pontjának közelében legyen. Az általunk kifejlesztett fényerő-szabályozáson, illetve mintavételezési és kiértékelési eljáráson alapuló módszert PORH során teszteltük úgy, hogy egy hagyományos lézer Doppler-rendszerrel párhuzamos referenciamérést folytattunk. A lézer Doppler-rendszer által mutatott értékekre a továbbiakban LDPU (Laser Doppler Perfusion Unit), a LASCA-rendszer által nyújtott értékekre pedig SPCU (Speckle Contrast Perfusion Unit) néven fogunk hivatkozni. A mérés eredménye a 4. ábrán látható.

A mérőrendszer a jelen cikk írásának időpontjában másodpercenként 5 kép rögzítését tette lehetővé, így a perfúziós értékekre vonatkozó frissítési ráta ennek a fele, azaz 2,5 Hz volt. Kiválóan látszik, hogy az általunk fej-

lesztett rendszer reakcióideje megfelelőnek bizonyult a bőr perfúziójában bekövetkező viszonylag gyors változások követésére is, annak ellenére, hogy a Doppler-rendszer mintavételi frekvenciája körülbelül 25-ször nagyobb (64 Hz) az előbbiéénél.

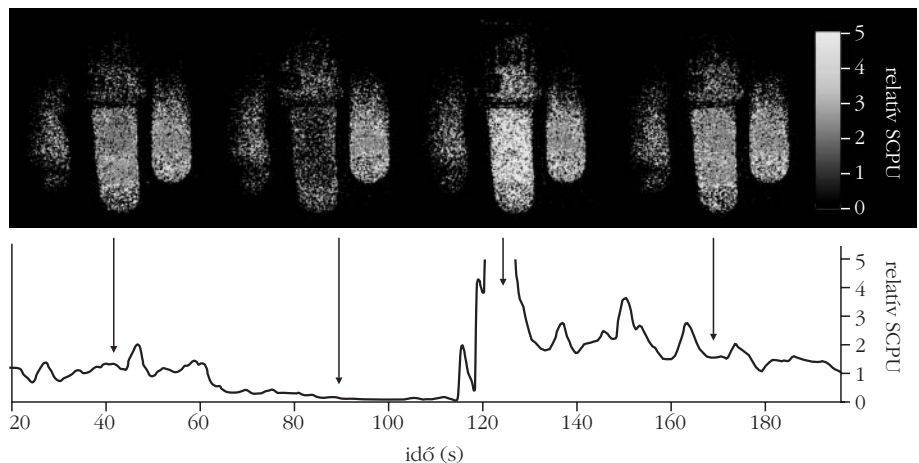
Egy hozzávetőleg 300×200 képpont felbontású (ami a kontrasztterképek felbontása) $1/\tau$ térkép meghatározása képpontról képpontra a fent leírt, függvényillesztésen alapuló módszer segítségével több órát venne igénybe, így a részletes áramlási térképek előállítására csak a mérések követően volt lehetőség. Ezért a fejlesztés harmadik lépéseként egy olyan, előre definiált értékeket tartalmazó táblázatokon alapuló közelítő eljárást dolgoztunk ki, amely lehetővé tette, hogy egy áramlásterkép előállítása egy napjainkban átlagosnak mondható, két processzormagos számítógépen csupán kevesebb, mint 0,2 másodperc alatt megtörténhessen. Ezáltal lehetővé vált, hogy a vizsgálatot végző személy már mérés közben a teljes vizsgált terület közel valós idejű perfúzió térképét is láthassa. Az 5. ábra egy emberi középső ujj elszorítása során készült filmfelvétel fontosabb eseményeinek egyes kockáit és az ujj átlagos perfúziós értékének grafikonját mutatja.

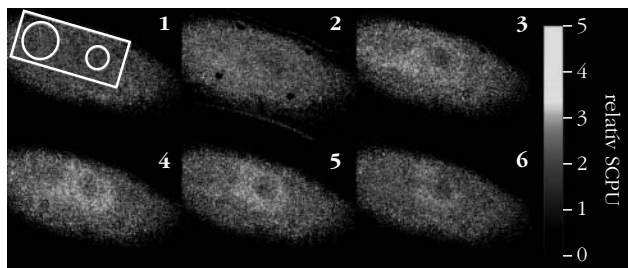
A 6. ábra az emberi alkart borító bőr véráramlási válaszát mutatja egy hideg tárggyal (egy optikai rögzítőelemmel, „dióval”, amelynek egyik furata szélesebb, mint a másik; a sziluettjét bejelöltük az első képkockán) való érintkezést követően. Szembetűnő, hogy csak ott reagált a bőr a hidegre, ahol ténylegesen érintkezett a tárggyal, míg a furatok helyén végig változatlan maradt a perfúzió.

Összegzés

Laboratóriumunkban egy olyan, közel valós idejű méréseket végrehajtó mérőrendszer fejlesztésén dolgozunk, amely alkalmas nagyobb szövetterületek vérrellátásának gyors, hatékony és megbízható vizsgálatára. Az eszköz további fejlesztése nyomán a mintavételi rátát a

5. ábra. Egy emberi középső ujj vérellátásának változása az újra helyezett mandzsetta felfűtése és leengedése hatására. Az ábra felső részén sebességtérképek láthatók, míg alsó részén sebességgrafikon mutatja a stimulált szövetben lévő perfúzió intenzitását. A nyilak a képek elkészültének időpontjait, illetve a görbe vonatkozó részeit mutatják.





6. ábra. Az alkart borító bőr véráramlási válasza egy hideg tárgy érintését követően. Az (1) kép a tárgy érintése előtt készült, ezen bejelöltük a tárgy helyét is. A (2) kép közvetlenül a tárgy elvételét követően készült, és a további képek a hiperémiás (alapszint fölé emelkedő) reakciót mutatják be.

kétszeresére kívánjuk növelni, míg a reakcióidőt a harmadára tervezzük csökkenteni. Ennek eredményeként a mérőrendszer az igen drága lézer Doppler-rendszerek pontosságát tudná nyújtani a hagyományos LASCA-rendszerek térbeli felbontásával, ugyanakkor megközeleltve azok időbeli felbontását. Egy ilyen eszköz különösen hasznos lenne a bőrgyógyászatban, például égési sérülések, cukorbetegség szövődményeinek, vagy éppen a bőr rákos elváltozásainak vizsgálata során. Mivel munkánk alatt végig arra törekedtünk, hogy a lehető legköltséghatékonyabb megoldásokat és újításokat alkalmazzuk úgy, hogy az eredmények minősége semmiképpen se romoljon, így egy, az általunk kidolgozott módszereken alapuló orvosi mérőeszköz viszonylag alacsony költségen lenne előállítható.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani „Az SZTE Kutatóegyetemi Kiválósági Központ tudásbázisának kiszélesítése és hosszú távú szakmai fenntarthatóságának megalapozása a kiváló tudományos

utánpótlás biztosításával” (TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0012), az „Impulzuslézerek alkalmazása az anyagtudományban és a biofotonikában” (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0060), a „Környezeti tényezők és genetikai faktorok interakciójának vizsgálata immunmediált és daganatos betegségek kialakulásában” (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0035) projekteknek, valamint az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramoknak (OTKA F-67816) a kutatás anyagi háttérének biztosításához. Domoki Ferenc köszönetet mond a Magyar Tudományos Akadémiának a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj formájában nyújtott támogatásáért.

Irodalom

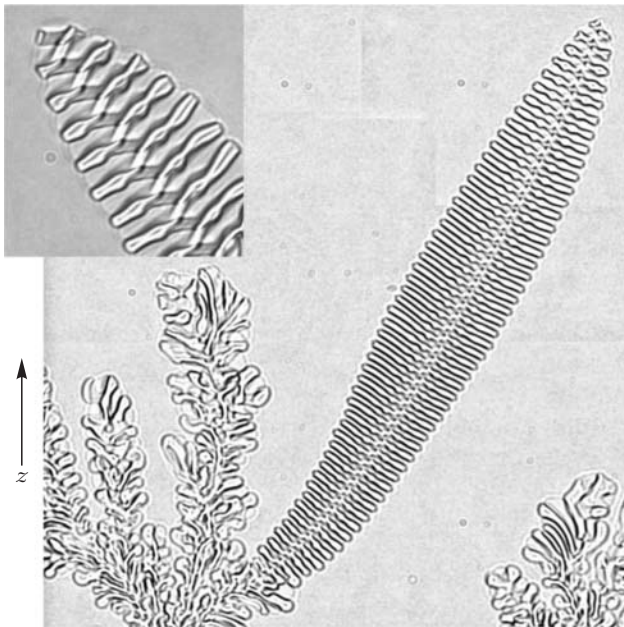
1. C. J. Stewart, R. Frank, K. R. Forrester, J. Tulip, R. Lindsay, R. C. Bray: A comparison of two laser-based methods for determination of burn scar perfusion: laser doppler versus laser speckle imaging. *Burns* 31/6 (2005) 744.
2. A. F. Fercher, J. D. Briers: Flow visualization by means of single-exposure speckle photography. *Opt. Commun.* 37/5 (1981) 326.
3. R. Bandyopadhyay, A. S. Gittings, S. S. Suh, P. K. Dixon, D. J. Durian: Speckle-visibility spectroscopy: a tool to study time-varying dynamics. *Rev. Sci. Instrum.* 76 (2005) 093110.
4. T. Smausz, D. Zölei, B. Hopp: Real correlation time measurement in laser speckle contrast analysis using wide exposure time range images. *Appl. Opt.* 48/8 (2009) 1425.
5. T. Smausz, D. Zölei, B. Hopp: Determination of real correlation time and calibration in laser speckle contrast analysis. *Book of abstracts of 16th Int. Conf. on Advanced Laser Technologies 2008* (2008) ISBN 978-963-06-5737-2, LaserSkill Ltd.
6. A. B. Parthasarathy, W. J. Tom, A. Gopal, X. Zhang A. K. Dunn: Robust flow measurement with multi-exposure speckle imaging. *Opt. Express* 16/3 (2008) 1975.
7. P. Zakharov, A. C. Völker, M. T. Wyss, F. Haiss, N. Calcinaghi, C. Zunzunegui, A. Buck, F. Scheffold, B. Weber: Dynamic laser speckle imaging of cerebral blood flow. *Opt. Express* 17/16 (2009) 13904.
8. D. Zölei, T. Smausz, B. Hopp, F. Bari: Multiple exposure time based laser speckle contrast analysis: demonstration of applicability in skin perfusion measurements. *Photonics and Optoelectronics* 1/2 (2012) 28.
9. T. Smausz, D. Zölei, B. Hopp: Laser power modulation with wavelength stabilization in multiple exposure laser speckle contrast analysis. *Proc. of SPIE* 8413 (2012) 84131J.

HELIKÁLIS MINTÁZAT EUTEKTIKUS ÖTVÖZETEKBE

Szállás Attila, Rátkai László, Pusztai Tamás, Gránásy László
MTA WIGNER FK, SZFI

A spirális, illetve helikális szerkezetek meglehetősen gyakoriak a természetben. Ilyen szerkezetű a galaxisok jelentős része, a legtöbb csigaház és a DNS-molekula is. Többágú spirális, illetve többszörös helikális alakzatokat figyeltek meg biológiai rendszerekben [1], valamint a helikális Liesegang-típusú reakciók esetén [2]. A legújabb vizsgálatok szerint a túlűtött háromalkotós (ternér) olvadátkban történő eutektikus kristálynövekedés során is létrejöhetnek hasonló spirális/helikális formák [3]. A kristálynövekedés ezen módja a forma univerzalitása és szépsége mellett elsősorban a kialakulása során fellépő komplex önszerveződés miatt érdekes, amelynek jobb megértése új, érdekes tulajdonságú anyagok kifejlesztését teheti lehetővé: a kétfázisú helikális struktúrájú úgynevezett metaanyagok például alkalmasak lehetnek a negatív törésmutató megvalósítására [4].

A helikális térbeli fáziseloszláson alapuló úgynevezett „spirális eutektikus dendritek”-et Akamatsu és munkatársai figyelték meg először a háromkomponensű borostyánkósav-dinitril-kámfor átlátszó ötvözet hőmérséklet-gradiensben történő megszilárdulása során [3]. Kísérleteikben azt tapasztalták, hogy a kialakuló „karfiolszerű” mikroszerkezet egyes pontjain a megszilárdulás „lándzsaszerűen” előreszalad és szabályos, helikális szerkezetű kétfázisú dendritek alakulnak ki (1. ábra). A megfigyelt helikális szerkezet a felületen spirális motívumként jelenik meg. Azért meglepőek ezek a kísérleti eredmények, mert egyszerű eutektikus ötvözetekről nem feltételezték, hogy képesek ennyire komplex önszerveződést mutatni. Természetes módon vetődik fel a kérdés, hogy milyen körülmények között várható a spirális eutektikus dendritek megjelenése, illetve hogy lehetséges-e a többszörösen spirális motívum



1. ábra. Vékony, átlátszó mintában, függőleges hőmérséklet gradiensben növesztett kétfázisú helikális dendrit [3].

megjelenése ebben a rendszerben? A választ a továbbiakban egy egyszerű térelméleti modell, a *fázismező-elmélet* keretében keressük.

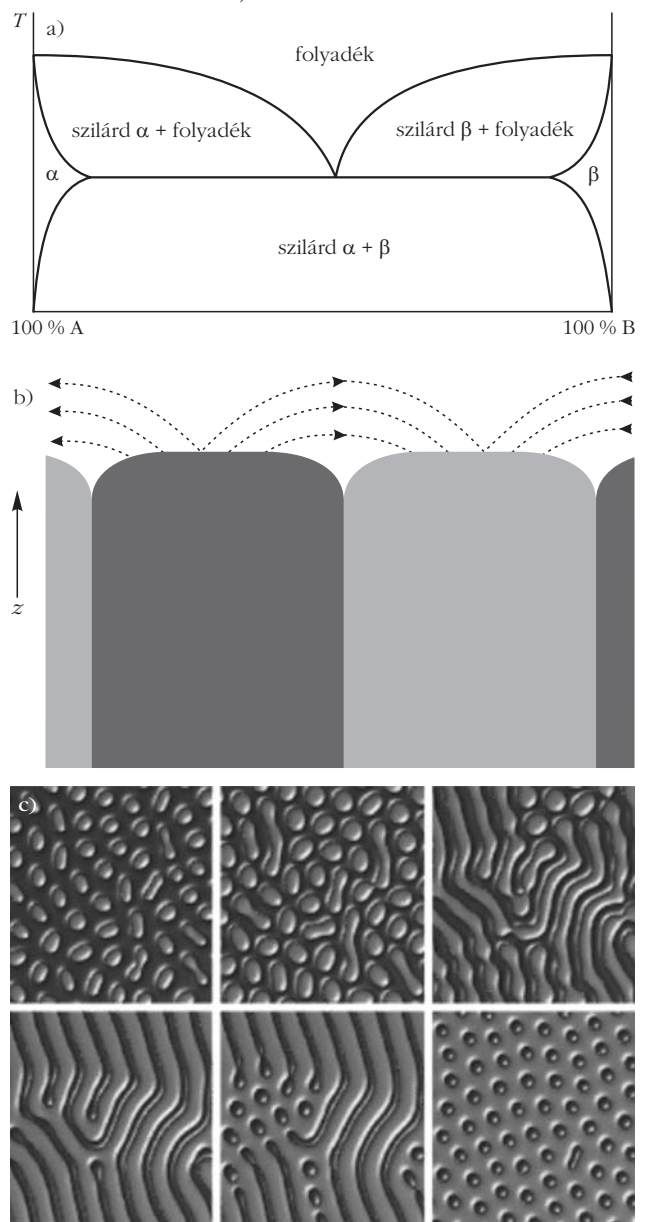
Eutektikus megszilárdulás

Mielőtt az eredményeket bemutatnánk, idézzünk fel néhány, az eutektikus rendszerekre vonatkozó tudnivalót! A kétkomponensű eutektikus ötvözeteknél az eutektikus hőmérséklet alatt egy időben két szilárd fázis válik ki, ahogy az a 2.a ábrán látható fázisdiagramból is következik. Az eutektikus összetételtől eltérő összetételnél a hőmérsékletet csökkentve először az egyik komponensben dús szilárd fázis válik ki, az eutektikus hőmérsékletnél magasabb hőmérsékleten, majd az eutektikus hőmérséklet alatt a két szilárd fázis egymáshoz csatoltan szilárdul meg. Az eutektikus fagyással létrejövő kétfázisú szilárd anyag, másképp eutektikum olvadáspontja alacsonyabb, mint a tiszta fázisok olvadáspontja. Innen származik a nevük is: a görög eredetű eutektikum szó könnyen olvadót jelent. A rendezett eutektikus ötvözetek jellemzője a lamellás vagy rudas megszilárdulás (2.c ábra). A folyadékból kiváló mindkét szilárd fázis előtt lecsökken az adott fázishoz szükséges többségi komponens koncentrációja, miközben a kisebbségi komponens feldúsul. Az egymás mellett növekvő fázisok előtt így keletkező lokális többlet és hiány azonban a felülettel párhuzamos (rövidtávú) diffúziós áramlást indít be (2.b ábra), ezzel elősegítve a szomszédos szilárd fázisok növekedését. Így a térben váltakozó fázisokba szilárduló anyag előtt nem halmozódik fel a szilárd fázisból kiszoruló komponens, azaz nem alakul ki hosszútávú diffúziós mező, ami lehetővé teszi az állandó sebességgel történő megszilárdulást. A hasonló fázisok λ távolsága a fázisokat kialakító diffúziós és

kapilláris hatások versengéséből alakul ki: λ nagyobb a kapilláris hosszánál és kisebb a diffúziós hosszánál. Nagyságát az eredetileg eutektikus lamellás és rudas sík frontú megszilárdulásra felírt Jackson–Hunt-összefüggés határozza meg: $\lambda^2 \sim 1/v$, ahol v a megszilárdulási front sebessége. A tapasztalatok szerint ez az összefüggés nem csak a sík frontú lamellás és rudas megszilárdulásokra igaz, hanem a megszilárdulási folyamatok szélesebb körére is.

De vajon hogyan képződik az eutektikus dendrit a kísérletekben alkalmazott háromkomponensű eutektikus rendszerben? Ennek megértéséhez képzeljük el, hogy kétalkotós rendszerünkhöz egy harmadik összetevőt keverünk, amely kisebb mértékben oldható a szilárd α és β fázisokban, mint a folyadékban. Ekkor a megszilárdulás előrehaladtával a harmadik kompo-

2. ábra. Eutektikus megszilárdulás: a) binér eutektikus fázisdiagram, b) diffúziós áramlás eutektikus megszilárdulás közben, c) eutektikus rudas és lamellás fázisok jellemző mintázatai [5].



nens felhalmozódik a megszilárdulási front előtt, és csak hosszútávú diffúzióval távozhat, ami az ismert Mullins–Sekerka-típusú diffúziós instabilitás fellépéséhez vezet. Ez utóbbi hatására a felület fluktuációkból származó (kapilláris hossznál nagyobb, de a diffúziós hossznál kisebb hullámhosszú) egyenetlenségei felerősödnek és „ujjasodás”-ra vezetnek, ami a karácsonyfaszerűen elágazó úgynevezett dendrites¹ megszilárdulás első fázisa [6]. Azonban ternér rendszerünkben a szilárd „ujjak” felületén a két szilárd fázisnak úgy kell kiválnia, hogy biztosítsák a két fázis fázisdiagram által megkívánt térfogati arányát, ami a kísérletekben megfigyelt állandó sebességű növekedés előfeltétele. Milyen felületi mintázat mellett lehetséges ez? A kísérletekben megfigyelt átlapoló α és β helikális szerkezetek nyomán a felületen megjelenő α és β rétegeket tartalmazó, dendritcsúcsból kiinduló egyszeres spirális mintázat eleget tesz ezeknek a kívánalmaknak. Felmerül a kérdés, hogy van-e esetleg más mintázat is, ami kielégíti a fenti feltételeket, és ha igen, mi dönti el, hogy melyik mintázatot valósítja meg a rendszer. Az elméleti modellünkben következő válaszokat a továbbiakban ismertetjük.

A fázismező-elmélet

A fázisátmenetek modellezésének egyik széles körben alkalmazott eszköze az úgynevezett fázismező-elmélet, amely nem egyéb, mint egy több mezővel dolgozó, általánosított van der Waals/Cahn–Hilliard/időfüggő Ginzburg–Landau-típusú térelméleti modell. A *Fizikai Szemle* oldalain már több alkalommal volt szó a fázismező-elmélet eredményeiről [7, 8]. Ezért csak egy tömör ismertetőre korlátozzuk az alkalmazott modell leírását. Az anyag lokális állapotát egy, a megszilárdulás során fellépő szerkezeti változásokat követő strukturális rendparaméter, az úgynevezett *fázismező* segítségével jellemezzük, amelynek térbeli és időfejlődését a kémiai összetételt megadó koncentrációmezők tér- és időfejlődéséhez csatoljuk. A rendszer dinamikáját a szabadenergia-funkcionálból variációs elvek alapján származtatott mozgásegyenletek határozzák meg. Míg a koncentrációmezőkre Cahn–Hilliard-típusú megmaradó mozgásegyenletek vonatkoznak, amelyeknél azon követelmény figyelembe vétele, hogy a koncentrációmezők lokális összege egységnyi legyen, a Lagrange-multiplikátor módszerrel történik, addig a nem-megmaradó fázismező időfejlődését egy Allen–Cahn-típusú mozgásegyenlet írja le. Az itt alkalmazott modell részletei a *Physical Review E* folyóiratban kerültek publikálásra [9]. A legegyszerűbb határesetek kivételével a mozgásegyenletek csak numerikusan oldhatóak meg. Az itt tárgyalt problémákra való alkalmazásuk jelentős számítási kapacitást igényel, aminek biztosítása csak masszívan párhuzamos számítási környezetben volt lehetséges. A jelen írásban ismertetésre kerülő eredmé-

¹ A *dendrit* elnevezés a görög *δενδρον* (dendron) szóból ered, ami fát jelent, és a teljesen kifejlett dendrites kristály elágazó alakjára utal.

nyeket megalapozó számolások az MTA Wigner FK/SZFI, 928 CPU magot tartalmazó, párhuzamos számítógépfürtjén készültek.

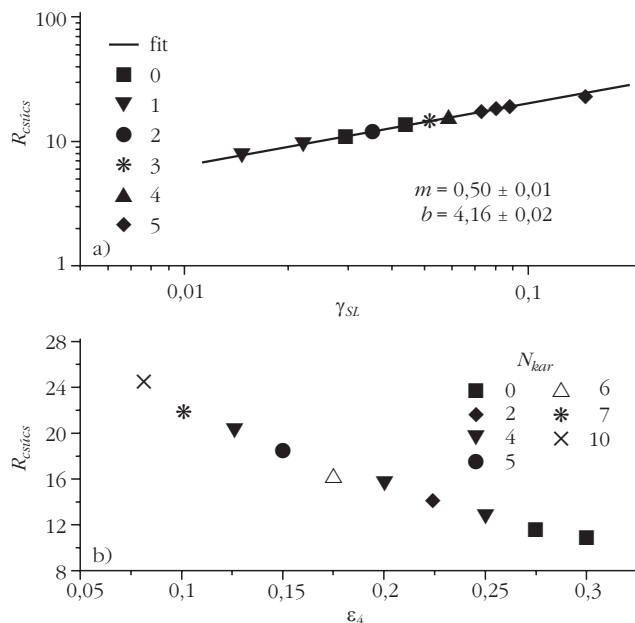
Vizsgálataink során, az egyszerűség kedvéért, egy olyan szimmetrizált ternér eutektikus rendszerrel dolgoztunk, amelyben a folyadékállapot termodinamikai tulajdonságainak megadására az ideálisoldat-modellt, míg a szilárd anyag esetében a regulárisoldat-modellt alkalmaztuk. A szimulációs cella hosszában lineárisan változó hőmérséklet-eloszlást írtunk elő, miközben a megszilárduló anyag állandó sebességgel mozgott a laboratóriumi koordináta-rendszerhez és az ahhoz rögzített hőmérséklet-eloszláshoz képest. Ez az elrendezés jól közelíti a kristálynövesztésre elterjedten használt Bridgman-kemencében megvalósuló körülményeket, valamint lehetőséget ad arra, hogy a növekvő dendrit csúcsa dinamikusan felvehesse a húzási sebességgel azonos növekedési sebesség megvalósításához szükséges hőmérsékletet. A termikus fluktuációkat szimulációinkban a mozgásegyenlethez adott alkalmas numerikus zaj segítségével vettük figyelembe. Mivel azonban kristálycsírából indítva a közelítőleg sík front kialakulása, valamint a Mullins–Sekerka-instabilitás fellépte, és az ujjasodás végigkövetése a rendelkezésre álló számítástechnikai kapacitás mellett reménytelenül hosszú számításokat igényel, szimulációinkat egy enyhén dudoros felületből indítottuk, amelyet a Jackson–Hunt-hullámhossznak megfelelő véletlen eutektikus mintázattal borítottunk. Ezen véletlen mintázat hivatott képviselni a nukleációt követő véletlen fluktuációk összesített hatását.

Eredmények

Az egyfázisú dendrites alakzatok egyik fontos jellemzője a dendrit csúcsának görbületi sugara. Analitikus elméletekből ismert az $R_{csúcs}$ görbületi sugár és a γ_{SL} felületi szabadenergia közötti $R_{csúcs} \sim \gamma_{SL}^{1/2}$ összefüggés [6]. Vizsgálataink szerint az előbbi összefüggés jól jellemzi az eutektikus dendriteket is (*3.a ábra*), és úgy tűnik, hogy a felületen kialakuló eutektikus mintázattól lényegében független a dendrit alakja. Ez feltehetően azzal van összefüggésben, hogy a szimmetrikus ternér rendszer következtében a dendrites alak kialakulásáért felelős harmadik komponens oldhatósága egyforma a két szilárd fázisban.

Mint ahogy a dendrites morfológia kialakulásának egyik feltétele, hogy vagy a felületi szabadenergia vagy a molekulák kristályhoz való csatlakozási sebességét jellemző úgynevezett kinetikus együttható irányfüggő (anizotróp) legyen, modellünkben irányfüggő mobilitást (azaz kinetikus együtthatót) tételeztünk fel. Azt tapasztaltuk, hogy a dendrit csúcs görbületi sugara közel lineárisan csökken a kinetikus anizotrópiával (*3.b ábra*).

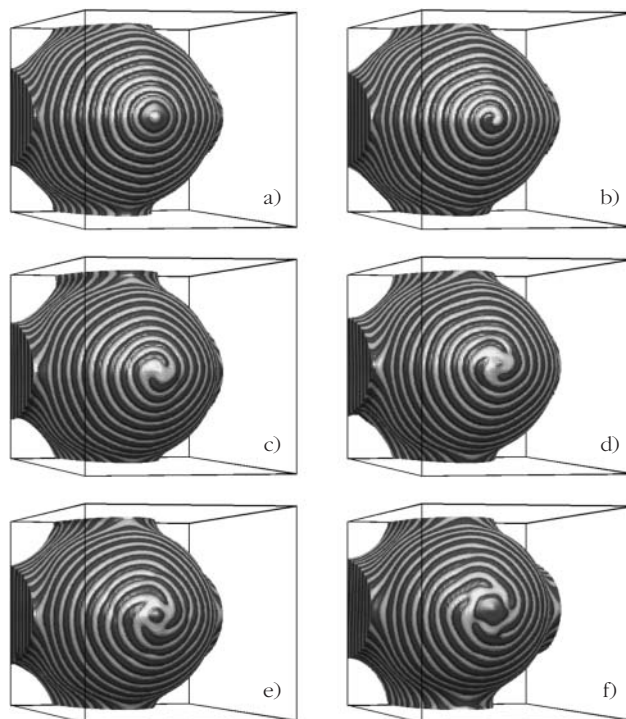
Modellünkben a szilárd fázisokat a kémiai összetételük alapján különböztethetjük meg, így a fázisok felületi és térbeli eloszlását a kémiai összetétel felületi, illetve térbeli metszetre vonatkozó térképei adják meg. A szil-



3. ábra. A kétfázisú (eutektikus) dendritek tulajdonságai: a) a görbületi sugár felületi szabadenergia függése követi az egyfázisú dendritekre vonatkozó $R_{critics} \sim \gamma_{SL}^{1/2}$ összefüggést; b) a görbületi sugár és a kinetikus anizotrópia között közel lineáris függés figyelhető meg.

mulációs rendszer időfejlődését vizsgálva a kezdeti tranzienst állapotok után a rendszer időben állandó alakot vesz fel, aminek felületén egyes, kettes, ..., hatos spirális vagy céltáblaszerkezet valósul meg (4. ábra), valamint néhány szimulációban ennél nagyobb számú, például tízes spirálkarral rendelkező mintázatot is kapunk. Ezek a mintázatok azonban időben nem állandóak: a céltáblamintázatnál és a többszörös spirál mintázatoknál felváltva található a két szilárd fázis a csúcson, míg a spirális mintázatok forogni látszanak a dendrit tengelye körül. A nagyobb számú spirálkarok jellemzően nagyobb görbületi sugár esetén jönnek létre. Különböző véletlenszerű mintázatokból indítva a rendszert a megvalósuló spirálkarok száma kiterjedt eloszlást mutat (5. ábra). Egy adott véletlenszerű mintázatból való indítás után a rendszer különböző, egymástól jelentősen nem eltérő szabadenergiájú, de különböző mintázattal rendelkező, metastabil állapotokba állhat be. A konkrét végállapotot a kezdeti véletlenszerű mintázat határozza meg, ami viszont a rendszer előéletében előforduló véletlen folyamatok integrális képviselője a szimulációink során. Eredményeink tehát arra utalnak, hogy a véletlen folyamatok fontos szerepet játszanak a kétfázisú dendrit felületén megvalósuló eutektikus mintázat kiválasztásában.

A spirálkarok száma a görbületi sugárral, illetve a felületi szabadenergiával növekvő trendet mutat (5. ábra). Elegendően nagy felületi szabadenergiánál a szimulációs cella mérete korlátozza a dendritcsúcsméretét és így a spirálkarok számát is, azaz a végesmehatás torzítja a spirálkarok számának eloszlását. A kinetikus anizotrópia csökkentése esetén szintén egyre nagyobb számú spirálkar jelent meg a dendriteken. Ezzel szemben – érdekes módon – a lamellaszélesség a dendritcsúcstól számolva keveset változik és

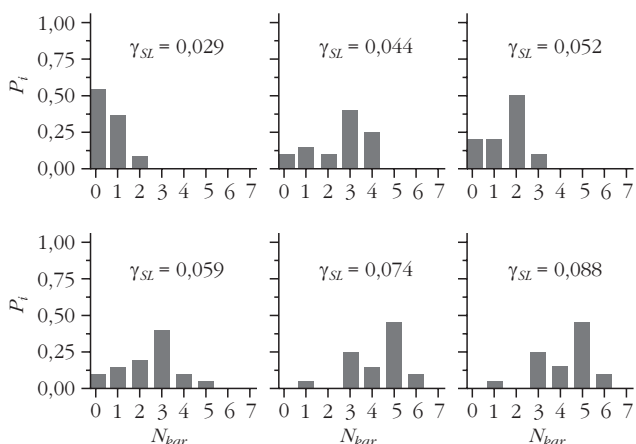


4. ábra. Kétfázisú dendritek felületén a szimulációk során megfigyelt eutektikus mintázatok, amelyek között a) céltáblaszerű, illetve b) egyszerű és c) – f) többszörös spirális motívumok szerepelnek. Az egyik szilárd fázist világos, a másikat pedig sötét szűrővel jelöltük.

lényegében független a görbületi sugártól, illetve a felületi szabadenergiától és a kinetikus anizotrópiától. Mind a felületi szabadenergia növelése, mind a kinetikus anizotrópia csökkentése növeli a görbületi sugart. Így logikus feltevés, hogy valójában a növekvő felületi szabadenergia, illetve a csökkenő kinetikus anizotrópia hatására növekvő görbületi sugár az, ami meghatározza a spirálkarok számát. Első közelítésben ugyanis a görbületi sugár szabhatja meg, hogy közelítőleg azonos szélességű spirálkarról összesen hány fér el a dendrit felületén. E feltevés igazolása vagy elvetése azonban további vizsgálatokat igényel.

Érdekes kérdés, hogy a megfigyelt mintázatok esetén a folytonos növekedés vagy a csíráképződés (azaz a másik szilárd fázis csírájának az egyik szilárd fázis

5. ábra. A dendrit felületén levő spirálkarok számának eloszlása a γ_{SL} felületi szabadenergia függvényében.



felületén való termikus fluktuációkon keresztül történő megjelenése) dominál-e a dendrit növekedése során. A céltáblamintázat esetén a válasz egyértelmű: itt az egyes szilárd fázisok alternáló, fázisonként nem-összefüggő, kúpos tartományokból épülnek fel, ami csak a dendritcsúcson csíráképződéssel alternálva megjelenő fázisok felületre merőleges növekedésével jöhet létre. Minthogy a csíráképződéshez általában nagyobb termikus hajtóerő szükséges, ez a mechanizmus csak nagyobb túlhűtések esetén várható. Helikális szerkezeteknél a helyzet már nem ilyen egyértelmű: a mintázat sokkal bonyolultabb, emiatt a szerkezet összefüggőségének kérdése nehezebben dönthető el. Ahhoz, hogy ezt megválaszolhassuk, a tengelyre merőleges vékony szeletekre osztottuk fel a „mintát”, hogy jobban láthatóvá váljon az egyes fázisok térbeli eloszlása. Az egyágú spirális szerkezet esetén a szilárd fázisok egyenként egyszeresen összefüggőek. Úgy tűnik tehát, hogy ebben az esetben a dendrit növekedésében a kristálycsíra-képződésnek nincs szerepe. Több spirálkar esetén az eutektikus növekedés a csíráképződés és a folyamatos növekedés egy sajátos kombinációja, ami előzetes vizsgálataink szerint mindkét szilárd fázis esetén többszörösen összefüggő tartományra vezethet. A fluktuációk további hatásának tekinthető, hogy különösen nagyobb számú spirális ág esetén a dendrit csúcán gyakran támadnak zavarok, amelyek a dendrit palástján levonuló pont- és vonalhibákra vezetnek az eutektikus mintázatban.

Összefoglalás

Sikeresen modelleztük a három komponensű eutektikus olvadékból kialakuló kétfázisú spirális dendritek képződését. Megmutattuk, hogy a kétfázisú dendrit

alakja hasonló az egyfázisú dendritekéhez. Megfigyeléseink szerint azonos körülmények között azonos dendrit alak, de sztochasztikus előzmények miatt többféle eutektikus mintázat jöhet létre: a céltáblaszerrű, illetve egyszeres vagy többszörös spirális motívumok. Az eltérő mintázatok feltehetően egymáshoz közel eső szabadenergiájú metastabil állapotoknak tekinthetők, amelyek közül a hőmérsékleti fluktuációk választják ki a megvalósuló mintázatot. A felületi szabadenergia növelése, illetve a kinetikus anizotropia csökkentése növeli a dendrit csúcs sugarát, amivel növekszik a dendrit felületén megjelenő spirálkarok várható száma.

Köszönetnyilvánítás

A fenti kutatások az „ENSEMBLE” (NMP4-SL-2008-213669) és az „EXOMET” (NMP-LA-2012-280421) EU FP7 projektek, valamint az ESA társ-finanszírozásával készültek. Köszönjük Rácz Zoltánnak a hasznos konzultációkat és észrevételeket.

Irodalom

1. F. Siegert, C. J. Weijer: Spiral and concentric waves organize multicellular Dictyostelium mounds. *Curr. Biol.* 5(1995) 937.
2. S. Thomas, I. Lagzi, F. Molnár, Z. Rácz: Probability of the emergence of helical precipitation patterns in the wake of reaction-diffusion fronts. *Phys. Rev. Lett.* 110(2013) 078303.
3. S. Akamatsu, M. Perrut, S. Bottin-Rousseau, G. Faivre: Spiral Two-Phase Dendrites. *Phys. Rev. Lett.* 104(2010) 056101.
4. J. B. Pendry: A Chiral Route to Negative Refraction. *Science* 306(2004) 1353.
5. A. Parisi, M. Plapp: Defects and multistability in eutectic solidification patterns. *Europhysics Letters* 90(2010) 26010.
6. W. Kurz, D. J. Fisher: *Fundamentals of Solidification*. Trans Tech Publications, 1986
7. L. Gránásy, T. Pusztai, T. Börzsöny: A polikristályos megszilárdulás térelméleti modellezése. *Fizikai Szemle* 55(2005) 203.
8. T. Pusztai, G. Bortel, G. Tóth, L. Gránásy: Komplex kristálymorfológiák modellezése három dimenzióban. *Fizikai Szemle* 56(2006) 412.
9. T. Pusztai, L. Rátkai, A. Szállás, L. Gránásy: Spiraling eutectic dendrites. *Phys. Rev. E* 87(2013) 032401.

MAGAS HARMONIKUSOK ÉS ATTOSZEKUNDUMOS IMPULZUSOK

Földes B István
MTA Wigner FK, RMI

Az elmúlt években több cikk is megjelent az ultrarövid, attoszekundumos időtartamú fényimpulzusokról avatott szerzők, Krausz Ferenc [1], Farkas Győző [2] és Varjú Katalin [3] tollából. Az elmúlt néhány év hazai eseményei, a Magyarországon épülő ELI-ALPS lézer, és az ehhez kapcsolódóan az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban megnyílt ELI-laboratórium új eredményei indokolják, hogy mind az új eredmények, mind pedig az épülő berendezés céljai a magyar fizikus közélet számára ismertté váljanak. Ezért megkísérlem az új fejleményeket hangsúlyozni oly módon, hogy az említett cikkek részleteit ne ismétellem, de egyúttal az írás az azokat nem olvasók számára is érthető legyen.

Miért is akarunk egyre rövidebb fényimpulzusokat létrehozni? A legegyszerűbb példa erre a fényképezés. A hagyományos fényképezőgép vakuja 1/30 másodpercig villan fel, ez alatt az idő alatt kimerévített, átlagolt képet kapunk az illető tárgyról. Minél rövidebb villanást használunk, annál gyorsabb folyamatokról tudunk nem elkent pillanatfelvételt vagy filmet készíteni. Hasonlóképpen: minél rövidebb impulzusokat használunk, annál gyorsabb folyamatokba tudunk beavatkozni, annál gyorsabb változásokat tudunk létrehozni. A 70-es, 80-as években a pikoszekundumos lézerekkel a szilárdtest rácsának rezgései voltak vizsgálhatók, és a 80-as évek közepe után elterjedt femtoszekundumos (10^{-15} s) lézerekkel már

kémiai folyamatok váltak vizsgálhatóvá, példa rá *Zewail* femtokémiáért odaítélt Nobel-díja. A látható tartományban működő lézerek impulzushosszát azonban nem lehet jelentősen tovább rövidíteni, a jelenlegi 5 fs, illetve annál rövidebb impulzusok már a fény rezgésének csupán másfél periódusát tartalmazzák, a sáv szélesség ekkor pedig már többszáz nanométer, fényforrásunk egyre kevésbé lesz koherens. Ha a femtoszekundumnál rövidebb, az attoszekundum (10^{-18} s) tartományban működő koherens fényforrást akarunk létrehozni, akkor az ultraibolya, vákuum-ultraibolya vagy a röntgen-tartományban kell azt véghezvinni. Röntgenlézereket igen nehéz létrehozni, nagyon nagy energiabefektetéssel igen kis lézerteljesítményt kaphatunk, ráadásul eléggé gyenge spektrális, illetve koherenciatulajdonságokkal. A lézerimpulzusok koncentrálásával viszont nemlineáris folyamatokban a lézerfény frekvenciájának magas rendű felharmonikusait kaphatjuk meg, amit a továbbiakban magas harmonikusoknak nevezek.

Magas harmonikusok kelthetők atomokban oly módon, hogy a nagyintenzitású lézerfény hatására az elektronok kiszabadulnak, majd újra befogódnak [3], vagy szilárdtesteken keltett plazmákban az ott létrejövő meredek plazmagradiensen. Mindkét esetben a harmonikusok fázisszinkronizált impulzussorozatot alkotnak, ami azt jelenti, hogy attoszekundumos időtartamú impulzusok sorozata keletkezik [2]. Az impulzussorozat periodicitása gázokban többnyire a lézerimpulzus félperiódusa, míg plazmagradiens esetén a teljes periódusa. Az alábbiakban felvázolom a főbb harmonikusok keletkezésmechanizmusokat. Ezek alapján – a teljesség igénye nélkül – bemutatok az elmúlt két évtizedben főképp a Wigner FK, illetve korábban a KFKI RMKI-hoz kapcsolódó néhány eredményt, különös tekintettel az új Wigner-ELI laboratóriumban létrehozott harmonikusokra. Végezetül ismertetek néhány tervezett paramétert, illetve majdani alkalmazást a hazánkban épülő ELI-ALPS európai nagyberendezéshez kapcsolódva.

Harmonikusok keletkezése gázokban

Az intenzív lézerfény kölcsönhatását a gázokban szabadon mozgó atomok külső, lazán kötött elektronjaival legszemléletesebben az úgynevezett háromlépcsős modell [3, 4] írja le. Ha a lézersugárzás elektromágneses terének erőssége összemérhetővé válik az atomi potenciállal, akkor az elektromágneses tér hatása nemperturbatívává válik. Ekkor a lézerfény hatása az atom terére már nem tekinthető kis zavarnak, az elektronok nemcsak az atomi térrel, hanem a lézer

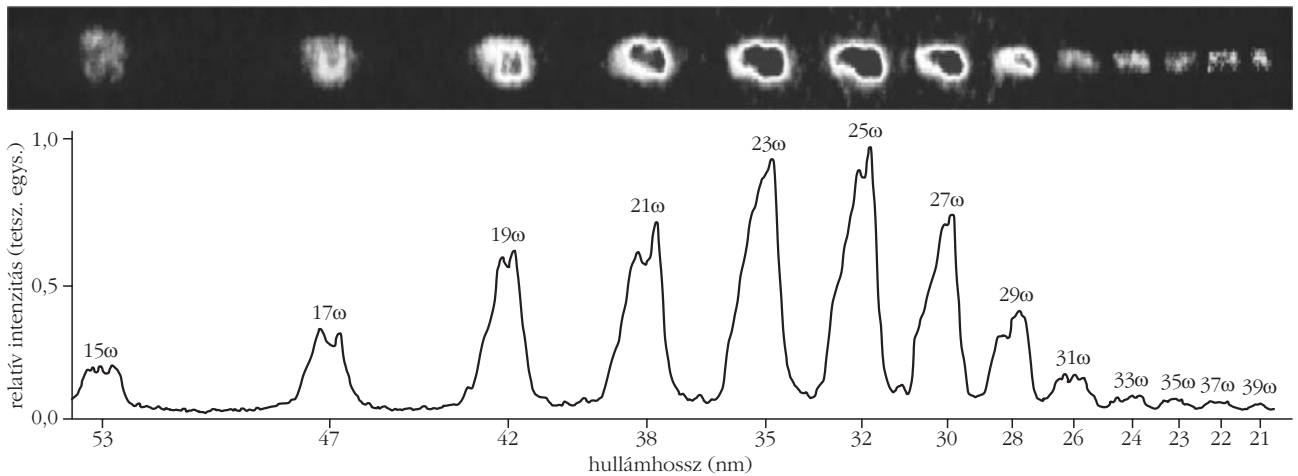


1. ábra. A 4 mJ / 35 fs Ti-zafír lézerezősítő.

terével is erősen kölcsönhatnak, a fény hatása nem vehető figyelembe kis korrekcióként. Ez infravörös lézerek ($0,8\text{--}1\ \mu\text{m}$ hullámhossz) esetén mintegy $10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$ elérésekor következik be, ami ultrarövid, pikoszekundumnál (10^{-12} s) is rövidebb lézerimpulzusok esetében könnyen teljesíthető. Ez a nagy térerősség a lézerfény változó elektromágneses térében minden félperiódusban bekövetkezik, azaz elektronok szabadulhatnak ki minden félperiódusban. Ahogy az elektromos térerősség a ciklus maximuma után csökkenni kezd, majd ellenkező irányba fordul, a térben energiát felvevő elektron rezgőmozgásának iránya is megváltozik, és sok esetben visszatérhet a szülő ionhoz. Amennyiben a visszatérő elektron rekombinálódik, az elektromágneses térben felvett energiát sugárzás formájában, mégpedig a lézerfény magas felharmonikusaiként bocsátja ki. A jelenség nem érzékeny a térerősség irányára, így minden ionizáció-gyorsulás-rekombináció a lézerfény félperiódusával megismétlődik. Ez a félciklusos periodicitás a Fourier-transzformáció tulajdonságainak következtében azzal ekvivalens, hogy a harmonikusok egymástól a lézer frekvenciájának kétszeresével vannak elválasztva. Így a lézer frekvenciájának páratlan többszöröse jelennek meg a frekvenciatérben, amit 1ω , 3ω , 5ω ... stb. jelölhetünk.

Mivel ez egy koherens folyamat, és a rekombináció a fényimpulzus periódusának tört része alatt megy végbe, a magas harmonikusok egy olyan impulzussorozatot alkotnak, amelynek egyes impulzusai a femtoszekundumnál is rövidebb élettartamúak, azaz attoszekundumos impulzusok sorozata keletkezik [2, 3, 5]. Azt, hogy miképpen lehet az attoszekundumos impulzussorozatból egyetlen elkülönített, izolált impulzust előállítani, a *Fizikai Szemle*ben a korábbi cikkek részletesen leírták [2, 3], és az alkalmazásokat is tárgyalták [1].

Jelen cikkben a nemesgázokban keltett magas harmonikusok hazai kísérleti demonstrációját mutatom be. Bár a téma már több mint két évtizedre tekint vissza, és a legrövidebb izolált attoszekundumos impulzusok hossza 100 attoszekundum alatt van (a rekordot jelenleg egy floridai csoport tartja 67 attoszekundummal [6]),



2. ábra. Harmonikusok spektruma a 39. rendig.

Magyarországon tudomásunk szerint először 2012-ben sikerült előállítani attoszekundumos impulzussorozatot. Az ELI projektet támogató hELIOS program keretében az MTA Wigner FK-ban sikerült egy új lézertudományot létrehozni, és azt egy titán-zafír lézer vásárlásával ütőképessé tenni. A lézer 35 fs impulzushosszú, 4 mJ energiájú lézerimpulzusokat bocsát ki 1 kHz ismétlődési frekvenciával (1. ábra). Az optikai elemek roncsolódásának elkerüléséhez a lézer tiszta laboratóriumban működik, némi túlnyomás mellett (ami a porrészecskéket mintegy kifújja a lézertől).

A lézernyalábot vékony lencsével vákuumkamrába fókuszáltuk, amelyben egy impulzusszelepet helyeztünk el. Az impulzusszelep egy 0,8 mm-es lyukon keresztül a háttérgáz nyomásának megfelelően ~1 ms időtartamon keresztül gázt ereszt be, amelyben a nyomás és a késleltetés függvényében az atomi sűrűség 10^{18} - 10^{19} cm^{-3} körül van. Ebbe a gázba fókuszáltuk a lézerimpulzust, és az ott keltett sugárzást egy vákuum-ultraibolya spektrométerrel vizsgáltuk. A spektrométer egy holografikus, toroidális alakú rácson alapul, ami a forrást (jelen esetben a gázjet) a detektorra képezi le, amely egy úgynevezett microchannel plate (MCP) detektor volt. Az MCP-detektor valójában sokmillió, mintegy 10 μm átmérőjű fotoelektron-sokszorozó, amelynek az anódjára érkező elektronokat 5 kV nagyfeszültséggel húzzuk ki, és így azok a mögötte elhelyezett foszforernyőn fényt keltenek. Így az MCP az extrém ultraibolya sugárzást látható fénné alakítja át, és a spektrum egy normál CCD-kamerával megkapható. A lézer minden lövése külön-külön detektálható.

A 2. ábrán látható egy tipikus magas harmonikus spektrum. A felső ábrán a kapott spektrum szürkeárnyalátú ábrázolása látható, a világos tartományokban megjelenő sötétebb foltok jelzik az intenzitásmaximumot. Az alsó ábra pedig annak egy metszetét. Megjegyezhető, hogy a legmagasabb, a 39. harmonikus környékén már a rács reflexióképessége is csökken, a 20 nm-nél rövidebb hullámhosszú sugárzás vizsgálatához egy másik rácsot tervezünk majd használni. Ez a megfigyelt harmonikus-spektrum közvetett bizonyítékát adja az attoszekundumos impulzussorozat létrejöttének, amelyek impulzushosszábanak direkt megméri-

ése korrelációs technikával lehetséges, vagy önmagával, vagy pedig az infravörös lézerimpulzussal [1–3].

Közvetlen terveink azonban nem az impulzushossz mérése és az izolált attoszekundumos impulzus létrehozása, hanem a harmonikusokba történő konverziós hatásfok növelése. Erre a gáztargetek akkor nyújtanak lehetőségek, ha például az itt használt argon-gáz helyett xenont használunk, amely a gyors táduláskor klasztereket alkot. A klaszterek nagyobb mérete miatt a kiszabaduló elektronok rekombinációjának valószínűsége megnő, így a konverziós hatásfok növelhető. Mivel a harmonikusok jól reprodukálhatóak, ezért magukat a harmonikusokat is alkalmazni kívánjuk aktív spektroszkópia céljára a vákuum-ultraibolya tartományban.

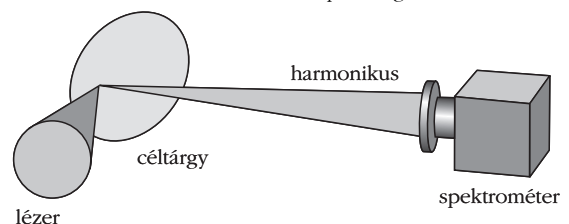
A gázokban keltett harmonikusok rendjét, azaz a fotonenergiát annak ellenére nem lehet a végtelenségig növelni, hogy már több száz elektronvoltot is elértek, mert az intenzitást egyre növelve az elektronok egyszerűen nem térnek vissza az anyaatomhoz, a közege ionizálódik. Következésképpen az elérhető legrövidebb impulzusok hossza sem csökkenthető korlátlanul. Más lehetőséget, más közeget is kell tehát keresni magas harmonikusok és attoszekundumos impulzusok előállítására. Ilyen közege a plazma.

Harmonikusok plazmagradiensen

A szilárdtest céltárgyon (target) való harmonikuskelést a 3. ábra illusztrálja.

Ha ultrarövid, pikoszekundumnál (10^{-12} s) is rövidebb lézerimpulzusokat fókuszálunk szilárdtestek felületére, plazma keletkezik. Az impulzus ideje alatt a plazmának nincs ideje jelentősen kitérni, a plazma-

3. ábra. Harmonikuskelés plazmagradiensen.



gradiens tipikus skálahossza a lézer hullámhosszának tört része marad. Egyszerű megfontolással is szemléltethető, hogyan történhet a harmonikusok keltés. Ha a lézerfény elektromos térerősségének van a felületre merőleges komponense és a térerősség elég nagy, akkor az elektronok rezgési amplitúdója elég nagy lesz ahhoz, hogy ebben a változó elektromos térben rezegve az elektronok a rezgési periódus egy részét a plazmában, egy részét azon kívül, a vákuumban töltik. Ez a rezgés így anharmonikus lesz, ami a lézerfény magas felharmonikusainak lesz a forrása. A pontosabb megfogalmazás a harmonikusok keltését plazmarezgések, azaz plazmonok keltésével írja le. Ez az úgynevezett koherens ébredő tér modell, az angol szakszövegben „coherent wake field”, azaz CWE modell, amelyre szintén létezik egy, a semleges atomokon keltett harmonikusok modelljéhez hasonló 3-lépéses leírás. Minden periódusban, amikor az elektromos térerősség-komponens a felületről kifelé mutat, elektronok lépnek ki a felületről alagúteffekttussal vagy téremisszióval (hasonlóan az atomi esethez). A lézerfény elektromágneses terének változásakor, azaz amikor ellenkező irányúvá válik a térerősség, az elektronok – miután energiát vettek fel a lézertérből – visszatérhetnek a szilárdtestbe. Miközben a szilárdtest, illetve a plazma belsejében rekombinálódnak, ott plazmarezgéseket, plazmonokat kelhetnek. A plazmonok ezután az úgynevezett lineáris móduskonverzióval (ez a rezonanciaabszorpció inverz folyamata) fotonná konvertálódnak. Mivel a plazmarezgések frekvenciáját kizárólag a sűrűség határozza meg ($\omega_p^2 = 4\pi n_e^2/m_e$, ahol n_e az elektronsűrűség, m_e az elektrontömeg), a maximálisan elérhető fotonfrekvencia a szilárdtestbeli elektronsűrűségnek felel meg. Mivel a lézertérből egész fotonokat abszorbeálnak az elektronok, a plazmonok, majd a keltett fotonok is a lézerfény magas harmonikusai lesznek. A folyamat a változó elektromágneses tér egész periódusaiban ismétlődik, így a gázharmonikusokkal ellentétben nemcsak páratlan, hanem páros felharmonikusok is keletkeznek.

A legtöbb nemlineáris fény-elektron kölcsönhatási jelenséghez hasonlóan (lásd *Függelék*) a harmonikusok keltés is az intenzitás és a hullámhossz négyzetének szorzatával skálázódik, következésképpen a hosszú hullámhosszú lézerek előnyösek, ha magas rendű harmonikusokat kívánunk előállítani. A 90-es évek közepe óta számos kísérletet végeztek az infravörös titán-zafír és neodímium alapú lézerekkel. Magyarországon alternatív módon ultraibolya lézerrel, mégpedig a Szegedi Tudományegyetem HILL laboratóriumának ultrarövid, 600 fs impulzushosszú kripton-fluorid lézerével keltettünk harmonikusokat [7] a 90-es évek közepe óta. Az azóta eltelt időben harmonikusok keltését többek között a plazmagradiens változtatásával sikerült optimalizálni, és azt a plazmafodrozódás kísérleti megfigyelésére is alkalmaztuk. A rövid hullámhosszú KrF lézerrel előállítható harmonikusok rendje viszonylag alacsony, de a kiinduló hullámhossz rövidsége miatt a konverzió viszonylag magas lehet, és a megfigyelt 4. harmonikus is már az extrém ultraibolya tartományban van a 62 nm hullámhosszon.

A garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetrel együttműködve részt vehettünk olyan kísérletben, amelyben az ottani kevés ciklusú, 8 fs impulzushosszú titán-zafír lézerrel keltettünk magas harmonikusokat. Megmutattuk, hogy a harmonikusok spektruma erősen függ a keltő impulzus vivőfrekvenciájának és burkolójának fázisától. Megmutattuk annak lehetőségét is, hogy miként lehetne az impulzus polarizációjának modulálásával izolált attoszekundumos impulzust előállítani szilárdtestplazmán a CWE mechanizmussal keltett harmonikusok esetében [8].

A CWE mechanizmussal előállítható harmonikusok hullámhosszának határt szabó elektronsűrűség a legközelebb elérhető harmonikus-hullámhossz 40 nm környékén minimalizálja. Egy további probléma lehet az, hogy bár lehetséges az izolált attoszekundumos impulzus előállítása ezzel a módszerrel, de a folyamat kvázilinearitása, azaz a plazmonok fényhullámmá való konverziójának lineáris volta miatt ez nem könnyű, és a minimális hullámhossz az elérhető impulzushossz is korlátozza. Ezért célszerű olyan nagy lézerintenzitások használata, ahol az elektronok, sőt az egész plazma mozgása relativisztikus lesz, amikor a reflexió nem a plazma belsejéből, hanem egy relativisztikus sebességgel oszcilláló tükrőről történik. Ez a ROM (relativistically oscillating mirror) modell.

Relativisztikus harmonikusok és az ELI

A lézer intenzitását növelve az elektromágneses térben rezgő elektron mozgása relativisztikussá válik, azaz sebessége megközelíti a fénysebességet. Ebben az esetben a Lorentz-erő $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ tagja már nem lesz elhanyagolható, ellentétben a *Függelék*ben tárgyalt esettel. Az ehhez szükséges térerősség megbecsülhető, és egy normalizált, dimenziómentes vektorpotenciállal fejezhető ki, amit az

$$a_0 = \frac{eE}{m\omega c} = \sqrt{\frac{I\lambda^2}{1,37 \cdot 10^{18}}}$$

összefüggés ír le. Itt ω és λ a lézer frekvenciája, illetve mikronban mért hullámhossza, E a térerősség, I a W/cm^2 -ben mért fényintenzitás. A *Függelék* alapján könnyen megbecsülhető, hogy a relativisztikussá válás $a_0 \approx 1$ esetén történik meg, ami az $1 \mu\text{m}$ hullámhossz esetén $10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$ fényintenzitást jelent. Mi történik, ha ez a térerősség szilárdtesten keltett, meredek plazmagradienssel hat kölcsön? A fény ebben az esetben is a vákuumoldalról csak a kritikus rétegig tud behatolni, ahol a lézer frekvenciája megegyezik a plazmafrequenciával. Ám ebben az esetben ez a kritikus felület a $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ erő hatására kollektív mozgást végez, rezegni fog. A beeső lézerfény ezen a rezgő kritikus felületen visszaverődik. A kritikus felület rezgésének periodicitása itt is megegyezik a lézerfény elektromágneses terének periódusával. A visszavert fény pedig visszaverődéskor Doppler-eltolódást szenved, a fentiek következtében ez szintén a lézerfény magas

harmonikusaiból áll. Pontosabb számítások azt mutatják, hogy maga a visszaverődés legnagyobb mértékben a fordulópontnál történik egy egészen rövid idő alatt, azaz amikor a térerősség előjelet vált. Ennek következtében ismét attoszekundumos impulzussorozat keletkezik, amely egyes impulzusainak időtartama még ebben a tartományban is nagyon rövid lehet.

Ennek a ROM harmonikusok keltésnek számos előnye van. Mivel kritikus réteg mindig létrejön, ezért a keltett harmonikusok rendjének nincs közvetlen határa, sem ionizáció, sem sűrűség nem limitálja. Már 2006-ban sikerült több keV fotonenergiáig harmonikusokat keltetni [9]. A magas harmonikusok koherenciája következtében ezek attoszekundumos impulzusokból állnak, amelyek hossza a becslések szerint akár az attoszekundumnál is rövidebb lehet, a zeptoszekundum tartományba eshet. Ez azt jelenti, hogy amennyiben 1,5-2 ciklusú, azaz 5 fs vagy rövidebb impulzusú lézerrel hozunk létre ROM harmonikusokat, akkor például az egyszerű, felül áteresztő szűrő használatával kiválaszthatjuk a legmagasabb harmonikusrendeket (amelyeket csak a legnagyobb csúcs állít elő), és izolált, néhány attoszekundumos impulzusokat kelthetünk.

Az ily módon előállított nagy fotonenergiájú harmonikusoknak van egy további előnyük. A fény fókuszálhatóságát, azaz az elérhető minimális fókuszátmérőt, következőképpen a maximális intenzitást a fény hullámhossza határozza meg, azaz a látható lézerefény esetében a fókuszfolt legalább mikrométer nagyságrendű. A magas harmonikusok rövid hullámhossza kisebb fókuszátmérőt tesz lehetővé. Mivel az intenzitás a fókuszfolt sugarának négyzetével fordított arányban nő, ha sikerül viszonylag magas konverziót elérni, azaz a harmonikusokba történő konverzió a harmonikus rendjével a négyzetesnél kisebb mértékben csökken, akkor a fókuszáltharmonikus-intenzitás nagyobb lehet a lézerefény eredeti intenzitásánál, ami újabb térerősség-tartományok meghódítását tenné lehetővé. A mai legnagyobb teljesítményű lézerekkel $\sim 10^{21}$ W/cm² fölötti intenzitás érhető el. Ha például az ELI-ALPS-ban sikerül nagy konverzióval létrehozott magas harmonikusokat effektíven fókuszálni, akkor az intenzitás elérheti a 10^{23} W/cm² tartományt, ahol a térerősség oly magas, hogy benne az ionok is relativisztikus sebességgel rezegnek. Ez az ultrarelativisztikus eset. Erre van is remény. A megfigyelt ROM harmonikusoknak van egy örömdetes tulajdonsága, amelyet az angol irodalom beamingnek nevez, magyarul talán nyalábosodásnak hívhatjuk. Ez azt jelenti, hogy a reflektált harmonikusok a fókuszált lézernyaláb divergenciájánál jóval kisebb térszögben terjednek, amelyet valószínűleg az okoz, hogy a nyaláb fókuszbeli eloszlása következtében a kritikus réteg sem lesz egészen sík, hanem görbült, ami kollimálja a rajta visszaverődő harmonikusnyalábot. A legutóbbi kísérletek, amelyben hazai kutatók is részt vettek [10], azt mutatják, hogy a konverzió ebben a nyalábosodott harmonikusnyalábban igen magas lehet, mintegy 6 μ J az egyes attoszekundumos impulzusokban, és a szimulációk azt mutatják, hogy az intenzitás kis mértékű növelésével akár az 1% konverziós határfok is elérhető.

Természetesen az ELI-ALPS, azaz az ELI attoszekundumos fényforrása a fentieket alkalmazni kívánja ahhoz, hogy a felhasználók számára különböző paraméterű attoszekundumos fényimpulzusokat biztosítson. Elsősorban a gázharmonikusokat és a relativisztikus ROM harmonikusokat fogják ehhez felhasználni. A gázharmonikusok, illetve a belőlük származó attoszekundumos impulzusok ma már rutinszerűen keltethetők. Az ELI-ALPS újdonsága a nagy ismétlési frekvencia lesz. A tervek szerint beszereznek egy 100 kHz ismétlési frekvenciával működő fényforrást, valamint egy 1 kHz ismétlési frekvenciájú. Az 1 kHz ismétlési frekvenciájú rendszernél nagyobb lesz az egyes lézerimpulzusok energiája. Ahhoz, hogy ezt a nagyobb bemenő energiát felhasználjuk és a gáz ionizációját elkerüljük, hosszú fókusz távolságú bemenetre lesz szükség, és esetleg nemlineáris effektusok felhasználására, ami elősegíti a fázisillesztést a nagyobb kölcsönhatási hossz esetében.

Mivel mindezidáig (2013. július) a plazmaalapú módszerekkel nem demonstráltak izolált attoszekundumos impulzusokat egyértelműen, következőképpen hosszukat sem mérték, ezért igen nehéz pontosan definiálni a majdani paramétereiket. Az effektív ROM harmonikusok keltéséhez legalább 10^{21} W/cm² fókuszált lézerintenzitásra van szükség néhány ciklusú lézerimpulzusok használatakor. Alapvető fontosságú az, hogy az ultrarövid lézerimpulzust megelőző előimpulzusokat olyan alacsonyán kell tartani, hogy az ne hozzon létre a céltárgyon főimpulzus megérkezése előtt úgynevezett előplazmát, illetve azt megfelelő kicsinek kell tartani az optimális plazma-skálához eléréséhez, ami fontos ahhoz, hogy reprodukálható módon keltsünk harmonikusokat. Ezzel a módszerrel ma elérhetőnek tűnik attoszekundumos impulzusok létrehozása 1 kHz ismétlődési frekvenciával. A szimulációk szerint a 20–70 eV tartományban több százalékos konverzió érhető el, de az a 80–200 eV közötti tartományban is megközelíthető. A nagyenergiájú fotonok esetében, 400 és 1000 eV között a konverzió az 1 ezreléket közelítheti meg. A következő években ezen a területen további gyors fejlődés várható, amiben remélhetőleg hazai kutatóink is szerepet kapnak.

Köszönetnyilvánítás

Ezen írás létrejöttében oly sokan játszottak szerepet, hogy teljes felsorolásuk nemhogy a címlistában, hanem a köszönetnyilvánításban is nehézségekbe ütközik. Abc sorrendben felsorolom a főbb hazai közreműködőket: *Aladai Márk, Barna Angéla, Czitrovsky Aladár, Dombi Péter, Rácz Péter, Szatmári Sándor, Varjú Katalin*. Mellettük még a külföldiek közül *Veisz Lászlót, George Tsakirist és Patrick Heisslert* emelném ki. A kapcsolódó munkát a Nr. ELI 09-1-2010-0010 számú hELIOS-ELI program támogatta.

Irodalom

1. Krausz Ferenc: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* 52 (2002) 12.
2. Farkas Győző: Attoszekundum időtartamú fényimpulzusok. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 408.
3. Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok. *Fizikai Szemle* 58 (2008) 87.
4. P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993) 1994.

5. Gy. Farkas, Cs. Tóth, *Phys. Lett.* 168 (1992) 447.
6. Kun Zhao, Qi Zhang, Michael Chini, Yi Wu, Xiaowei Wang, Zenghu Chang, *Opt. Lett.* 37 (2012) 3891.
7. I. B. Földes, J. S. Bakos, G. Veres, Z. Bakonyi, T. Nagy, S. Szatmári, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2 (1996) 776–781.
8. P. Heissler, R. Hörlein, M. Stafe, J. M. Mikhailova, Y. Nomura, D. Herrmann, R. Tautz, S. G. Rykovanov, I. B. Földes, K. Varjú, F. Tavella, A. Marcinkevicius, F. Krausz, L. Veisz, G. D. Tsakiris, *Appl. Phys. B* 101 (2010) 511–521.
9. B. Dromey, M. Zepf, A. Gopal, K. Lancaster, M. S. Wei, K. Krushelnick, M. Tatarakis, N. Vakakis, S. Moustazis, R. Kodama et al., *Nat. Phys.* 2/7 (2006) 456–459.
10. P. Heissler, A. Barna, J. M. Mikhailova, Guangjin Ma, K. Khrennikov, S. Karsch, L. Veisz, I. B. Földes, G. D. Tsakiris, közlés alatt.

$$m \frac{d}{dt} \mathbf{v} \approx e \mathbf{E}.$$

Ha az oszcilláció amplitúdója kisebb a lézer hullámhosszánál:

$$\mathbf{v} = \frac{e}{m} \frac{\mathbf{E}}{i\omega} \cos \omega t.$$

A rezgés átlagos kinetikus energiája a ponderomotoros energia:

$$U_p = \frac{e^2 \mathbf{E}^2}{4 m \omega^2} = \frac{e^2 \mathbf{E}^2 \lambda^2}{16 \pi^2 m c}.$$

Látható, hogy a rezgés közben felvett energia a térerősség négyzetével, azaz a teljesítménnyel arányos, és a hullámhossznak ugyancsak a négyzetével nő. Ennek a következménye az, hogy a nemlineáris kölcsönhatások szerepe is az intenzitás és a hullámhossz négyzete szorzatával arányos, amelyet az $I\lambda^2$ skálatörvénynek neveznek. Mivel a lézerefény elsősorban az elektronokkal hat kölcsön, ezért van az, hogy a közeg választát ez a skálatörvény határozza meg. Amikor az intenzitás növelésekor az oszcilláció amplitúdója megközelíti a lézer hullámhosszát, illetve a sebesség a fénysebességet, a $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ erő már nem hanyagolható el, a kölcsönhatások relativisztikussá válnak.

Függelék

A monokromatikus síkhullám terében rezgő elektron mozgásegyenlete nemrelativisztikus esetben, azaz a Lorentz-erő $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ tagjának elhanyagolása esetén:

MEGEMLEKEZÉS KÁRMÁN TÓDORRÓL HALÁLÁNAK ÖTVENEDIK ÉVFORDULÓJÁN

Abonyi Iván
ELTE TTK

A pályakezdés éve

Kármán Tódor (1881. május 11. Budapest – 1963. május 7. Aachen) a magyarországi mérnökgenerációk egyik legkiválóbb képviselője, sokoldalú fizikus és gépészmérnök, zseniális szervező-egyéniség, *Neumann János* szerint a tudományos tanácsadó (scientific consultant) szerepkörének egyik kimagasló személyisége volt.

Középkolai tanulmányait a Trefort-féle Mintagimnáziumban végezte. Ezt az iskolatípust édesapja, *Kármán Mór* tervezte meg, hogy a leendő középkolai tanárok itt gyakorolva szerezhessék meg a pályájuk során szükséges pedagógiai ismereteket az egyetemi tanulmányaik mellett. Az iskolatípust *Trefort Ágoston* (1817–1888) közoktatási minisztersége alatt valósították meg. Ez lett – röviden szólva – a „Minta” gimnázium.

A Kármán-család a Minta közelében, attól alig két háztömbnyire, a Szentkirályi utcában lakott. Tódor utolsó gimnáziumi éve során az *Eötvös Loránd* indította tanulmányi versenyeken számos jó helyezést ért el. Itt érettségizett, majd a budapesti Műegyetemre ment, amit akkor még Királyi József Műegyetemnek neveztek. Gépészmérnöknek készült.

Tanulmányait sikeresen végezte, oklevelét 1902-ben szerezte meg. Nagy hatással volt rá *Bánki Donát* (1859–1922), aki végzése után tanársegédként alkalmazta, de ugyanakkor *Ganz Ábrahám* vagongyárába is elküldte.

Munkahelyén a nyomott rudak kihajlásának problémáival foglalkozott. Ez a problémakör nagy részben elkísérte későbbi pályáján, hiszen ezek a szerkezeti anyagok a legkülönfélébb műszaki konstrukciókban fontos

szerepet játszanak. Például hidak és más építmények esetében, de döntő mértékben az éppen akkortájt induló repülőgépipar területén tűntek ki fontosságukkal.

1906-ban Kármán a Magyar Tudományos Akadémia ösztöndíjat elnyerve Göttingenbe jutott, *Ludwig Prandtl* (1875–1953) tanzékére. Ez a körülmény döntő hatással volt tudományos pályájára – ekkor jegyezkedett el a repülés, a különböző repülő szerkezetek problémáival és szépségével. Ez volt az az időszak Prandtl életében is, amikor nyilvánvalóvá vált, hogy a repülés nem egyszerűen úszás a levegőben (mint egy arkhimédészi probléma), mert az igazi feladat az lenne, hogy a levegőnél nehezebb testek is repülhessenek. Világossá vált, hogy nem elég az Arkhimédész-féle sztatikus felhajtóerő a repüléshez, hanem egy dinamikai erőhatás is szükséges. Ennek szoros kapcsolata van mind a repülő szerkezet szárnyának alakjával, mind a már mozgó szerkezet körül kialakuló áramlással. Az is kiderült már akkor, hogy a repülő test elemei által keltett hatások is befolyásolják a dinamikai felhajtóerőt. Akármilyen kényelmes a levegőt ideális közegnek tekinteni, mégsem lehet elhanyagolni a test és a közvetlenül hozzáérő levegő kölcsönhatását, a dinamikus határteget. Ez az éppen születő problémakör természetesen megragadta a fiatal Kármán Tódor fantáziáját.

De előbb a megkezdett feladat megoldása volt soron. 1909-ben a nyomott rudak kihajlásáról készített tanulmánya alapján a Göttingeni Egyetem doktorrá fogadta és magántanárrá habilitálta.

Ezután már sor kerülhetett az örvénysorok és a közegeellenállás kapcsolatának vizsgálatára.

Találkozás az örvénysorok problémájával

Az örvénysorok kérdése tulajdonképpen a hidrodinamika (esetünkben az aerodinamika) jellegzetes áramlástan problémája. A korábbi eredményes kutatók természetesen ösztönnel a síkbeli áramlásokkal foglalkoztak. Ekkor hallgatólagosan felteszik, hogy a z -tengely irányában nem történik semmi, mondjuk, hogy ebben az irányban végtelen kiterjedésű a test, így minden érdekes dolog az x - y síkban játszódik le, tehát síkbeli áramlást vizsgálhatunk. Ebbe a síkbeli áramlásba helyezzünk el egy akadályt, amelyet az áramló folyadék vagy gáz körüláramol. Ha az akadály körlap, akkor az események leírása eleinte még nagyobb nehézségek nélkül elvégezhető. Ezért nem csodálatos, hogy a síkbeli áramlás kör alakú akadály körül problémakör már a 18. században, majd a 19. században is – főleg azóta, hogy kialakult a komplex változójú függvények tanulmányozása, amiben a körnek centrális szerep jutott – úgyszólván menetrendszerűen napirenden volt. Am megjelentek a fizikusok és mérnökök által felvetett kínos kérdések: az áramló *ideális* folyadék és az akadály vajon tapad-e egymáshoz, van-e és ha van, milyen a dinamikus határréteg? Ez a probléma a 19. század utolsó évtizedeiben vált igazán aktuálissá.

Közben úgy látszott, mintha a hidrodinamika tankönyvei csakúgy, mint a komplex függvénytan munkái egyszerűen leálltak volna, (átmenetileg) elégnék ítélték volna eredményeiket, amelyek igen jelentősek és igen hatásosak voltak. E hirtelen megállás nyomai látszanak a kor mechanikai tan- és kézikönyvein is. Az a benyomásunk, hogy hiányzott az új lökés, amely a repülés ügyének kibontakozásával érkezett meg a századfordulón.

Az új korszak képviselői Ludwig Prandtl, de legfőként Kármán Tódor. Prandtl kezdett foglalkozni azzal, hogy mi történik a repülő szárnyprofilja körül a repülés közben, egyelőre természetesen kör keresztmetszetű szárnyprofil vizsgálva. Ezt követhette az a remény, hogy a körkeresztmetszet majd valaki ideális szárnyprofilra transzformálva, ha másképpen nem lehet (ideálisan zárt képletben), akkor legalábbis jó közelítésben.

Ebben a küzdelemben játszott rendkívül fontos szerepet Kármán Tódor. Eljárását a következő részben ismertetjük, csak előbb még néhány megjegyzést teszünk.

Az alábbiakban ismertetendő Kármán-féle eredmények 1911–12-ben láttak napvilágot. Ekkor jelent meg az első tanulmány Kármán tollából a *Göttinger Nachrichten* oldalain [1]. A cikk kimondott célkitűzése az volt, hogy áramlástanilag indokolja *Osborne Reynolds* közegeellenállási képletét abban az esetben, amikor a körüláramlott test „hátsó része” nem gömbölyű, hanem szögletes, olyan mint egy konzervdoboz alja. Igen érdekes, hogy a számítások eredménye kétféle, lényegében mégis hasonló esetre vezet. Az akadály „hátsó” széléinél az áramlás „befelé” fordul, a két szélen örvénylő áramlás indul meg, majd leszakad az akadályról. Ezek az örvények energiát hordoznak, ez

fogja az ellenállást okozni. Az örvények impulzusnyomatékot is képviselnek, az akadály szemben lévő rétegeinél ellenkező forgásirányuk miatt, a „jobbról”, illetve „balról” bekanyarodó örvénygyűrűk egymással szemben forognak, az impulzusnyomatékok összege (legalább időátlagban) zérus. A két ilyen örvénytípus között a különbség annyi, hogy az egyiknél az örvények pontosan (időben) párosával lépnek fel (és majd szakadnak le), míg a másiknál az örvények (kis időeltolódással) egymást szakaszosan követik. Ezért van az, hogy ebben az eseten az elvitt impulzusnyomaték csak időátlagban zérus összegű. A részletes tanulmányozásra kis idővel később, 1912-ben *H. Rubach* közreműködésével került sor, ez a tanulmány a *Physikalische Zeitschrift* hasábjain jelent meg [2].

Egy szó, mint száz, ez a két tanulmány kicsit több mint 100 éve jelent meg. A *Göttinger Nachrichten* akkoriiban a szakmai „világirodalom” fontos orgánuma volt (többek között *David Hilbert* is ezen az egyetemen dolgozott). Ma már nem csodálkozhatunk azon, hogy ez a lap csak a nagyobb könyvtárak legmélyén, külön épületek „süllyesztőiben” található. De a *Physikalische Zeitschrift* – szerencsére – ma is azonnal hozzáférhető. Nem győzzük hangsúlyozni, hogy ez a lap, a *Physikalische Zeitschrift*, milyen jelentőségű, hiszen a korszak a fizika legkülönfélébb fejezeteinek 20. századi felfedezéseit mutatja be a kutatók első publikációin – és persze, esetleges vitáikra – keresztül.

Most inkább a felett akarunk csodálkozni, hogy az örvényúttal kapcsolatos cikk(ek) és a témájuk (a múlt évtizedek során többször is megmutatkozó rendkívüli jelentősége ellenére) mennyi ideig várták, hogy a 20. század tankönyveiben méltó bemutatásuk megtörténjék.

Az a benyomásunk, hogy a tudományegyetemi használatra készült elméleti fizikai tankönyvek közül a legendás Arnold Sommerfeld-féle könyvsorozat az első, amelyben a szerző aránylag részletesen bemutatja az örvényes síkbeli áramlásokat a közegeellenállás tárgyalásában Kármán korszakalkotó szerepére. De azért vegyük észre, hogy *Arnold Sommerfeld* (1868–1950), aki oly sok fiatal zsenit nevelt fel a fizika igazán nagynevű kutatójává (például *Werner Heisenberget* és *Wolfgang Paulit*), és aki maga is tevékeny részt vett a modern atomfizika feltárásában [3], miközben sajtó alá rendezi *A deformálható közegek mechanikája* című tankönyvét [4] – az első kiadás 1944-ben, a negyedik kiadás már halála után, 1957-ben –, úgy teszi ezt, hogy az eredményeknek a sűrűdési jelenségeken túlmenő, főleg a repülést érintő vonatkozásairól egyetlen sort sem ír!

Hazánkban a tudományegyetemi célokra készült tankönyvek közül – amelyek a II. világháborút követő megújulás során, 1950 után készültek – kiemelkedő jelentőségű volt *Budó Ágoston Mechanika* kötete [5] 1951-ből. Ebben a kötetben hiába keressük a Kármán-eredményeket. Ezekre a 3. kiadásig, 1969-ig kellett várni. Pedig akkor már nemcsak a szuperszonikus repülőgépek, hanem a tevékeny űrkutatás szintjére is eljutottunk.

A 20. század második felének legendás elméleti fizikai tankönyvsorozata a Nobel-díjas *L. D. Landau* és a Lenin-díjas *E. M. Lifsic* nevéhez fűződik. A Moszkvai Egyetemen tartott előadások nyomán készült kéziratokból indult ki a sorozat, Landau előadásait eleinte Lifsic rendezte sajtó alá. Az első kötet a mechanika általános megalapozását szolgálta. A második lett igazán legendás, a *Klasszikus erőterek*, a relativitáselmélet páratlanul jól sikerült áttekintésével igazán maradandó. A *Hidrodinamika* című kötet [6] mintegy 680 oldala óriási összefoglaló, azonban a Kármán-féle problémakör nem szerepel benne. (Kénytelenek vagyunk Kármán NATO-ban betöltött szerepére gondolni!)

Egy meglehetősen rövid – egyetlen oldalt is alig igénylő – említés található *A mérnöki tudományok kézikönyve* [7] *H. Niedring* cikkében, 1993-ban.

A legfrissebb magyar tankönyvirodalomban is találunk egy rövid utalást a Kármán-féle örvénysorra *Demény András, Erostyák János, Szabó Gábor, Trócsányi Zoltán: Fizika I.: Klasszikus mechanika* című könyvében [8]. Hasonlóképpen egy rövid fejezet végén szerepel egy utalás Kármán Tódor felfedezte örvényútra *Bérces György, Erostyák János, Klebiczki József, Litz József, Pintér Ferenc, Raics Péter, Skrapits Lajos, Sükösd Csaba és Tasnádi Péter* szerzők *A fizika alapjai* című tankönyvében [9].

Az örvénysorok, amelyek a folyadékban mozgó test ellenállási mechanizmusának fontos tényezői

Most röviden próbáljuk meg érzékeltetni, hogy Kármán Tódor szerint mi a közegben mozgó test által tapasztalt ellenállás mechanizmusa. Különösképpen azt vizsgáljuk meg, hogy az Osborne Reynolds-féle tapasztalati közegellenállási törvényt meg lehet-e magyarázni ezzel az örvényleválási mechanizmussal.

A cél tehát megadni a folyadékban U sebességgel haladó testre kifejtett közegellenállási erő képletét:

$$W = \mu l U f \left(\frac{Ul\rho}{\mu} \right),$$

ahol

$$R = \frac{Ul\rho}{\mu}$$

a Reynolds-szám, μ a ρ sűrűségű folyadék viszkozitása, l pedig egy aránylag tetszőlegesen választható, mégis jellegzetes hosszúság, amely az áramlási térbe merített testre jellemző, vagy legalább is az alakjától függ. A tapasztalat szerint az R a nagyon nagy viszkozitás, vagy a lassú mozgás esetén jó közelítéssel állandó. Az $R = 0$ határesetet a Stokes-féle közegellenállási képlet adja ($f = 1$), amely igen jó közelítéssel érvényes az „élég egyszerű” alakú testek (gömbök?) esetében, a tapasztalatok széles köre által alátámasztva. Az ellenkező határeset ($R \rightarrow \infty$) vonatkozhat éppenséggel

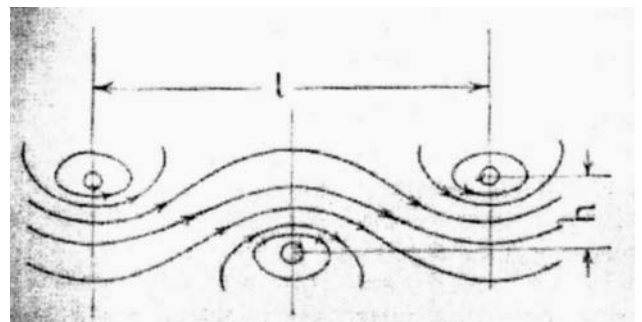
a repülésre is, de mindenképpen külön megfontolást érdemel. Az idevágó tapasztalatok (már 100 évvel ezelőtt is!) – például a légcsavar gyors mozgására gondolva – azt mutatták, hogy az R a közegellenállástól már függetlenné válik. Ebből az szűrhető le, hogy az áramlási tér az akadály (a test) körül két részre bontható. Az egyik a közvetlen akadály körüli zóna. A közeli zóna folytonos változási tartomány, olyan mint ha a testre nem is hatna közegellenállás. A másik pedig a távoli zóna, az előbbitől független, hozzá képest „nemfolytonos” zóna, amelyben az áramlás a *Helmholtz* és *Kirchhoff* által kidolgozott módszerekkel írható le. Mégpedig a *Lord Rayleigh* által bevezetett ellenállási képlettel, amely a relatív sebesség négyzetével arányos. Az elméletből – ebben a pillanatban (1911-ben) – hiányzik az a jellegzetes „szívó hatás”, aminek eredménye az ellenállási mechanizmus, amit viszont a kísérletek már ki tudnak mutatni. Röviden szólva: üres beszédnek tűnik a közegben mozgó test mögött kialakuló, úgynevezett „holt tér”, amit a mozgó test magával vonszol. A kérdés pontosan fogalmazva tehát az, hogy mi van az áramlásba helyezett test mögött? Ez a kérdés a most vizsgált Kármán-dolgozatok igazi tárgya.

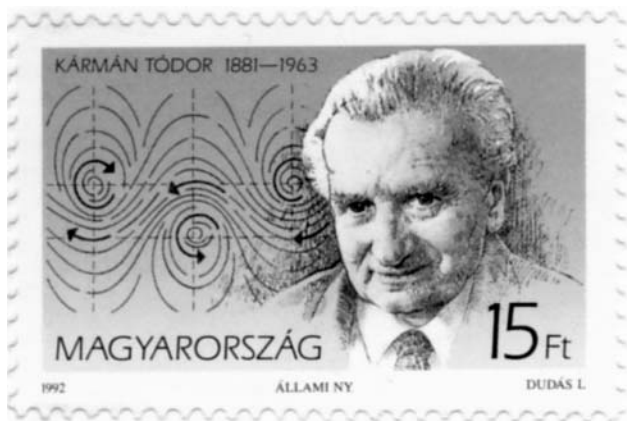
Az első dolgozat – elkerülve az áramlásban lévő merev test pontos geometriai alakját(!) – két örvényfonalat vesz kiindulásul, amelyek egyenként azonos pörgésirányú örvények, szabályos távolságra egymást követően a sorokban. Természetesen a pörgésirány mindkét oldalon, vagy pedig váltakozva, hol az egyik, hol a másik oldalon, az egymást követő örvények l távolságának felével eltolva. A számítás eredménye az, hogy csak az utóbbi eset valósul meg a természetben, csak ez lesz stabil, és pedig abban az esetben, ha a b/l hányados meghatározott értékű. Itt b a két örvénysor közti távolság, l – mint említettük – az örvények közti távolság az egyes örvénysorban (1. ábra, Kármán eredeti rajza az [1] cikkből és 2. ábra: Kármán az örvénysorral). Az örvénysorokra felírt differenciálegyenletek elemzéséből az örvénysorok u sebességére adódik:

$$u = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\xi}{l},$$

ahol ξ az örvényerősség.

1. ábra. Kármán eredeti rajza az örvénysorokról a *Göttinger Nachrichten*ben megjelent közleményéből.





2. ábra. A Magyar Posta 1992-ben emlékbélyeget adott ki, amelyen az örvénysorok is látszanak.

Kármán Tódor nyomán az ellenállás-mechanizmust a következő módon magyarázzuk. A nyugvó folyadékban a test U sebességgel halad az x irányban. A test mögött emiatt örvényes mozgás alakul ki, amely a testtől bizonyos távolságra már a fent kiszámított stabil konfigurációtól alig tér el. Ez a mozgásállapot a testhez rögzített vonatkoztatási rendszerben nem stationárius, hiszen az örvénysorok csak $u < U$ sebességgel terjednek. Ez vezet arra, hogy az örvénysorok leszakadnak a testről – miközben újból keletkeznek a test mögött. A leszakadó örvénysorok a folyadékhoz képest $U - u$ sebességgel mozognak, ez impulzust von el a testtől, ez vezet a közegellenálláshoz. Ezáltal ugyanis az örvénysorok $U - u$ sebességkülönbséggel elszakadnak a testtől és ez a W ellenállási erőre a

$$W = \rho \xi (U - u) \frac{b}{l}$$

képletet adja. Most már csak a ξ örvényerősséget kell meghatározni. Abból kell kiindulni, hogy az izolált örvényfonal stabil állapota az instabil örvényrétegnek. Ezért tegyük fel, hogy az egyes örvényfonalak örvényerősségét megkaphatjuk, mint az l hosszúságú örvényréteg cirkulációjának összegét, hiszen ebből származik. Ezért

$$\xi = Ul.$$

Ebből viszont az örvényrendszer terjedési sebességére

$$u = \frac{U}{\sqrt{6}}$$

adódik. Így az ellenállási erőre kapjuk, hogy

$$W = \frac{\sqrt{6} - 1}{\sqrt{6}} \rho b U^2.$$

Előnyös, ha az általános szokásnak megfelelően bevezetjük a φ „ellenállási számot”, amivel

$$W = \varphi \rho L U^2,$$

itt L a végtelen szélességűnek gondolt test valamilyen más, tetszőleges mérete (lemezvastagsága, ha körhenger, akkor annak átmérője stb.). Erre azért van szükség, hogy az elméleti elgondolás eredményét a tapasztalattal összehasonlíthassuk. Ezzel

$$\varphi = \frac{\sqrt{6} - 1}{\sqrt{6}} \frac{b}{L}.$$

Ennyi az 1911. évből származó dolgozat [1] tömörített kivonata, amely mutatja, hogy az örvénysorokkal sikerült a négyzetes közegellenállási törvény mögé pillantani. Az első pozitívum: sikerült a fenomenológiai törvény mögött meghúzódó fizikai folyamatokat feltárni. Ezen eredmény jelentőségét nehéz úgy felmérni, hogy ne essünk túlzásba. Azokról a kimagasló eredményekről, amelyek a további évtizedekben mutatkoztak meg, az életrajz rövid folytatása során emlékezünk meg az alábbiakban.

Kármán Tódor életútja az örvénysorok felfedezése után

Az örvénysorok problémaköre után Kármán még több érdekes kérdéssel foglalkozott, de az első világháború kitörése az ő életét is befolyásolta. Az akkor 33 éves

3. ábra. Theorode von Kármán, az osztrák–magyar légierő hadnagya. Az örökölhető nemesi előnév a „von” használatát Tódor édesapja, Kármán Mór az uralkodótól, Ferenc Józseftől kapta egyik császári unokaöcs tanításának elismeréseként.



göttingeni professzor hazatért, mert behívót kapott. Halálkárosodása miatt hátországi szolgálatra rendelték. Közel egy évig egy csepeli ruharaktárban dolgozott, majd a Bécs melletti Fischamendbe került, ahol a Monarchia új fegyverneme, a hadirepülő-arsenál központja volt (3. ábra). Itt végre a repüléssel lehetett foglalkozni, részt vehetett egy helikopteres konstrukció megvalósításában. Ez azt a cél szolgálta, hogy a tüzérség hatásosságát megfigyelhessék, a léggömbre helyezett szemlélő helyett az üteg felett egy helikopteren. Ez az alkotókról, *Petróczy Istvánról*, *Kármán Tódorról* és *Zsurovecz Vilmosról* elnevezett PKZ-jelű helikopter (4. ábra).

A háború végén Kármán Budapestre került, az oktatásügyi minisztériumban a felsőoktatási osztály vezetője lett. Ebben a minőségben vett részt Eötvös Loránd temetésén.

A következő években Aachenben találjuk, hiszen 1913-as professzori kinevezése nem évült el. Itt – úgy látszik – megtalálta helyét, egyetemi tanárként kedvére foglalkozhatott a repülés problémáival, lehetősége volt arra, hogy hatalmas szélcsatornát építsen a konstrukciók kísérleti vizsgálatára. Ez azonban ismét nem tartott soká. A békeszerződés Németországot többek között a repülőgépipar területén is korlátozta. A húszas évek még csak-csak elteltek. Ekkorra Kármán légügyi, a gépkonstrukciós kérdésekben már világszerte elfogadott, sőt keresett szaktekné. 1933-ig ideje jelentős részében a világot járta, ahová szakmai kérdésekben hívták a légitársaságok műszaki tanácskérések során. A hitleri hatalomátvétel előtt Kármán többekkel együtt úgy látta, hogy új „hazát” kell keresnie. Ezt az új hazát *Robert Andrews Millikan* (1868–1953) Nobel-díjas fizikus a California Institute of Technology (a kaliforniai műegyetem) akkori vezetője kínálta neki, aki Pasadena-ba hívta, tanszéket és kísérleti laboratóriumot ajánlva. *Daniel Guggenheim*, az amerikai „rézkirály” adománya segítségével megalapította a pasadenai kísérleti aerodinamikai laboratóriumot (amiből 1943 után a Jet Propulsion Laboratory lett). 1935-ben Kármán az Amerikai Egyesült Államok állampolgárságát is megkapta.

Az Egyesült Államokban nemcsak a pasadenai központ fejlesztésén dolgozott. Az amerikai repülésügy komplex fejlesztésébe kezdett, előbb a polgári, később az eredményeknek megfelelően a nagy távolságú szállítórepülő és a harci repülő terén is, már a II. világháború folyamán.

Közben egy sajátos esemény, a Tacoma-Narrows tengerszoros felett épített híd összeomlása újra előtérbe hozta az örvénysorok problémáját. 1940. november 7-én a Washington államban lévő, a szoros felett épített 853 m hosszú híd az erős szélben sajátos kilengések – először rezonanciajelenségnek értelmezett hatások – következtében leszakadt. A tragédiát követően Kármán az *Engineering News Record* hasábjain nyílt levélben megírta, hogy nézete szerint a híd bevezetését a széláram hatására kialakuló és leszakadó örvénysorok okozták. Az esemény után természetesen műszaki vizsgálóbizottság alakult, amelynek tagjai sorába őt is meghívták. A híd újjáépítési munkálatai megkezdődtek, az ő javaslatait is figyelembe vet-



4. ábra. Kármán Tódor és Zsurovecz Vilmos Fischamendben a Petróczy István parancsnoksága alatt működő fejlesztő részlegben kifejlesztették a világon az első „kötött helikoptert”, a PKZ-helikoptert, amely tüzérségi megfigyelés céljaira szolgált. Az egyik első kísérlet (felül) és emberrel végrehajtott felszállás (alul).

ték. Az új híd 1950-ben készült el, áramvonalas alakja jelentősen csökkentette az örvénysorok kialakulásának lehetőségét, és a híd még ma is áll.

A II. világháború alatt az Egyesült Államok kormányának légügyi szakértőjeként dolgozott. Számos gyakorlati javaslata vált be, csak azt emeljük most ki, hogy a nagy hatótávolságú bombázó és vadászrepülő üzemanyaggal való – repülés közben végrehajtott – újratöltését (egy másik repülőgépről) az ő elgondolása alapján vezették be.

A múlt század negyvenes éveitől kezdve Kármán Tódor a repülésügynek nemcsak az azonnali korszerűsítését tekintette kikerülhetetlen feladatnak. Az egész légi közlekedés minden kérdésében rendszeres, az oktatás részleteit is mozgósító előadásokat szervezett, ezek nagy részét ő maga tartotta. Az úttörő munka nemcsak a torlósugar-meghajtásra való áttérés, hanem az igazi rakétahajtás lehetőségeit is érintette. Csakhamar eljutott az interkontinentális, majd a kozmikus rakéták problémáihoz, ami mind a repülő tesztek alakját, mind a hajtóművek és hatóanyagok kérdését magában foglalta.

Ugyanakkor világos volt számára, hogy az egész „rakétaügy” két szektorra bomlik, az egyik az azonnali, „földi” alkalmazás, az Egyesült Államok hadi potenciálját érintő kérdés, a másik viszont az egész emberiség, az osztatlan „Kelet” és „Nyugat” közös ügye, a kozmikus űrhajózás kidolgozása. Ez utóbbit illetően egyik korszakalkotó diplomáciai eredménye a „Nemzetközi Asztronautikai Föderáció” (az egyes országok asztronautikai célú egyesületeinek összefogására

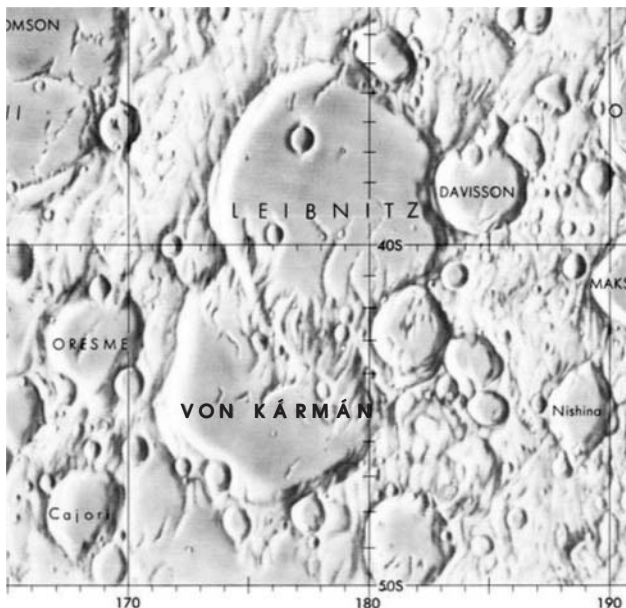


5. ábra. John F. Kennedy, az Egyesült Államok elnöke adta át a National Medal of Science kitüntetés első példányát Kármán Tódornak 1963 februárjában.

szánt szövetség) megalakítása (1951). A másik pedig a világ minden asztronautikai témában eredményt elért kutató érdemi összefogásának és elismerésének célját szolgáló „Nemzetközi Asztronautikai Akadémia” megszervezése, ahol ténylegesen minden tevékenység számított, ami az asztronautika jelenét és jövőjét befolyásolhatja, a jogi kérdésektől kezdve a gyakorlati űrkutatás orvosi, mérnöki, konstrukciós, csillagászati stb. problémáit felölelve (1960).

Nem csoda tehát, hogy Kármán Tódor, a gépészmérnök, a repülésügy szakértője, a modern repüléstechnika nemzetközi előmozdítója, az asztronautika igencsak tevékeny szakembere 1963-ban *J. F. Kennedytől*, az Egyesült Államok elnökétől a National Me-

7. ábra. Kármán Tódorról elnevezett kráter a Holdon (44,8° dél, 175,9° kelet). Természetesen a von Kármán nevet keressük!



6. ábra. Az Egyesült Államok postája bélyegkiadással emlékezett meg Kármán Tódor születésének centenáriumáról.

dal of Science első példányát kaphatta meg egész tudományos tevékenysége elismeréséül (5. ábra).

Tudományos munkáinak gyűjteményes kiadása 1956-ban jelent meg [10].

Születésének századik évfordulóján, az Egyesült Államok emlékbélyeg kiadásával emlékezett meg az „Aerospace Scientist”-ről, vagyis „a repülés és űrrepülés tudósáról” (6. ábra).

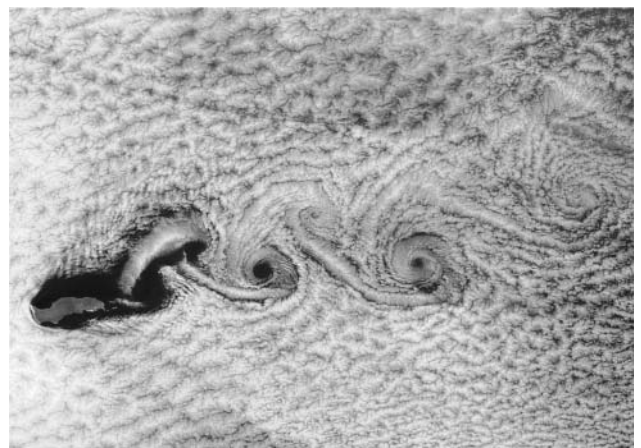
Hogy a tudós világ milyen nagy becsben tartja őt, arra jellemző: a Hold túlsó oldalán (7. ábra) és a Mars-on is egy-egy kráter elnevezése őrzi emlékét.

Az örvénysorok napjainkban is elő-elő kerülnek. Egy műholdas felvétel révén a felhőkben kirajzolódó örvénysor látható, ami Guadelupe szigetének hegyei miatt alakult ki. A felvételt egy NASA műholdon elhelyezett kamera készítette 2012. június 20-án (8. ábra).

Köszönetnyilvánítás

E sorok írója itt szeretne köszönetet mondani azoknak, akiknek segítségével és találmányosságával nélkül ezt a munkát nem tudta volna elvégezni. *Scharnitzky Viktorné Borika* könyvtáros szakértelmének és lelkes támogatásának köszönöm az [1] és a [10] irodalom felkutatásának eredményét. *Kendei András* figyelme nélkül mindörökké rejtve maradt volna az örvénygyűrűk Guadelupe-szigeti képe. Mindkettőjüknek hálás köszönet a segítségükért.

8. ábra. Érdekes felvétel a Föld körül keringő mesterséges holdról: Guadelupe szigete mellett a felhőkben a szél a hegy környékén egy Kármán-féle örvénysort kelt.



Irodalom

1. Th. v. Kármán: Über den Mechanismus des Widerstandes den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt. *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen* (röviden: *Göttinger Nachrichten*) (1911) 509–517.
2. Th. v. Kármán, H. Rubach: Über den Mechanismus des Flüssigkeits – und Luftwiderstandes. *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912) 49–59.
3. Arnold Sommerfeld: *Atombau und Spektrallinien*. Vieweg, Braunschweig, 1924.
4. Arnold Sommerfeld: *Mechanik der deformierbaren Medien*. (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd II.), első kiadás: Geist & Portig K. G., Leipzig, 1944.; második kiadás még Sommerfeld életében: 1948.
5. Budó Ágoston: *Mechanika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1951. (első kiadás), harmadik kiadás: 1969.
6. L. D. Landau, E. M. Lifsic: *Hidrodinamika*. (fordította: Boschán Péter) Tankönyvkiadó, Budapest, 1980. Az orosz nyelvű eredeti 1953-ban jelent meg.
7. H. Niedering: Fizika, B. 1–233., Valós folyadékok áramlásai, B. 89. in Hütte: *A mérnöki tudományok kézikönyve*. Springer Verlag, Budapest, 1993.
8. Demény András, Erostyák János, Szabó Gábor, Trócsányi Zoltán: *Fizika I. Klasszikus mechanika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005. 316.
9. Tasnádi Péter, Skrapits Lajos, Bérces György: Klasszikus mechanika. 172–174. in Bérces György, Erostyák János, Klebiczki József, Litz József, Pintér Ferenc, Raics Péter, Skrapits Lajos, Sükösd Csaba, Tasnádi Péter: *A fizika alapjai*. (szerkesztették: Erostyák János, Litz József) Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003.
10. *Collected Works of Dr. Theodore von Kármán*. Vol. I–IV. Butterworth Scientific Publications, London, 1956.

A FIZIKA TANÍTÁSA

ILYEN MÉG NEM VOLT

Simon Péter

Leőwey Klára Gimnázium, Pécs

Teljesen természetes, hogy a fiatalok élmények meghatározzák az ember egész életét. Szívesen emlékezünk vissza gyermekkorunkra, osztálytársainkra, közös történeteinkre. Sokunknak vannak kedvenc tanárai. Ha egy asztaltársaságban kiderül, hogy valaki pedagógus, akkor az ő munkájáról sokan érdeklődnek, hiszen az mindenkit érint, és a megkérdézett pedagógus is szívesen mesél. Nekem is rengeteg kellemes emlékem van gyerekkoromból, amelyek többsége az iskolához köthető. Ma is tisztelem volt tanárait, sokat kaptam Tőlük, ittam minden szavukat.

Tanárnak lenni nagyszerű dolog. Igaz, gyakran panaszkodunk szerény anyagi elismerésünk miatt, de ha ezen túllépünk, akkor csak jót tudunk mondani a munkánkról. Igazán izgalmas együtt lenni a fiatalokkal. Látni, ahogy 14 éves gyerekekből 18 éves fiatalemberekké fejlődnek. Jó dolog segíteni őket. Persze erre a segítségre nem úgy kell gondolni, hogy az erős segít a gyengén. A tanítás-tanulás folyamata tanár és diák együttműködését jelenti.

Délutáni szakkör

A tehetséggondozásnak látszólag az a célja, hogy a diákokat sikerrel készítsük fel a tanulmányi versenyeken való szereplésre. Egy verseny valójában további tanulásra motivál, így annak eszköze lesz, hogy a diákok még felkészültebben érkezzenek az egyetemekre. Hiszen ma már a legtöbb diáknak nem okoz problémát a felsőoktatásba való bejutás. Az igazi kihívás a bennmaradás és a sikeres végzés. A tehetséggondozás alapja a délutáni szakköri és az otthoni munka. A délutáni szakkörre azonban ma már nagyon nehéz viszszaacsalgatni a diákokat. Ez sajnos egy kihalóban

lévő munkaforma. Egyrészt nem ismerik az ilyen jellegű foglalkozásokat, másrészt a legtöbb mai diáknak délutánonként rengeteg más elfoglaltsága van: nagyon erős az árnyékotatás, nyelvórák, zeneórák, sport vonzása. A fizikasakkörnél sokkal népszerűbbek a gyors, látványos sikerrel kecsegtető elfoglaltságok. A tanárok sem egyformán lelkesednek azért, hogy szakkört tarthassanak. Az iskolák egy része eddig teljes mértékben kifizette a szakköri munkát, másik része csak részben, illetve egyáltalán nem.¹ Kevés tanár áldoz a szabadidejéből a gyerekekre. A mai anyagi körülmények között nehéz otthon elmagyarázni a családnak, hogy délutánonként miért is dolgozom ingyen a munkahelyemen. Az utóbbi években megjelentek ugyan a természettudományos szakköri munka támogatására pályázatok, de olyan feltételekkel, hogy ezeken a foglalkozásokon a gyerek alkosson meg valamit, kutasson valamilyen témában, és a tanár ezt a kutatói munkát támogassa. Úgy látszik, a klasszikus fizikasakkört, amelyen az órai tananyagot mélyítjük elmélettel, számítási feladatok megoldásával, kísérlettel, méréssel, az oktatási kormányzat nem támogatja. Pedig az igazán alapos tudást ezeken a foglalkozásokon szerzik meg a tanulók. Ezt nem csak én gondolom így, hanem azok a volt diákok is, akik annak idején jártak a szakköreimre, ma pedig már sikeres mérnökök, kutatók.

Nagyon szeretem a délutáni fizikasakköröket. Nem csak a legügyesebb diákok miatt – akik akár versenyek döntőjéig is eljutnak –, hanem azok miatt is, akik egy közepes szintről eljutnak a stabil ötösig,

¹ A pedagógus életpályamodell ezt a területet is egységessé teszi. A kötelező (heti 22-26) óraszámom felüli munkaidőben tarthat a tanár szakkört az alapbért...

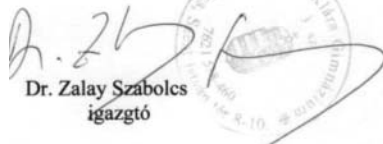


IGAZOLÁS

Alulírott Dr. Zalay Szabolcs a pécsi Leőwey Klára Gimnázium igazgatója hivatalosan igazolom, hogy Szabó Attila, iskolánk 12.c osztályos tanulója az 2012/2013-as tanévben négy tantárgyból: fizika II., matematika II., kémia II., informatika II. bejutott az OKTV (Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny) országos fordulójába és ott az alábbi eredményeket érte el:

Fizika II.: 1. hely	Felkészítő tanára: Simon Péter
Matematika II.: 1. hely	Felkészítő tanára: Kiss Zoltán
Kémia II.: 2. hely	Felkészítő tanára: Dr. Nagy Mária
Informatika II.: 3. hely.	Felkészítő tanára: Tóthné Aschenbrenner Juit

Pécs, 2013. április 18.


Dr. Zalay Szabolcs
igazgató

Szabó Attila OKTV eredményei 2013-ban

és a szakköri munkának köszönhetően gyönyörű szép érettségi vizsgát tesztek fizikából.

Szerencsés vagyok, mert sok tehetséges diákkal hozott össze a sors már eddig is a pályámon. Tanítványaim, *Almási Gábor* és *Lovas Lia Izabella* is kétszer-kétszer volt olimpikon. Izabella 2009-ben olimpiai aranyéremmel búcsúzott a gimnáziumi évektől. Nagyon boldog voltam, hogy két ilyen tanítvánnyal is találkozhattam. Akkor azt gondoltam, hogy akkor is elégedett lehetek, ha több ilyen sikeres diákom már nem lesz a jövőben.

9. osztály

És jött 2009 szeptembere. *Szabó Attila* általános iskolai versenyeredményeiről hallottam, őt magát személyesen nem ismertem. A 9. osztály első fizikaóráján ismertem meg személyesen. Akkor szoktam hirdetni a szakköreimet, és ő jelentkezett rájuk. Elég hamar kiderült számomra, hogy Attila zseniális. Szerintem még szeptemberben, az egyik modernfizika-szakkörön Attila csillogó szemekkel megkérdezte egy hőtani problémával kapcsolatban, hogy nem lehet-e ezt a feladatot integrálszámítással is megoldani. (Természetesen nagy örömmel úgy is megoldottuk...) Négy évvel korábban Izabella tette fel ugyanezt a kérdést. Izabella 2009 tavaszán megnyerte a Szilárd-versenyt, nyáron aranyérmet szerzett a fizikai diákolimpián Mexikóban, ősszel megnyerte az Eötvös-versenyt.

Attila a második diákom, aki így oldotta meg az említett feladatot. Ekkor neveztem el Attilát Közép-Európa Legnagyobb Reménységének, amely elnevezés később átkevert több cikkbe, interjúba. És kíváncsian vártam, Attilánál vajon milyen lesz a folytatás.

Attila okozott még kellemes meglepetést ebben a tanévben. Megsajnáltam a diákokat, hogy sokat kell jegyzetelniük szakkörön. Hétről-hétre csináltam nekik egy-egy kivonatot, így gyorsabban tudunk haladni az elmélettel, számításos feladatokkal és mérésekkel. Attila jelezte, hogy ő ezeket az elméleti összefoglalókat, feladatlapokat összeszerkeszti. Teltek a hónapok. Én már el is felejtettem az ősszel tett ígéretét, amikor is a tematikus felkészülést követően, február közepén elektronikus postán elküldte nekem az általa latexben, profi kiadványszerkesztő program segítségével szerkesztett „kész könyvet”.

Nagyon igényesnek találtam munkáját. *Sükkösd Csaba* tanár úr (BME) vállalta a lektorálást, a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány pedig

a kiadást. 2010 áprilisában, amíg Attila a Szilárd Leó versenydolgozatot írta, én a kollégáknak bemutattam a szakköri jegyzetet, amelyet a közös munka gyümölcsének tekintek.² Attila kilencedikesként, magas pontszámmal megnyerte a versenyt.

És ilyen még nem volt: ezt követően még háromszor lett a Szilárd Leó verseny első helyezettje!

Gimnáziumi tanulmányai során az összes hazai fizikaversenyt megnyerte: a Mikola-versenyt kétszer, a fizika OKTV-t kétszer, a Békési-versenyt, a *KöMaL* fizika feladatmegoldó pontversenyt négyyszer, a *KöMaL* mérési pontversenyt (maximális pontszámmal) négyyszer.

10. osztály

Az elsős sikerek után nagyon akartuk, hogy másodikosként olimpikon legyen. Attilának és általában annak, aki olimpikon akar lenni, egy sajátos életformát kell kialakítania: eljárni sok-sok szakkörre (Attila részt vett a *Kotek László* által vezetett pécsi olimpiai felkészítő szakkörön, és a 11–12. évfolyamon a budapesti központi szakkörön is.), *KöMaL*-ozni, versenyekre készülni, a neten kutakodni okos dolgok után, otthon egyedül sokat tanulni, és általában sokat gondolkodni különböző problémákon. Attila ezt az életformát követte. Igen motiváló a hasonló képességű és érdeklődésű kortársakkal kialakított baráti és szakmai kapcsolat is.

² 2013 áprilisában a 2. javított, bővített kiadás is megjelent.

A 10. osztályban érte el első nemzetközi sikereit: 2011 tavaszán Csehországban az EU természettudományos diákolimpiát (EUSO) Magyarország nyerte. Attila 100%-os teljesítménnyel volt csapattag. Első helyezett lett a Román–Magyar–Moldáv Előolimpiai Fizikaversenyen. (Ezt a versenyt még kétszer megnyerte.)

Amikor 16 évesen bekerült a magyar olimpiai válogatott csapatba és ennek tagjaként ezüstérmert szerzett a Nemzetközi Fizikai Diákolimpián, Thaiföldön, a hazai és a nemzetközi szakma is felfigyelt tehetségére.

11. osztály

2011 decemberében holtversenyben abszolút első lett az egyetemistáknak meghirdetett Ortvy Rudolff Nemzetközi Problémamegoldó versenyen. Az elérhető 1000 pontból 895-öt szerzett. Azonos pontszámmal hárman lettek 1. díjasok: Attila mellett még *Bodnár József* Phd-hallgató és Almási Gábor (4. éves egyetemista, volt leőweys diák).

2012. januárban, harmadéves gimnazistaként aranyérmes (4. helyezett) lett az Indonéziában megrendezett I. Fizika Világbajnokságon (World Physics Olympiad). Az első három helyezett akkor már mind első éves egyetemi hallgató volt.

Júliusban Attila ritkán látott fölényrel abszolút első helyezést ért el az Észtországban rendezett Nemzetközi Fizika Diákolimpián (IPhO). Csaknem 7%-kal előzte meg a második helyezett kínai diákot. Ekkor hirdették ki a Physics Cup végeredményét is: Attila 1. helyezett. Hatalmas siker!

Utoljára hét évvel korábban volt nem ázsiai diák az abszolút első helyen: *Halász Gábor* (Honyek Gyula tanítványa).

12. osztály

Vigh Máté, az Ortvy Rudolff nemzetközi fizikai problémamegoldó verseny versenybizottsági tagja, 2012. december 7-én az Eötvös Loránd Fizikai Társulat információs és vitalapján (Fizinfo) a következőket írta Attiláról:

„A nemzetközi Ortvy-versenyen hatalmas fölényrel (120 pont) az egyetemistákat és PhD-sokat megelőzve abszolút első lett, az elérhető 1000 pontból 990 ponttal. Ez amelle, hogy minden idők egyik legmagasabb pontszáma, azért is kiemelkedő, mert a középiskolában előforduló témák mellett szilárdtestfizikai és statisztikus fizikai (Ising-modell) példákra is hibátlan megoldásokat adott. Az idei versenyen Attila már feladatkitűző is volt: egy kvantummechanika és egy elméleti mechanikai feladattal emelte a kitűzött példák fényét. ... Fél évvel ezelőtt Attila még semmit nem tudott

Szabó Attila érettségi bizonyítványa

kvantummechanikából, azóta viszont falja a modern fizikai könyveket. Saját bevallása szerint a kvantummechanikát a Landau 3-as kötetéből (!) tanulta, ... Örülök, hogy ilyen kivételes tehetség bukkant fel hazánkban és nagyon várom, hogy milyen sikerekkel örvendeztet meg minket a jövőben. Talán túl finoman fogalmazok, ha azt mondom: nem minden évtizedben fordul elő ilyen talentum. Legyünk rá büszkék!”

Az idei Nemzetközi Fizikai Diákolimpia volt a 44. Természetesen minden évben van abszolút győztes, ami nagyon nagy dolog. Olyan korban élünk, amikor a művelt világ erre a hírre felfigyel. Olyan viszont még nem volt, hogy egy diák kétszer legyen abszolút első. Történelmi pillanat: Szabó Attila az első diák, aki kétszer lett abszolút győztes ezen a versenyen (2012: Tallin, 2013: Kopenhagen). Erre felszisszen a világ!

A siker forrása

Attila sikere mögött két fontos dolog áll: Attila és a megfelelő környezet. Részletezve: Attila nagyon jó képességekkel van megáldva, és rengeteg sikere volt már eddig is a tanulmányai során. Attila nem csak jó képességű, hanem szorgalmas is, rengeteget dolgozik otthon. Örömet leli a munkában, ami neki most a tanulás, a gondolkodás.

A másik nagyon fontos tényező a megfelelő környezet. Itt gondolok egyrészt a biztos, nyugodt családi háttérre, másrészt az egyedülálló magyarországi fizikaverseny-rendszerre, amelynek gyökerei egészen a 19. század végéig nyúlnak vissza. Hazánkban 120 éve létezik a *KöMaL*, minden korosztálynak megvan a saját fizikaversenye: az általános iskolásoknak az Öveges-, a kicsi gimnazistáknak a Mikola-, a sok-sok megyei verseny, a nagy gimnazistáknak a Szilárd-, az Eötvös- és természetesen az OKTV. A sok-sok egymásra épülő fizikaverseny motiváló hatású, célt ad az



Szabó Attila a kétszeres olimpiai abszolút győztes

ügyesebb gyerekeknek. Mindez komoly múltra tekint vissza. A jelen eredményei azt sugallják, hogy a szerény és kiszámíthatatlan ütemezésű állami támogatás mellett (és ellenére) is működik ez a versenyrendszer. A jövő kicsit bizonytalan. A „nagy” versenyek motiváló ereje sokat gyengült, amikor megszüntették azt, hogy az egyetemi felvételnél beszámítsanak az ezen versenyeken elért eredmények. Ez a versenyekre való jelentkezési számokból egyértelműen látszik. A Szilárd-versenynél például az oktatási kormányzat annak ellenére sem volt hajlandó felvételi pontszámokkal elismerni a teljesítményt, hogy öt nagy egyetem természettudományi karának dékánjai emelték fel a szavukat ennek érdekében. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat pedig minden oktatási kormányzatot megkeresett már a nagy múltú és magas színvonalú fizika-versenyek felvételénél történő figyelembe vételével kapcsolatban – hiába. Itt sokat lehetne tenni egyszerű adminisztratív intézkedésekkel, amihez még pénz se kellene. Azt viszont biztosan lehet tudni, ha ez a most jól működő rendszer egyszer összeomlik, akkor újrászervezni csak nagy munkával lehetne. A tehetség-gondozást az iskolai szakkörökre kéne építeni. Iszo-

nú tempóban fogy az a keret (azok az iskolák, azok a tanárok), ahonnan válogatni lehet. Egyre kevesebb az az iskola, ahol szakköri munka folyik. Az a tanár, aki délutáni szakkört tart, többnyire a szabadidejét áldozza fel, mert az iskola nem tud fizetni neki. Hosszú évek óta folyamatosan csökken a tanárok reálbére (is), egyre többen adják fel a „hobbijukat”, és helyette próbálnak pénzt keresni, hogy megéljenek. Minden más hír ellenére a pedagógus életpályamodell sem hoz ebben változást.

A tehetség-gondozás sem anyagilag, sem erkölcsileg nincs a helyén kezelve ma Magyarországon. Vajon hány ember, hány kémiantár tudja, hogy mikor volt legutóbb Budapesten a Nemzetközi Kémiai Diákolimpia? (2008-ban.) Vajon hány ember ismeri a helyes választ arra a kérdésre, hogy ki kapott legutóbb magyar származásúként Nobel-díjat? (*Avram Hersko*, azaz *Herskő Ferenc*, kémiai Nobel-díj, 2004.) 2012 tavaszán, amikor az észt csapat abszolút első volt az EUSO-n, a legnagyobb észt újságok címlapon hozták a hírt. 2011-ben Magyarország nyerte meg ugyanezt a versenyt. Értesült a közvélemény erről? (A Klubrádióban csinált Vankó Péter csapatvezetővel *Zsíros László Róbert* egy negyedórás riportot – talán ez volt az egyetlen sajtóvisszhang.)

De most térjünk vissza Szabó Attilára! Természete-sen más tárgyakból is fantasztikus eredményeket ért el Attila. 2012 szeptemberében Attila (a magyar csapatból egyedüliként) aranyérmes szerzett a Közép-Európai Matematikai Diákolimpián (MEMO). 2013 júliusában a Nemzetközi Matematikai Diákolimpián (IMO) a magyar csapat második legjobb eredményével ezüstérmes szerzett. Informatikából minden évben dobogós helyen végzett országos versenyeken. A kémia OKTV-n idén a 2. helyet szerezte meg.

Attila eredményeit nem magántanulóként, hanem az iskola rendes tanulójaként érte el. Fontos volt számára, hogy általános műveltséget szerezzen, hogy osztályközösségben, diáktársaival – akik tisztelik őt szorgalmáért, helytállásáért, szerénységéért – együtt élje meg a gimnáziumi éveket. Tanárai szerint jó volt vele együtt dolgozni, mert őszinteségével, remek humorával, meglátásaival, kérdésfeltevéseivel elgondolkodtat és új megvilágítást ad a megszokottnak.

Ilyen diákom még nem volt és nem csak nekem. Attila elhagyja a pécsi Leőwey Klára Gimnáziumot és Magyarországot is. Nevét az egész világon ismerik. Cambridge-ben folytatja tanulmányait. Diákkori élményei ígéretes felnőttkort alapoztak meg neki. Köszönjük Attilának az együttes munkát, a sok inspirációt. Kívánjuk, hogy legyen sikeres a kutatói pályája! Attila, kérünk, adj nekünk hírt magadról a jövőben! Sok boldogságot!

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

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

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

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

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

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

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

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

FIZIKA ÉS FÖLDRAJZ HATÁRÁN – TANÍTHATÓ-E A CORIOLIS-ERŐ?

Szeidemann Ákos
Eötvös József Gimnázium, Tata

A Coriolis-hatás tanításának nehézségei

A címbeli kérdés kétértelmű, nem véletlenül. Egyrészt: szabad-e tanítanunk a tehetetlenségi erőket fizikaórán? Másrészt pedig felmerül: meg lehet-e tanítani a Coriolis-erőt mondjuk 9. évfolyamon? Elsőre egyáltalán nem egyértelmű a pozitív válasz. Korábban én is úgy gondolkodtam – ismerve az akkori tankönyvek szokásos gondolatmenetét a gyorsuló vonatkoztatási rendszerek témakörében –, hogy egyszerűbb ismeretek is nehezen adhatók át a diákoknak. Sokáig gondot okozott számomra az inerciarendszer fogalmának tanítása, illetve használata. Mindig úgy éreztem, többet kellene magyaráznom diákjaimnak a pontos megértéshez. Ma már tudom, hogy nem mindig szükséges a teljes precizitás, hiszen a diákok világképe hosszú idő alatt formálódik, de persze fontos rávilágítani a nehézségekre.

A Newton-törvények megértése az egyik sarkalatos pontja a fizika tanításának. Az arisztotelészi kép erősen működik a gyerekekben, amit sokszor a dinamika tanulása közben sem lehet kellő szinten helyrerakni. Ez a jelenség elsősorban a tapasztalatoknak a nem adekvát fogalomrendszerrel való magyarázatára vezethető vissza. Az utóbbi években például egyre gyakrabban tapasztalom a kinematika tanítása közben, hogy a diákok „nagyszerűen” megtanulják az egyenletes mozgás út-idő összefüggését, de nem vesznek tudomást más típusú mozgásokról. Hosszú gyakorlás eredményeként lehet csak elérni, hogy változó mozgások esetén ne számoljanak az $s = v \cdot t$ képlettel [1].

A tehetetlenség törvényének értelmezése – látszólag – nem jelent gondot, hiszen az egyenes vonalú egyenletes mozgás jelenik meg benne, de a dinamika alaptörvényét csak mint begyakorolt matematikai formulát kezeli a legtöbb diák. A mennyiségek közötti logikai kapcsolat már nem tisztul le bennük, és zavaros számukra a vonatkoztatási rendszer szerepe is. Ezt nehezíti még az a tény, hogy a newtoni dinamika fogalomrendszerének „megszilárdulása” előtt más tantárgyból – alkalmazás szintjén – előkerülnek a forgó Földön tapasztalt áramlási jelenségek. A földrajz szaknyelve nem használja a vonatkoztatási rendszer és a gyorsulás fogalmát sem, így ott nem nyer értelmezést az erő és a sebességváltozás közötti szoros kapcsolat. Ezt tetézi az a – módszeres megfigyelések nélküli magyarázaton alapuló – tévképzet is, miszerint a fürdőszobai lefolyóban tapasztalt forgómozgást is a Föld forgása okozza.

Tehát arra a kérdésre, hogy szabad-e tanítanunk a tehetetlenségi erőket, határozottan az a válaszom, hogy igen, sőt megkockáztatom: kell tanítanunk ezt a témát, hiszen így nyernek a fogalmak igazi értelmet,

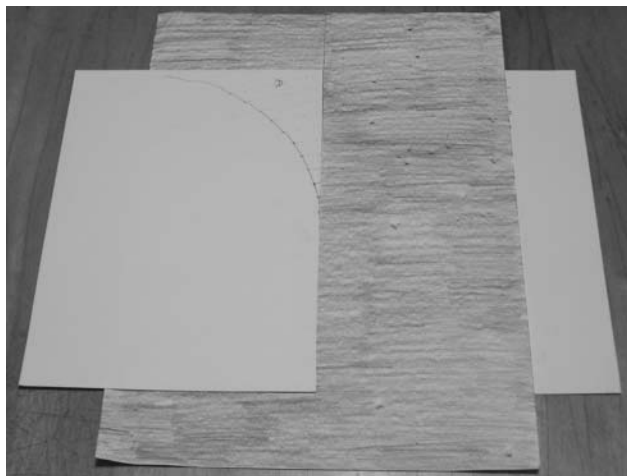
és ezáltal segítjük a természetföldrajz tanítását is. Nem pusztán arról van szó, hogy a földrajzórán hallottakat megerősítjük, magyarázzuk, hanem olyan módszert választunk, amely a fizikatanítás sajátja, és természetesen hathat más tárgyak, jelen esetben a földrajz tanulására. Az ilyen értelemben vett komplex, egymásra épülő természettudományos oktatásnak látom értelmét. Ez is az oka, hogy – véleményem szerint – nem járna sikerrel egy komplex természettudományi tárgy bevezetése (a természettudományi érettségi már működik, ami persze nem mond ellent állításomnak). Rögtön adódik a kérdés: megvalósítható-e az integrált természettudományos szemlélet, ha például fizikaórán a tantermi fizikára korlátozódunk és megmaradunk a klasszikus kísérletek szintjén.

Coriolis-hatás a földrajz tanításban és az érettségiben

A magyarországi oktatási gyakorlat erőteljesen épít a tankönyvre, mint tanulást segítő eszközre [2], ezért érdemes áttekintenünk a vonatkozó tartalmakat. A természetföldrajz témáit tárgyaló tankönyvek több fejezetben is foglalkoznak a Coriolis-erő komoly ismeretét feltételező tartalommal. Három forgalomban lévő, 9. évfolyamnak íródott földrajz tankönyvet vizsgáltam a Coriolis-erő fogalmának megjelenése szempontjából. *Makádi Mariann* és *Taraczközi Attila* [3] nem használják könyvükben a Coriolis-erő kifejezést, hanem a következőképpen fogalmazzak: „A ciklonokban a levegő kívülről befelé áramlik, mert a közepén alacsonyabb a légnyomás, mint a környezetében. Am az áramló levegő súrlódik a felszínnel, és a Föld forgásából származó tehetetlenségi erő eltéríti eredeti irányából. Ezért a felszín közelében a levegő befelé, az északi félgömbön az óramutató járásával ellentétes irányban áramlik.”

Nemerikényi Antal és *Sárfalvi Béla* [4] talán fölismerték azt a hiátust, amely a két tárgy tanítása közben fellép, ezért külön kiemelt részben foglalkoznak a Coriolis-erővel. A megértést segíti egy ábra is. Fontos azonban megjegyeznünk, hogy a kiemelt magyarázat is pusztán azt a szokásos gondolatmenetet használja, amely szerint az északi féltekén az É–D, illetve D–É irányú mozgást végző légtömegek „lemaradnak”, illetve „megelőzik” a Földet, vagyis jobbra térülnek el. Ebben persze rejtve benne van, hogy a forgó rendszerben mozgó test esetén kell figyelembe venni ezt a hatást, de mi történne például egy K–NY irányú áramlás esetén?

Arday István, *Rózsa Endre* és *Ütőné Visi Judit* tankönyvírók is említést tesznek a Föld forgásából származó hatásokról a légkörben és a vízburokban is, de



1. ábra. A papírlapos kísérlet.

a részleteket nem fejtik ki. A légnyomás és a szél – Ciklonok, anticiklonok című leckében [5] a következő olvashatjuk: „A szél mozgása a valóságban nem egyenes irányú, azaz a levegő nem pontosan az alacsony légnyomású területek irányába mozog, ugyanis ezt a légmozgást több tényező is befolyásolja. Ilyen a Föld forgásából származó kitérítő- (Coriolis-) erő, az ugyancsak ebből eredő centrifugális hatás és a földfelszín közelében ható súrlódás, amely a magasabb lég rétegekben már elhanyagolható. A szél a valóságban az említett erők közös eredőjének irányába mozog.”

Láthatjuk, hogy a tankönyvírók mennyire különbözőképpen próbálják megoldani a problémát. Nincsenek könnyű helyzetben: szerintem nem az ő feladatuk a Coriolis-hatás bevezetése. Azt a szemléletet, amely szükséges lenne a megértéshez, mindenképpen fizikaórán kellene elsajátítani. A diákok számára zavaró lehet, hogy fizikából gimnáziumban nem tanulnak hidrosztatikát és a tehetetlenségi erők sem részei a törzsanyagnak. Nagyobb gondot okozhat viszont az, hogy a fizikában az erő fogalma a mechanikai kölcsönhatáshoz kapcsolódik. Ahogy már a centripetális erő is fogalmi zavarokhoz vezethet [1], úgy a tehetetlenségi erők bevezetés nélküli használata akadályozza a fogalomrendszer letisztulását.

Ha az elmúlt évek feladatsorait alapul véve megvizsgáljuk a földrajz érettségi követelményeit, akkor megállapíthatjuk, hogy majd minden évben van olyan megoldandó feladat, amely épít ezekre az ismeretekre. Példaként említem a 2012. év egyik középszintű [6] feladatát, amely egy meteorológiai térképen látható légköri képződményhez kapcsolódóan tesz föl kérdéseket többek között a levegő vízszintes és függőleges mozgásáról. Egy 2010. májusi emelt szintű feladatsor [7] pedig konkrétan a Coriolis-erő hatásaival foglalkozik. Sajnos nincs olyan adatbázis, amely az érettségi feladatonkénti megoldottságát magában foglalná, de érdekes lenne megvizsgálni, hiszen pontosabb képet kaphatnánk arról, hogy a fizikai ismereteket is igénylő feladatokat (napsugárzás hatásai, környezeti áramlások) vajon milyen szinten tudják a fiatalok megoldani, összevetve a teljes feladatsorban mutatott teljesítménnyel.

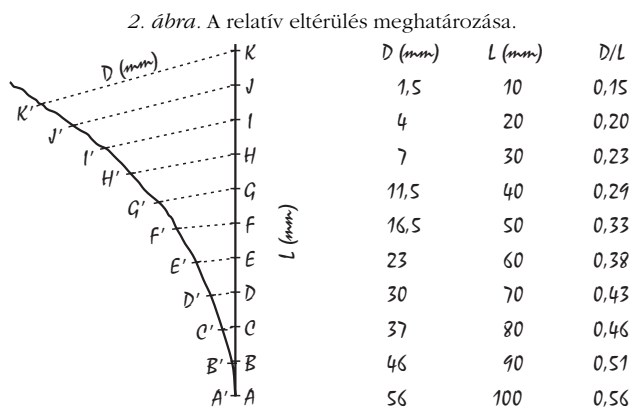
A Coriolis-hatás egy lehetséges bevezetése

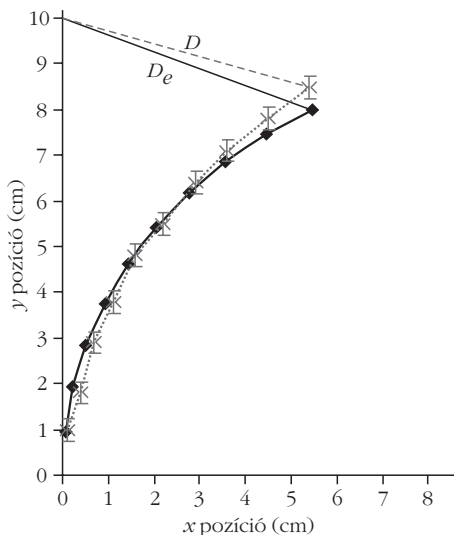
A tatai Eötvös gimnáziumban négy éve működő Környezetfizikai szakkörön lehetőségem volt olyan tananyagokkal foglalkozni, amelyek mind tartalmi, mind módszertani szempontból fejlesztették tanári munkámat. A környezeti áramlások témája kapcsán foglalkoztunk Foucault-inga modellel, ciklonok modellezésével, frontok laboratóriumi vizsgálatával is. Az itt szerzett tapasztalataim alapján a Coriolis-hatás bevezetésének legjobb és legegyszerűbb módszere a következő fizikai logikai gondolatmeneten alapul.

Demonstrációs kísérlet

Vizsgáljunk egy egyenesen egydimenziós mozgást, amelyet egy papírlapra húzott szakasz fog reprezentálni! A papírlapot egyenesen forgatva egyszerűen bemutathatjuk a Coriolis-hatást. Ehhez vegyünk két A4-es papírlapot (1. ábra). Az egyiket vágjuk be a hosszabbik oldalának felezőpontjától a rövidebbik oldallal párhuzamosan a papírlap közepéig. A másik lapon is végezzük el a műveletet úgy, hogy a rövidebbik oldal felezőpontjából indulunk ki. A demonstráció első lépéseként illesszük össze a két papírlapot a vágások mentén úgy, hogy középpontjuk összeérjen. Ezután húzzunk vonalat az alsó papírlapra a másik papírlap vágott élé, mint vonalzót mentén (egyenes a 2. ábrán). A következőkben pedig ismételjük meg a vonalhúzást úgy, hogy a mozgás pályájának rögzítésére használt lapot egyenesen forgatjuk (görbe a 2. ábrán).

A kapott egyenesen, illetve görbén végezzünk méréseket, számításokat. A 2. ábrán látható módon az egyenesen (értsd: a mozgás inerciarendszerből szemlélt pályáján), illetve a görbén (értsd: a mozgás forgó rendszerből vizsgált pályáján) is tegyünk jelöléseket az időegységenként elért pontokhoz. Ezeket megkaphatjuk, ha a kiindulási pontból különböző nyílásszögű körzővel (1 cm, 2 cm stb.) körívezzünk. A továbbiakban az így kapott $A-K$ (az egyenes pontjai), illetve $A'-K'$ (a görbe pontjai) pontsorozattal dolgozunk. Az egyes egyes pontjainak A -tól mért távolságát L -lel, az összetartozó pontokból (például BB') képzett szakaszok hosszát D -vel jelölve egy adattáblát készíthetünk. Mérjük meg az L és D szakaszok hosszát, és határozzuk meg a D/L hányadost, amit közelít-





3. ábra. Az elméleti, illetve a szemléltető kísérletben kapott trajektóriák összevetése.

tőleg, mint relatív eltérés értelmezhetünk. Megállapítható, hogy a D/L hányados függ L -től, mégpedig nagyobb L távolsághoz nagyobb D/L relatív eltérés tartozik (a későbbiek során bebizonyítjuk az egyenes arányosságot). Ha a görbét az előzőtől különböző v vonalhúzási sebességgel, illetve ω forgatási szögsebességgel állítjuk elő, az új trajektória nem lesz fedésben az első rajzunkkal. Kisebb v , illetve nagyobb ω egyaránt nagyobb relatív eltérést eredményez. A mért adatok kvalitatív elemzésével eljuthatunk a

$$\frac{D}{L} \sim \frac{L\omega}{v} \quad (1)$$

összefüggésig, hiszen fentiek alapján L és ω a számlálóban, v pedig a nevezőben kell, hogy szerepeljen. A dimenziók vizsgálatával könnyen látható, hogy akkor kapunk a jobb oldalon is dimenziótlan hányadost, ha L mellett ω és v is első hatványon szerepel.

A D/L hányados demonstrálja a Coriolis-hatás mértékét. Ha ez a hányados nagy, akkor az adott jelenségben a forgás trajektóriát befolyásoló hatása jelentős. (A hányados reciprokát Rossby-számnak nevezzük [8].)

Elméleti leírás

A ceruza hegyének mozgása inerciarendszerben egy egyenes vonalú egyenletes mozgás:

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ y &= v \cdot t = L. \end{aligned} \quad (2)$$

A ceruza hegye alatt azonban elforgatjuk a papírlapot, ezért a mozgó papíron kirajzolódó pálya egy forgó vonatkoztatási rendszerben érvényes pályát jelöl. Az origóból indulva az inerciarendszerbeli mozgás és a papír szögsebességének mínusz egyszeresével mozgó egyenletes körmozgás összege adja a görbült pályát, amit a diákok a mozgó papíron saját maguk kirajzolnak. Ez jó demonstrációja a forgó Földön eltérülő trajektóriáknak, azaz a Coriolis-hatásnak.

A forgó rendszerben a (origóból induló) ceruza mozgása így írható le:

$$\begin{aligned} x' &= v \cdot t \cdot \sin \omega t, \\ y' &= v \cdot t \cdot \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3)$$

Ezen egyenletekből adódó mozgás trajektóriáját ábrázoltuk a 3. ábrán. A kísérletben kapott adatokat is – vékony keresztekkel – berajzoltuk ugyanerre az ábrára, a 3 mm mérési pontosságot feltüntetve. A sebesség- és a szögsebesség-paramétereket próbálgatással határoztuk meg úgy, hogy a mérési eredményekhez legjobban illeszkedjenek, és 2,9 m/s valamint 0,18 1/s-nak adódtak. A két ponthalmaz kielégítően fedi egymást. A kísérletben meghatározott D távolságok csak kicsit térnek el a (3) egyenletekből kapott elméleti pontok alapján számolt D_e távolságoktól.

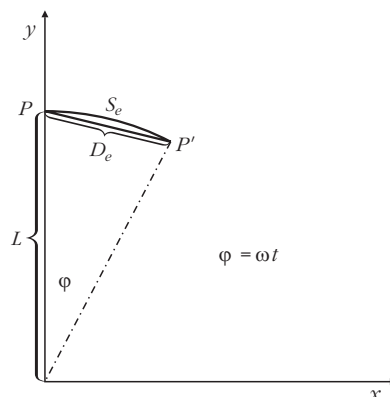
A relatív eltérés linearitásának vizsgálata

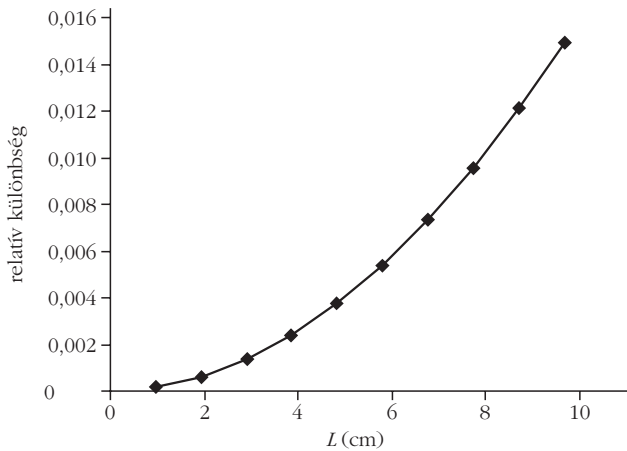
A 4. ábrán szemléltetjük a t idő alatt L radiális elmozduláshoz tartozó φ szögelfordulást. A PP' ívhossz itt könnyen meghatározható az egyenletes forgás alapján: $S_e = L \cdot \varphi = L \cdot \omega \cdot t$. Az origótól való távolodás is egyenletes: $L = v \cdot t$. A két egyenletet egymással elosztva kapjuk az (1) egyenlet jobb oldalán is szereplő tagot:

$$\frac{S_e}{L} = \frac{L\omega}{v}. \quad (4)$$

Az (1)-ben szereplő könnyen mérhető D/L érték helyett itt az S/L szerepel. A kettő közötti különbség (a vizsgált kis elfordulástartományban) elhanyagolható. Módszertani szempontból meg kell jegyeznem, hogy a tanítási gyakorlatban is gyakran alkalmazunk elhanyagolásokat számítási feladatokban, de ritkán járunk utána, hogy a közelítő számítás az adott esetben befolyásolja-e a következtetést. Nézzük meg, hogy a kísérlethez kapcsolódó elméleti számítás milyen eredményt ad e tekintetben (5. ábra), tudniillik, hogy a forgó rendszerben kapott görbéhez tartozó S_e/L hányados (ahol S_e az elméleti számítással kapott ívhossz) mennyire tér el az általunk használni kívánt D_e/L hányadostól (ahol D_e a 4. ábráról könnyedén

4. ábra. A forgás miatti eltérés meghatározása.





5. ábra. Az $|S_e - D_e| / D_e$ relatív különbség L -függése.

leolvasható, az (5) egyenlet alapján számított forgásból származó elmozdulás).

$$D_e = \sqrt{x^2 + (L - y)^2}.$$

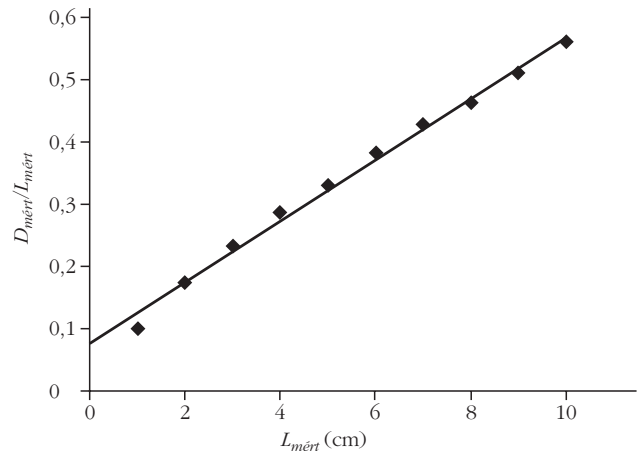
Az 5. ábrán látható, hogy a demonstrációs kísérletben az $S_e(L)$ és a $D_e(L)$ függvények között 2%-nál kisebb a különbség (ez nagy elfordulások vizsgálata során természetesen megnő). Így az (1) egyenletben megfogalmazott egyenes arányosság bizonyításának teljes gondolatmenete az alábbiakban foglalható össze.

$$\frac{D}{L} \cong \frac{D_e}{L} \cong \frac{S_e}{L} = \frac{L\omega}{v}.$$

Látható, hogy így már nem pusztán egyenes arányosságról van szó, hanem egyenlőségről, amiből egyébként a Coriolis-gyorsulás képletében szereplő 2-es faktor is – itt nem részletezett módon – kijön. A D/L hányados L -lél való egyenes arányosságát a mért adatok is mutatják. A kísérleti adatainkból (2. ábra) a 6. ábrán látható egyenest kapjuk, amelynek meredeksége természetesen v -tól és ω -tól függ. Az egyenes a vonalhúzás indítása és a forgatás indítása között eltelt idő miatt nem az origóból indul. A fenti, két egyenletes mozgás összetevésén alapuló modell ezért jól írja le a kísérletet. Bár a kísérleti pontatlanságok teljesen nem küszöbölhetők ki (például a távolságmérések), a vonalhúzás és a forgatás sebessége is a tapasztalat alapján állandónak tekinthetők, ezáltal a demonstrációs kísérlet jól használható.

Módszertani mérés

Alapfeltevésem az volt, hogy a Coriolis-erő bevezetése [9] nélkül is megvilágítható a jelenségkör lényege. Módszeremet eddig hat 9. évfolyamos csoportban próbáltam ki. Három csoportban saját diákjaim tanulnak, a többi hármat két másik tatai iskolából választottam ki. Ahhoz, hogy a módszertani hatást mérni tudjam, készítettem egy négy kérdésből álló tesztet, amelyet az óra elején, majd az óra végén is kivetítettem a diákoknak. A tanulók füzetükbe rögzítették az



6. ábra. A D/L relatív eltérés L radiális elmozdulástól való függése a kísérletben.

általuk helyesnek gondolt választ, amit az óra utolsó két percében összesítettem. A mérést a tanév végén végeztem, amikor a résztvevők már foglalkoztak földrajz órán a ciklonokkal, és fizikából pedig terítékre került a teljes mechanika.

Kísérletezési tapasztalatok

A papírlapos kísérletet a tanulók párban, esetleg hármasával egyszerűen el tudták végezni. A pályák megrajzolása után a diákok máris láthattak egy alapvető tapasztalatot, tudniillik hogy a mozgás leírása több nézőpontból is elvégezhető, és nem vezet azonos eredményre. A kapott görbe arra is utal, hogy a forgó rendszerből szemlélve a mozgást van gyorsulás. A párok, csoportok rajzait összehasonlítva azt is – szinte triválitásként kezelve – megállapították a diákok, hogy a kapott trajektóriák nem feltétlenül egyformák: az egyenestől való eltérés mértéke függ a vonalhúzás v sebességétől és a forgatás ω szögsebességétől. Mért adataikból minden tanuló láthatta, hogy a D/L relatív eltérés nő az L távolsággal. Motivált csoportban – akár házi feladatként is – az egyenes arányosság is megállapítható.

Coriolis-hatás becslése hétköznapi jelenségekben

Az órán közösen nagyságrendi becslést adtunk az $(L\omega)/v$ hányadosra néhány – a megértés szempontjából fontos – mozgás esetén (1. táblázat), ahol L a mozgásra jellemző távolság, v a mozgó objektum sebessége, ω pedig a Föld forgási szögsebessége. Alapvető célunk az volt, hogy a diákok a demonstrációs kísérlet során a relatív eltérésre kapott összefüggés segítségével megállapíthassák, hogy a mindennapi életben előforduló Coriolis-hatás mennyire jelentős.

Az 1. táblázatban öt – közelítőleg vízszintes síkban történő – jelenséget vizsgálunk meg, ami a mozgás karakterisztikus hosszának 7 nagyságrendjét fogja át. Mindben körülbelül a 45. szélességi foknál tekintjük a mozgást és a Föld forgása az eltérés okozója. Ezért $\omega_{Föld} \cdot \sin\varphi = \omega_{függőleges} = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/s szögsebességet használtunk, ami az adott helyen a Föld szögsebességének

A Coriolis-hatás jelentőségének meghatározása néhány mozgás esetén

jelenség	L (m)	ω_{45° (1/s)	v (m/s)	Coriolis-hatás, $(L\omega)/v$ fontossága	relatív fontos	abszolút értékben érzékelhető
kádleflyóban a víz	10^{-1}	$5 \cdot 10^{-5}$	0,03	$1,7 \cdot 10^{-4}$	nem	nem
Foucault-inga (Párizs)	10	$5 \cdot 10^{-5}$	1,25	$4 \cdot 10^{-4}$	nem	nem (fél periódus alatt!)
Pars Krisztián kalapácsvető dobása	10^2	$5 \cdot 10^{-5}$	30	$1,7 \cdot 10^{-4}$	nem	igen
Falkland-szigeteki csata	10^4	$5 \cdot 10^{-5}$	350	$1,5 \cdot 10^{-3}$	nem	igen
ciklon	10^6	$5 \cdot 10^{-5}$	10	5	igen	igen

a Föld érintősíkjára merőleges komponense. (A Falkland-szigetek – ahol az I. világháború és egyben a történelem utolsó tengeri ütközete zajlott, amely tisztán hadihajók közti tüzérségi párbajból állt – a déli szélesség 52. fokánál található, de ez a nagyságrandi becslést nem befolyásolja.) A kád és a mosdó leflyójában haladó víz sebessége egyre nagyobb, az utolsó 10 cm-t körülbelül 2-3 s alatt teszi meg egy úszó szappanbuborék. Ezzel alulról becslük a haladási sebességet. A párizsi Pantheonban felállított történelmi Foucault-inga hossza 67 m, periódusideje 16 s volt. 5° -os kitéréssel számolva a kétszeres amplitúdó körülbelül 10 m-nek adódik, az ingatest átlagsebessége egy fél periódusból számolva 1,25 m/s. A táblázatban felsorolt 3–4. jelenség jellemző sebességét a ferde hajítás maximális távolságának formulájából számoltuk a dobás és a lövés távolságából kiindulva. Mindkét esetben a Coriolis-eltérés

nagysága az elvben mérhető tartományba esik. A ciklonok átmérőjét a meteorológiai adatok alapján 1000 km-nek, a benne áramló levegő sebességét egy erős szél sebességével becsültük (ebben az esetben az elméleti leírásunk eredményeként adódó (1) arányosság már semmiképpen sem igaz).

Kérdőíves hatásvizsgálat

A hatásvizsgálathoz készített teszt kérdéseit és a lehetséges válaszokat a 2. táblázat tartalmazza, amelyben föltüntettem azt is, hogy a válaszadók (összesen 136 fő) hány százaléka jelölte az adott választ az óra elején, illetve az óra végén. Ha a változás az eredeti érték 20%-nál nagyobb mértékben nőtt, vagy csökkent, azt szignifikáns változásként értékeltem, és \uparrow , illetve \downarrow nyíllal jelöltem.

A Coriolis-teszt eredményei hat gimnáziumi osztály összesítésében

1. Hogyan folyik le a kádban a víz? Melyik a helyes válasz?											
A) A Föld forgása miatt az óramutatóval megegyező irányba forogva.			B) A Föld forgása miatt az óramutatóval ellenkező irányba forogva.			C) Attól függ, melyik féltekén vagyunk az A vagy B válasz igaz.			D) A Föld forgása nem meghatározó tényező.		
9,6%	\downarrow	4,4%	5,9%	\downarrow	3,7%	70,6%	\downarrow	53,7%	14%	\uparrow	38,2%
2. Lehetséges-e, hogy a Föld forgása miatt egy ágyúgolyó ne találjon célba? Melyik a helyes válasz?											
A) <i>Igen, az északi féltekén a céltól jobbra ér talajt a lövedék.</i>			B) Igen, a déli féltekén a céltól jobbra ér talajt a lövedék.			C) Nem, mert a lövedék túl gyorsan mozog.			D) Nem, a Föld forgása egyáltalán nem befolyásolja a lövedék pályáját.		
5,9%	\uparrow	26,5%	6,6%	\uparrow	11,8%	44,1%	\downarrow	35,3%	43,4%	\downarrow	26,5%
3. Lehetséges-e, hogy a Föld forgása a kalapácsvetés dobótávolságát befolyásolja? Melyik a helyes válasz?											
A) Igen, ezt figyelembe is veszik.			B) <i>Igen, de nem veszik figyelembe.</i>			C) Nem, a körülbelül 80 méteres dobásnál kimutathatatlan a hatás.			D) Nem, a sportszer túl gyorsan mozog.		
7,4%	\downarrow	5,9%	26,5%	\uparrow	42,7%	50,7%	\downarrow	38,2%	15,4%	\approx	13,2%
4. Hogyan folytatódik az állítás? Melyik a helyes? A ciklonokban a levegő...											
A) <i>az északi féltekén az óramutatóval ellentétes irányba forog.</i>			B) akkor is forogna, ha a Föld nem végezne forgómozgást.			C) gyorsabban forogna, ha a ciklon kisebb átmérőjű lenne.			D) a kisebb nyomású hely felől a nagyobb nyomású felé áramlik.		
25,0%	\uparrow	38,2%	11,8%	\downarrow	8,1%	11,8%	\uparrow	28,7%	51,5%	\downarrow	25,0%

A helyes válasz dőlttel kiemelve. Az óra elején, illetve végén mért válaszok szignifikáns, 20%-nál nagyobb eltérése nyíllal jelölve.

A táblázatból egyértelműen látható, hogy a diákok a lefolyóval kapcsolatban tévhitel rendelkeztek (1.C válasz az óra elején 71%), illetve hogy a levegő áramlásával kapcsolatban hiányosak az alapvető fizikai ismereteik (4.D válasz az óra elején 51%). Noha az óra végén sem mindenkor a helyes választ jelölték meg a legtöbben, de mind a négy kérdés esetében korábbi tanult tudásukat mérhetően pontosították a diákok. A módszer hatékonyságát az igaz válaszok százalékanak változása jól mutatja, ezek rendre +24%, +21%, +16%, +13%.

Az óra elején minden kérdésnél a legtöbb diák egy hamis választ látott jónak (ami tovább növeli a téma tanításának fontosságát). Az óra végén azonban mind a négy esetben csökkent ez az arány: -18%, -16%, -12%, -26%. A 3., illetve 4. kérdésnél ezzel az igaz válasz lett a leggyakoribb. A 2. kérdés esetén az alapjelenség megértését az A és a B válasz megjelölése adja vissza (a kettő közötti különbség az irányszabály, amire nem fektettem hangsúlyt). Az ezekre összesen adott válaszok aránya 12%-ról 38%-ra nőtt, miközben az egyértelműen hibás D válasz a kezdeti 43%-ról, 26%-ra esett. Sajnos az 1. kérdésnél a leggyakoribb válasz a tévhit maradt.

A 4. kérdés C válaszát talán azért jelölték meg az óra végén többen, mert nem elég egyértelmű a kérdés, de ráéreztek a válaszadók, hogy az eltérés mértéke és az L méretparaméter között van összefüggés.



Írásomban elsősorban arra mutattam rá, hogy a Coriolis-hatás az erő fogalma nélkül is bevezethető a középiskolában egyszerű, szemléletes és interaktív módon. Így a

téhetlenségi erők megértésének nehézségeit [10] megkerülve adhatunk mélyebb magyarázatot a légköri és óceáni áramlásokkal kapcsolatos néhány jelenségre.

Ez az egyszerű fizikai kísérlet, kiegészítve más laboratóriumi kísérletekkel [11] és terepi megfigyelésekkel jó példa arra, hogyan illeszthető a természetföldrajz tanítása a természettudományok közvetlen tapasztalatokon alapuló megismerési metodikájához.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőm, *Horváth Ákos* a cikk finomra hangoláshoz nyújtott hasznos tanácsait.

Irodalom

1. Radnóti K.: Használjuk-e a centripetális erő fogalmát? *A Fizika Tanítása XVIII/4*, MOZAIK Oktatási Stúdió, Szeged, 8–13.
2. www.oh.gov.hu/letolt/okev/doc/timms/timss_2007_osszefoglalo_jelentes.pdf
3. Makádi M., Taraczközi A.: *A Föld, amelyen élünk, Természetföldrajz 9*. Mozaik Kiadó (2003)
4. Nemerkenyi A., Sárfalvi B.: *Általános természetföldrajz*. Nemzeti Tankönyvkiadó (2002)
5. Arday I., Rózsa E., Ütőné Visi J.: *Földrajz I. középiskoláknak*. Műszaki Könyvkiadó (2003)
6. http://www.oktatas.hu/pub_bin/dload/kozoktatas/erettsegi/feladatok2012tavasz/kozep/k_fldrma_12maj_fl.pdf (II. vizsgarész 4. oldal, 4. feladat)
7. http://www.oktatas.hu/pub_bin/dload/kozoktatas/erettsegi/feladatok2010tavasz/e_fldr_10maj_fl.pdf (7. oldal, 4. feladat)
8. http://etananyag.ttk.elte.hu/FILES/downloads/EJ-Janosi-Tel_kornyaram.pdf
9. Budó Á.: *Kísérleti fizika I*. Tankönyvkiadó (1978) 182. és 187.
10. Hráskó P.: Elmélkedés a Coriolis- és a centrifugális erőkről. *Fizikai Szemle 63/5* (2013) 168–169.
11. Tasnádi P. (szerk.): *Természettudomány tanítása korszerűen és vonzóan*. ELTE TTK (2011) ISBN: 978-963-284-224-0, 632.

»...JÓ SZÓVAL OKTASD, JÁTSZANI IS ENGEDD...«

Biróné Kabály Enikő

Debreceni Református Kollégium Gimnáziuma

A fizika érettségi vizsga mindkét szintjén szerepelnek tesztfeladatok. Ez a feladattípus bekerült a tankönyvekbe is, van külön tesztkönyv a gyakorláshoz. A tesztfeladatok előnye, hogy könnyen gyakoroltathatók számítógép segítségével is, a gép ki is értékeli az adott tanuló teljesítményét, kiírja a helyes megoldást, esetleg a részletes magyarázatot. A tréningezést azonban színesíthetjük egy kis játékkal is.

Hozzáférhetőek az interneten különböző *számítógépes kvízzjátékok* (például *Legyen Ön is milliomos*), amelyekben van kérdésszerkesztő, így magunk írhatunk játékba kerülő kérdéseket. Hiszem, hogy ilyen játékos kérdéssorral, ahol lehet segítséget kérni, felelni, nyerni, szívesebben játszanak, tesztelnek az általános vagy humán érdeklődésű diákok is.

A számítógépes világ kellős közepén én magam is szeretek leülni és olyan játékokat játszani, ahol emberi

kapcsolatok vannak: kommunikáció, játszmák, versengés, nevetés... Kreatív feladatnak, kihívásnak érzem a játékok kitalálását, nehezítését vagy könnyítését, új szabályok alkotását. Ez a diákok számára is izgalmas feladvány lehet, hiszen egészen kisgyermekkorban megfogalmazzák a „most játsszuk úgy, hogy...” kezdetű mondatokat.

Az alábbiakban egy *kártyajátékot* szeretnék bemutatni a tesztek gyakorlására.

Tetszőleges számú kártyalapot készíthetünk. A lapok egyik oldalán a tesztkérdést és a válaszlehetőségeket helyezük el, a másik oldalon pedig a helyes választ, valamint írhatunk rá segítő útmutatásokat vagy akár részletes megoldást/indoklást is.

Készítsünk válaszlapokat is, azaz olyan kártyalapokat, amelyeken az A, B, C, D betűk szerepelnek!

A lapokat megszerkeszthetjük számítógéppel és egyszerűen műszaki kartonra nyomtathatjuk. Így nem jelent nagy költséget egy saját készítésű pakli. A tartósságot növelhetjük, ha a lapokat lamináljuk, de enélkül

„Jöjj el szabadság! Te szülsz nekem rendet / jó szóval oktasd, játszani is engedj / szép, komoly fiadat!” József Attila: *Levegőt*

Egy 20 dkg tömegű golyó 4 m/s sebességgel belefűrődik egy eredetileg álló, 4,8 kg tömegű homokzsákba. Mekkora sebességgel indul el a homokzsák?

- A) 0,8 m/s
- B) 0,16 m/s
- C) 1/6 m/s
- D) 0,28 m/s

B

Használjuk a lendületmegmaradás törvényét, a tömegek közötti mértékegység-eltérésre figyelve! (Az ütközés utáni tömeg a zsák és a golyó össztömege!)

Melyik indoklás nem függ össze az állítással?

- A) A vasbetont azért alkalmazhatjuk, mert a vas és a beton hőtágulási együtthatója egyenlő.
- B) Az ingaórák ingájának hosszát időnként be kell állítani, mert a hőtágulás miatt megváltozik az inga lengésideje.
- C) A bimetált alkalmazzák biztonsági kapcsolóként, mert jó hővezető.
- D) A víz térfogata 0–4 °C között melegítéskor csökken, mert hőtágulási együtthatója negatív.

C

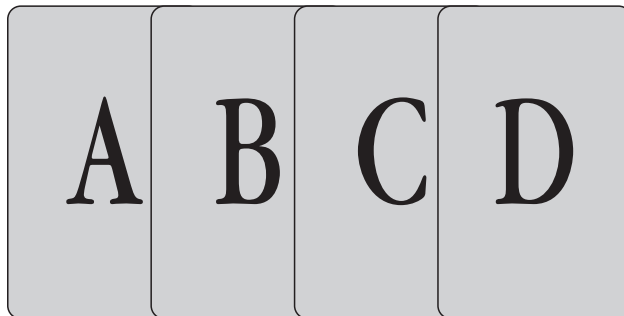
A bimetál két fém összehegesztésével készül, így valóban jó hővezető, de használatát nem ez indokolja. A két fém hőtágulási együtthatója különböző, így hűtés/melegítés hatására elhajlik.

Két tipikus kérdés-felelet kártyalap.

is több tanéven keresztül használhatók. A kérdések készülhetnek csak egy adott témakörhöz, így összefoglaláshoz tudjuk használni. Vegyes kérdések esetén színesítheti az érettségi felkészülést, vagy a tanév végi ismétléseket. A lapok megszerkesztését, a kérdések begépelését a diákok általában szívesen vállalják.

A kártya többféle játéklehetőséget kínál:

- Használhatja egy-egy diák *egyéni*leg. Ekkor elolvassa a kérdést, átgondolja, szerinte melyik a jó válasz, majd a lapot megfordítva ellenőrizheti, hogy helyesen válaszolt-e. Mivel egy-egy pakli kis helyet foglal el, használható utazások közben is, nem kell a megoldáskötetben keresgetni a helyes megoldást.
- Játshatunk vele *osztályközösségekben* is. Ekkor egy önként jelentkező tanuló felolvassa a kérdést és



A válaszkártyák

válaszlapjai közül valamennyi diák kiválasztja a helyesnek gondolt betűjelét. (Tehát annyiszor 4 darab A, B, C, D válaszkártyát kell nyomtatnunk, ahányan vannak az osztályban.) A kiválasztott tanuló a kártyalap hátoldaláról felolvassa a jó választ és a hozzá tartozó szöveges részt. Lehetséges folytatás, hogy a rosszul válaszolók kiesnek és az újabb kérdés már csak a többieknek szól. Így a legutoljára benntartó tanuló a győztes. E játékváltozat hátránya, hogy a kiesett tanulók nem feltétlenül követik a továbbiakban a játék menetét, előnye a kiélezett vetélkedés. Másik változatban a jó választ adók pontot kapnak, ekkor a pontok feljegyzését, összeszámolását kell jól megszerveznünk.

- Játshatnak a diákok *kisebb csoportokban* is. Ötös csoportokba osztva egy-egy ember olvassa fel a kártyákat, négyen-négyen válaszolnak. A jó válaszkért kapott pontokat összegezve hirdethetünk eredményt. A különböző csoportok pontjainak összehasonlításakor azonban figyelniük kell arra, hogy nem egyforma ütemben haladnak, van, ahol több és van, ahol kevesebb kérdés hangzott el. Ennek elkerülésére döntőt játszhatnak a csoportgyőztesek. A csoportban történő játékhoz több teszt-kártyára van szükség, hiszen valamennyi csoportnál az adott időtartamra elegendő kérdésnek kell lennie.

- Számatalan saját ötlettel színesíthetjük a játékot. Gyengébb csoportok, vagy nehezebb kérdések esetén játszhatjuk *rulettszerűen* is. Ekkor adott számú zsetonnal indulva tehet a játékos az A, B, C, D válaszok valamelyikére, vagy akár többre is (!) maximum három zsetont. A rossz betűre tett zsetonok elvesznek, a jók megduplázódnak. Az a győztes, aki a legtöbb zsetont szerzi.

Remélem, ez a kártya ötleteket ad további játékok készítésére, ami színesítheti az órákat – elsősorban azon tanulók számára, akik nem természettudományos irányban szeretnének továbbtanulni, dolgozni.

Jó játékot mindenkinek!



**Az Eötvös Társulat
főnt van a **facebook** -on!**



<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>

XVI. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY

Beszámoló, III. rész: a döntő feladatai és megoldásuk

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

Számítógépes szimulációs feladat

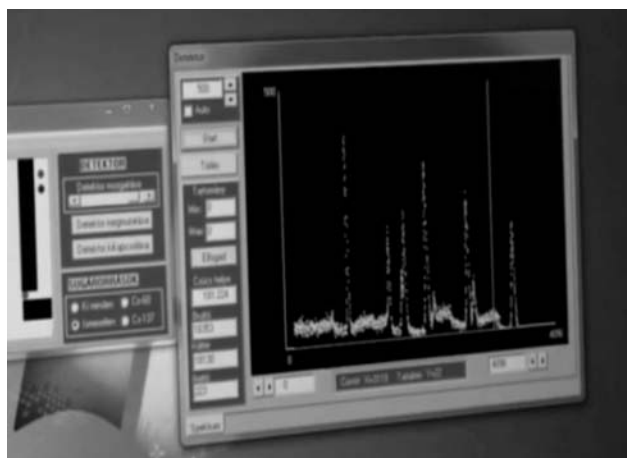
A versenyzők a következő feladatlapot kapták. A feladat során egy ismeretlen minta összetételét fogjuk meghatározni a minta – neutron-aktivációt követő – gamma-spektrumának analízise alapján. A kristályos minta anyagát atomreaktorban előzetesen már besugározták, amelynek következtében a minta egyes atomjai befogták a neutronokat, és ezáltal radioaktívvá váltak. A radioaktív atommagok leányelemei az elemre jellemző energiájú gamma-fotonokat bocsátanak ki. Egy (szcintillációs) detektorral a gamma-sugarak energiaspektrumát fel tudjuk venni. Ha meghatározzuk a kibocsátott gamma-sugarak energiáját, a gamma-sugarak táblázatából meghatározhatjuk, hogy milyen atommagok bocsátották ki a sugarakat. Ez a minőségi (kvalitatív) analízis. A feladat során csak ilyen analízist kell elvégezzünk.

Megjegyzés: a minta egyes komponenseinek mennyiségét is meg lehet határozni a kibocsátott gamma-fotonok intenzitásának mérésével. Ehhez azonban a detektor (és a detektálási geometria) teljes határfokát is ismerni kell a gamma-energia függvényében. A mostani feladat során mennyiségi (kvantitatív) analízist nem kell végezni, ezért nincs szükség a határfokfüggvény ismeretére sem.

Feladatok

1. *A detektor energiakalibrálása.* Ehhez vegyük fel külön-külön a két rendelkezésre álló standard sugárforrás (^{137}Cs és ^{60}Co) spektrumát! Ezek gamma-kvantumainak pontos energiáját keressük ki a gammaenergia-táblázatból (a táblázat pdf-formátumban a Sűgő menüpontból érhető el)! A „kalibrálás” azt jelenti, hogy meghatározzuk mely „csatornába” teszi a detektor a beérkező, különböző energiájú gamma-foto-

A szimulált bomlási spektrum



nok jeleit. Feltételezhetjük, hogy detektorunk válasza lineáris, azaz az E gamma-energia és a C csatornaszám között a következő összefüggés áll fenn: $E = aC + b$. Az energiakalibrálás lényegében az a és b konstansok meghatározását jelenti.

2. *Vegyük fel az ismeretlen minta spektrumát* egy új spektrumba, és az előző pontban elvégzett energiakalibráció segítségével határozzuk meg a detektort ért gamma-kvantumok energiáját!

3. A gamma-energiák ismeretében a táblázat felhasználásával *határozzuk meg, hogy milyen elemekből állhat* a besugárzott kristályos minta!

4. Az elvégzett mérésekből *készítsünk jegyzőkönyvet!* Ebben minden fontos adatnak és eljárásnak szerepelni kell. A jegyzőkönyvnek olyanak kell lenni, hogy annak alapján bárki reprodukálhassa (és ellenőrizhesse) a mérést. Szerepeljenek benne a „nyers” mérési adatok, az adatok feldolgozási módszere, a következtetések és az indoklások. Célszerű néhány képet is kimenteni a zsűri számára (a kép kimentésének módját lásd a Program használati útmutatójának végén). A jegyzőkönyvben jelezzük, hogy miről készültek képek! *A zsűri a jegyzőkönyvek alapján pontozza a versenyzők munkáját!*

A γ -energia táblázat használata

a) A táblázat első oszlopa $E(\text{keV})$ a kibocsátott gamma-foton energiáját mutatja;

b) a második oszlop (*Intensity*) azt mutatja meg, hogy 100 bomlásból átlagosan hány gamma-foton bocsátódik ki ilyen energiával (lényegében a bomlásonkénti százalékos arány);

c) a harmadik oszlop (*Nuclide*) az anyamagot mutatja, utána áll a bomlási mód és a felezési idő. Például:

$E(\text{keV})$	Intensity	Nuclide		
γ -energia	%	anyamag	bomlási mód	felezési idő
249,794(15)	90	Xe-135	β^-	9,14 h

A példa azt jelenti, hogy a ^{135}Xe atommag 9,14 óra felezési idővel, negatív béta-bomlással (β^-) bomlik (^{135}Cs -ra, de ez nincs jelölve), és a bomlást követően az esetek 90%-ban kibocsátódik egy 249,794 keV energiájú γ -foton, amelynek energiáját $\pm 0,00015$ keV pontosan ismerjük (az energia után zárójelben lévő szám).

Segítség: a spektrum kiértékelésénél, a csúcsok azonosításánál emlékezzünk arra, hogy még egy monoenergiás γ -fotonokat kibocsátó forrás spektruma sem mindig csak egyetlen csúcsot tartalmaz (kiszökési csúcsok)!

A program kezeléséhez a tanulók még egy részletes útmutatót is kaptak.

Kísérleti feladat

Mágneses indukció nagyságának becslése β -sugárzás eltérülésének segítségével

A radioaktivitás felfedezése (1896) után hamarosan megállapították, hogy a sugárzás általában három komponensre bontható mágneses vagy elektromos térben: α -, β -, és γ -sugárzásra. A béta-sugárzás energiaspektruma folytonos, nincs jellemző energia, de megadható egy átlagos energia.

A mérés elve

A vékony csőben lévő radioaktív izotópból béta-sugárzás lép ki a nyitott oldalon. A nagyjából egy irányba haladó (kollimált) β -nyalábot Geiger–Müller-számlálócsővel detektáljuk. A mozgó elektronokat mágneses mezővel eltérítjük, és az előre megadott átlagos energia ismeretében az eltérülés szögének mérésével adunk becslést az eltérítő mágneses mező indukciójára.

A méréshez rendelkezésre áll

- egy sárgaréz kollimátorban elhelyezett radioaktív sugárforrás,
- egy számítógéphez csatlakoztatott Geiger–Müller-számláló,
- egy tartóba erősített mágnespár,
- szögmérő.

A mágnes átmérőjét és a β -sugárzás átlagos energiáját a kísérletvezető tanár adja meg.

A feladat

a) Először mérjük meg a sugárzási háttér intenzitását! Távolítsuk el a sugárforrást, és mérjük a beütésszámot hosszú ideig! Mérjük és jegyezzük fel az eltelteket is!

b) Mérjük meg a kollimátorból kijövő β -sugárzás intenzitását mágnes nélkül, több különböző szög mellett annak érdekében, hogy a mért szögeloszlást majd összehasonlíthassuk a mágnes hatására módosult szögeloszlással! Az értékelésnél vegyük figyelembe a mért háttérrel is!

c) Vegyük fel a szögeloszlást a mágnes jelenlétében is! Határozzuk meg az átlagos szögeltérést!

A mérési összeállítás, balra a GM-cső



d) A c) pontban meghatározott szög és az energia segítségével adjunk becslést az eltérítő mágneses mező indukciójára! Az indukció meghatározásánál figyelembe kell venni annak lehetőségét, hogy az elektron sebessége a fénysebesség nagyságrendjébe eshet.

e) Határozzuk meg az eltérítő mágneses mező irányát, a mágnesek polaritását!

f) Elemezzük az eredményt! Milyen hibák adódhatnak a mérés során, és ezek mekkorák lehetnek? Miért csak nagyságrendi becslést ad ez a mérés?

Tanácsok a méréshez

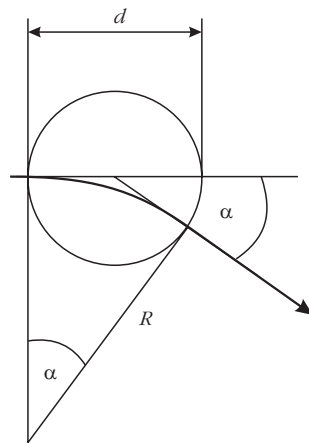
• Időt takaríthatunk meg, ha a feladat értelmezése közben már elkezdünk háttérrel mérni.

• Lehet, hogy egy-egy pont méréséhez hosszabb mérési időre van szükség. Ezt a háttér és a beütések számának ismeretében lehet meghatározni. A mérésre rendelkezésre álló idő rövid, ezért a kollimátort tekintésük szimmetrikusnak (elegendő csak az egyik oldalon mérni).

Segítség az energia kiszámításához

1) Az eltérülés szögéből először azon körpálya R sugarát határozzuk meg, amelyen a β -részecskék haladnak! A mellékelt rajz alapján:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{d/2}{R}$$



2) A mágneses térben haladó részecske p lendületét a B mágneses indukció és az R pályasugár ismeretében meghatározhatjuk abból kiindulva, hogy a körpályán tartáshoz szükséges erőt a mágneses Lorentz-erő ($F = evB$) adja:

$$a_{cp} = \frac{F_l}{m}, \text{ azaz } \frac{v^2}{R} = \frac{evB}{m} \text{ és ebből } p = eBR.$$

3) Az energiából a lendületet a

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2} - m_0 c^2$$

relativisztikus összefüggés segítségével határozzuk meg. Itt m_0 az elektron nyugalmi tömege ($m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV} = 0,8176 \cdot 10^{-13} \text{ J}$). Ebből visszaszámolva megállapíthatjuk a mágneses indukció nagyságát.

Adatok: átlagos energia, fénysebesség, elektron tömege, elektron töltése.

Fontos! Beadandó a „Mérési jegyzőkönyv”, amely tartalmazza a mérést végző azonosítóját, a mérések minden fontos paraméterét, a mért nyers adatokat, az eljárást (lépésenként), amellyel a végeredményhez eljutottunk, a végeredmény(ek)e)t, a végeredmény(ek)

hibáját és a hiba kiszámítási vagy becslési módját, az eredmények diszkutálását, valamint minden olyan információt, amely a mérés reprodukálásához szükséges. A mérési jegyzőkönyvnek olyannak kell lennie, hogy annak alapján bárki a mérést megismételhesse, és (a statisztikus hibákon belül) hasonló eredményt kaphasson.

A verseny értékelése

A verseny döntőjének délelőttjén a tíz elméleti feladat megoldására három óra, délután a számítógépes feladatra másfél óra, a kísérleti feladatra szintén másfél óra állt a versenyzők rendelkezésére. Egy-egy feladat teljes megoldása 5 pontot ért, tehát az írásbeli fordulón összesen 50 pontot lehetett szerezni, a számítógépes feladat teljes megoldása 25 pontot, a kísérleti feladat teljes megoldása 25 pontot hozhatott. Maximálisan tehát 100 pontot lehetett szerezni.

A legkiválóbb I. kategóriás versenyző 89 pontot ért el. A legjobb junior versenyző 57 pontot szerzett. Az elméleti feladatok közül legnehezebbnek az I. kategóriás versenyzők 4. feladata bizonyult, erre a feladatra 3 pont volt a legjobb eredmény.

Az összesített pontszámok alapján 2013-ban a következő diákok érték el a legjobb helyezéseket:

I. kategória (11–12. osztályosok)

I. helyezett (89 pont): *Szabó Attila*, Leőwey Klára Gimnázium, Pécs, tanára *Simon Péter*,

II. helyezett (77 pont): *Jenei Márk*, Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorlóiskola, Budapest, tanárai *Dvorák Cecília*, *Csefkő Zoltán*,

III. helyezett (75 pont): *Jubász Péter*, Piarista Gimnázium, Budapest, tanárai *Horváth Gábor*, *Urbán János*.

„Junior” kategória

I. helyezett (57 pont): *Somogyi Péter*, ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Gimnázium, Budapest, tanára *Hornyek Gyula*,

II. helyezett (56 pont): *Büki Máté*, Zrínyi Miklós Gimnázium, Zalaegerszeg, tanára *Pálovics Róbert*,

III. helyezett (53 pont): *Tamás Gábor*, Batthyány Kázmér Gimnázium, Szigetszentmiklós, tanára *Bülgözdí László*.

A díjakat és az okleveleket az I. kategória versenyzőinek *Mittler István*, az MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zrt. kommunikációs vezetője, az ESZI Intézményfenntartó és Működtető Alapítvány kuratóriumának elnöke, a II. kategória versenyzőinek *Kiss István*, az MVM Paks Atomerőmű Zrt. oktatási fősztályvezetője adta át.

Különdíjként az Eötvös Loránd Fizikai Társulat egy-egy éves *Fizikai Szemle* előfizetést ajánlott fel a két kategória első öt helyezettjének, amelyet *Kürti Jenő*, az ELFT főtítkára adott át.

Az MNT Nőtágozata (WIN) a legjobb leányversenyzőt, *Sisák Anna Mária*t – különdíjként – meghívta egynapos látogatásra a Paksi Atomerőműbe. A látogatás célja az atomerőműben dolgozó, mérnöki beosztásban lévő nők munkájának megismerése.

A záróülésem a tanulói díjak, különdíjak és oklevelek átadása után került sor az idei Szilárd Leó Tanári Delfin-díj átadására, amelyet minden évben a tanárok pontversenyében legjobb eredményt elért tanárnak ítél oda a versenybizottság. A Delfin-díjat *Csajági Sándor* adta át *Kovács Lászlónak*, a szegedi SZTE Ságvári Endre Gimnázium tanárának. Szilárd Leó Tanári Delfin-díjat kapott még *Szűcs József*, a versenybizottság tagja is. Gratulálunk!

A Marx György Vándordíjat, amelyet minden évben a pontversenyben legkiválóbb eredményt elért iskolának ítél oda a Versenybizottság, idén a *Szent István Gimnázium* tanára, *Gyimesi Éva* és a gimnázium csapata vehette át.

A Szilárd Leó Tanári Delfin-díjon kívül több kisebb elismeréssel kívánjuk a felkészítő tanárok munkáját jutalmazni. A Magyar Nukleáris Társaság a legsikeresebb felkészítő tanárt külön könyvjutalomban részesítette. A 2013. év legsikeresebb felkészítő tanára Gyimesi Éva (Szent István Gimnázium, Budapest).

A 2013. július 1–6. között megrendezendő VII. Nukleáris Szaktáborra jogosító kedvezményeket *Mester András*, a tábor vezetője adta át mindkét kategória 1–3. helyezettjének.

Az 1. helyezést elért versenyzők 100%-os a 2. helyezettek 50%-os a 3. helyezettek 25%-os kedvezményben részesülnek.

Köszönjük a lap hasábjain a Szilárd Leó Tehetség-gondozó Alapítvány támogatóinak, hogy anyagi támogatásukkal lehetővé tették az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny 2013. évi megrendezését. Versenyünk főszponzora az MVM Paks Atomerőmű Zrt. További támogatóink: Országos Villamos-távvezeték Zrt., Magyar Nukleáris Társaság és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Az Emberi Erőforrás Minisztérium a Nemzeti Tehetség Program pályázati kiírásán keresztül anyagi támogatásban részesítette a Szilárd Leó Tehetseg-gondozó Alapítványt.

Továbbá köszönet a Simon Péter – Szabó Attila: *Modern fizika* című szakköri jegyzet 2. bővített és javított változatának összeállításáért és kiadásáért, amelyet minden résztvevő megkapott.

Köszönet a nagyszerű tanári program megszervezésért, amelynek során két kiváló előadást hallgathattunk meg. *Nős Bálint* (Stratégiai és mérnöki irodavezető RHK Kft.) a radioaktív hulladékok biztonságos kezeléséről tartott előadást, míg *Lenkei István* *Az atomenergia szerepe a hazai villamos energia ellátásban* címmel tartott kiváló prezentációt.

A versenyt 2014-ben is megrendezzük változatlan tematikával. Ismételten bátorítjuk a határon túli magyar tannyelvű iskolák tanulóit is arra, hogy vegyenek részt az Országos Szilárd Leó Fizikaversenyen. Nevezni a verseny <http://www.szilardverseny.hu> honlapjáról kiindulva lehet.

EÖTVÖS-VERSENY 2013

2013. október 18-án, pénteken délután 3 órától este 8 óráig rendez meg az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az idei Eötvös-versenyt. A versenyen azok a diákok vehetnek részt, akik vagy az idén (2013-ban) fejezték be középiskolai tanulmányaikat, vagy *most* is középiskolai tanulók. Nemcsak magyar állampolgárságú versenyzők indulhatnak, hanem Magyarországon tanuló külföldi diákok, valamint külföldön tanuló, de magyarul értő és beszélő diákok is, ha 2013-ban érettségiztek, vagy jelenleg is középiskolai tanulók.

A megoldásokat magyar nyelven kell elkészíteni; a rendelkezésre álló idő 300 perc. A feladatok megoldásához a versenyző bármely magával hozott írott vagy nyomtatott segédeszközt használhat, de zsebszámológépen kívül minden más elektronikus segédeszköz (mobiltelefon, laptop stb.) használata tilos.

Előzetesen jelentkezni nem kell, elegendő egy személyazonosságot igazoló okmánnyal (személyi igazolvány, fényképes diákigazolvány vagy útlevél) pontosan megjelenni az alábbi helyszínek valamelyikén:

Budapest: ELTE TTK, XI. kerület, Pázmány Péter sétány 1/A., alagsori konferenciaterem (–1.75).

Békéscsaba: Belvárosi Általános Iskola és Gimnázium, Haán Lajos u. 2–4.

Debrecen: Fazekas Mihály Gimnázium, Hatvan utca 44.

Eger: Eszterházy Károly Főiskola Gyakorlóiskola, Barkóczy út 5.

Győr: Széchenyi István Egyetem Fiz.-Kém. Tanszék, Egyetem tér 1., D-706

Kecskemét: Katona József Gimnázium, Dózsa György út 3.

Miskolc: Miskolci Egyetem Fizikai Tanszék, Egyetemváros, A/2 épület 3. emelet.

Nagykanizsa: Batthyány Lajos Gimnázium, Rozgonyi utca 23.

Nyíregyháza: Krúdy Gyula Gimnázium, Epreskert utca 64.

Pécs: PTE TTK Fizikai Intézet, Ifjúság útja 6., A/408 terem.

Szeged: SZTE TTK, Dóm tér 9., Budó Ágoston tanterem

Székesvárad: Garay János Gimnázium, Szent István tér 7–9.

Székesfehérvár: Lánosz Kornél Gimnázium, Budai út 43.

Szombathely: Hefele Menyhért Építő- és Faipari Szakiskola, Szent Márton utca 7.

Veszprém: Pannon Egyetem, Wartha Vince utca 1., N épület, N/102 terem.

Nagy-Britannia, Cambridge: St. John's College.

Az egyes helyszínek kapcsolattartói és elérhetőségük a Társulat honlapján megtalálhatók.

Kérjük fizikatanár kollégáinkat, bátorítsák legjobb diákjaikat a versenyen való részvételre! Számos példa van arra, hogy az Eötvös-versenyen történő helytállás, az itteni sikeres szereplés indított el egy diákot későbbi sikeres életpályáján.

Minden versenyzőnek eredményes munkát kívánunk!
Versenyszervezőbizottság

HÍREK – ESEMÉNYEK

SZEIDL BÉLA, 1938–2013

Pedagógus szülők gyermekeként hét testvérrel Abonyban, Salgótarjánban, majd Vecsésen nevelkedett. Természettudományos érdeklődése, vonzalma a matematikai problémák megoldása iránt már gimnazista korában meghatározó volt. A *Középiskolai Matematikai Lapok* feladatait élvezettel, kitartó türelemmel, rendkívül eredményesen oldotta meg, ez a tevékenység egész életét végigkísérő, pihentető hobbi maradt.

Egyetemi tanulmányait az ELTE matematika-fizika szakán végezte (1956–1961). Az égi mechanikai problémák matematikai leírása fordította figyelmét a csillagászati speciálkollégiumok felé, amelyek rendszeres hallgatója lett.

1961-től haláláig az MTA Csillagvizsgáló Intézetében (utóbb MTA Csillagászati Kutatóintézet, jelenleg

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet) dolgozott. 1973–1974-ben az intézet igazgatóhelyettese, majd 1975 és 1996 között annak igazgatója volt.

A Nemzetközi Csillagászati Uniónak 1967 óta, az Astronomische Gesellschaftnak 1975 óta volt tagja. A Nemzetközi Csillagászati Unió Változócsillag Bizottságának 1982–1985 között alelnöke, 1985–1988 között elnöke. A Nemzetközi Csillagászati Unió megbízásából 1967–1994 között szerkesztette az *Information Bulletin on Variable Stars* kiadványt. Az *Astronomy and Astrophysics* csillagászati folyóirat igazgatótanácsának 1993–1997 között első magyar tagja volt. Számos rangos nemzetközi konferencia meghívott előadójának, illetve négy esetben tudományos szervezőbizottsági tagnak kérték fel.

Az MTA Csillagászati és Űrfizikai Bizottságának 1970–2011 között 42 éven át volt folyamatosan tagja, két cikluson át – 1993–1999 között – pedig elnöke. Az MTA közgyűlési képviselője 1994–2000 között.

Az RR Lyrae csillagok periódusváltozásainak vizsgálatában elért eredményeit 1977-ben az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Detre László-díjjal ismerte el. Tudományszervezői munkásságáért 1997-ben a Magyar Köztársasági Érdemrend Középkeresztjével tüntették ki. Akadémiai levelező tagnak kétszer jelölték. Az MTA Fizikai Osztálya 2004-ben a Fizikai Fődíjat adományozta munkásságáért.

Hatása a komoly nemzetközi sikereket elérő hazai változócsillagászati kutatásokra máig érezhetően kiemelkedő volt. Az aktív csillagok, illetve a cefeidák vizsgálata az ő javaslatára indult az intézetben, amely kutatások azóta is eredményesen folynak. Támogatta, illetve elindította a pulzáló változócsillagok elméleti modellezését végző nemzetközi iskolák munkájához való kapcsolódást. Fő érdeklődési területe az RR Lyrae csillagok fényváltozása modulációjának (úgynevezett Blazskó-effektus), illetve a pulzáló változó periódusváltozásának tanulmányozása volt. Ebben a két, máig számos szempontból tisztázatlan kérdést rejtő témában született legjelentősebb publikációi. Az RR Lyrae típusú csillagokban egyik leggazdagabb gömbhalmaz, az M3 változóiról 1965-ben készített átfogó periódusvizsgálata a témában a korszak egyik legfontosabb munkája volt. Kimutatta az RR Lyrae Blazskó-modulációjának négyéves ciklusát, ami komoly nemzetközi figyelmet keltett. Először azonosított három radiális módust egy csillag – az AC Andromedae – fényváltozásában, s a csillag pulzációs tömege alapján megállapította, hogy a korábbi feltevésekkel szemben az nem RR Lyrae típusú, hanem annál jóval nagyobb tömegű, fiatalabb változócsillag. Az M15 gömbhalmaz kétmódusú változóinak módusonkénti periódusváltozásairól kimutatta, hogy azok nem szükségszerűen azonos irányúak és nagyságúak. Az RV Ursae Majoris Blazskó-modulációjának elemzésével először azonosított kvintuplet komponens a fényváltozás Fourier-spektrumában. A gömb-

halmazok változóinak legutóbbi vizsgálataiban során, immár 100 évnél hosszabb adatsorokat elemezve a változócsillagok egy részének fejlődési eredetű periódusváltozását mutatta ki, valamint szoros korrelációt talált az irreguláris periódusváltozást, illetve Blazskó-modulációt mutató RR Lyrae-k között. 2000 után rendkívül aktívan vett részt a svábhegyi 60 cm-es automatizált távcsővel végzett mérésekhez kapcsolódó kutatásokban, ezzel jelentősen hozzájárult a Konkoly Blazskó Survey eredményeihez. Publikációinak száma 100 fölötti, amelyekre több mint 1000 független idézetet kapott (H-index 18).

Habár a hazai infrastruktúra a változócsillagok fotometriai megfigyelését tette lehetővé, már az 1960–1970-es években törekedett arra, hogy ezeket a méréseket német, amerikai és kanadai kollégákkal közösen végzett spektroszkópiai mérésekkel is kiegészítse. A hazai megfigyelésekben és adatfeldolgozásban előrelátó módon mindig a lehetőség szerinti legmodernebb technikák bevezetését szorgalmazta. Annak ellenére, hogy matematikai érdeklődése és képességei vonzották a jelenségek precíz matematikai leírásának feltárásához (amplitúdó- és fázismodulált jelek vizsgálata), soha nem tévesztette szem elől az olyan, matematikailag nehezen modellezhető komplex jelenségek, mint a mágneses tér, illetve a lökéshullámok fontosságát a változócsillagok viselkedésének megértésében.

Zárkózott személyisége nem akadályozta meg abban, hogy minden erejével és tudásával segítse kollégáit a felmerülő problémák leküzdésében. Csendes, nyugodt temperamentumával, kompromisszumkészségével mind vezetőként, mind kutatóként munkatársait igyekezett mindig a legeredményesebb megoldások felé irányítani, miközben igazgatóként fontosnak tartotta a lehető legteljesebb kutatási szabadságot biztosítani mindenki számára. Szerénysége példamutató lehet mindannyiunk számára. Halálával a magyar csillagászatot súlyos veszteség érte, hatása sokunk tudományos munkásságára még sokáig érezhető marad. Emlékét szeretettel őrizzük.

Jurcsik Johanna



Tanítsd meg diákjaidnak!
Töltsd le!
Nézzed meg!
Mutasd meg másoknak!

Hogyan érkezett a Curiosity a Marsra?

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keress a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!

A közeli infravörösben és a látható tartományban hangolható áteresztőképességű nanokristály-üvegek

Az amorf fénoxidok egyaránt hasznosak optikai, elektronikai és elektrokémiai berendezésekben. A kötési viszonyok ezekben az üvegekben nagyjából megszabják azok tulajdonságait, azonban szerkezetük bizonyos fokig kontrollált módon alakítható. Legújabban sikerült kialakítani egy olyan szintetikus eljárást, amellyel a nanokristályok amorf anyagokba kovalens kötéssel építhetők be. Ez a „nanokristály az üvegben” módszer nemcsak két különböző funkciójú komponenst kombinál egyetlen anyagba, hanem olyan kovalens kötést is, amely lehetővé teszi az üveg szerkezetének manipulálását a tulajdonságok megváltoztatására. A módszer illusztrálására ólommal

adalékolt indium-oxid nanokristályokat nióbbium-oxid (NbO_x) üvegbe helyeztek és így új amorf szerkezetet hoztak létre. Az új anyag egy olyan, korábban nem észlelt optikai kapcsoló tulajdonságot eredményezett, amely lehetővé teszi a napsugárzás ablakokon való áteresztésének dinamikai szabályozását. Ezek az átlátszó rétegek szelektíven képesek blokkolni a közeli infravörös tartományába eső és a látható fényt mintegy 2,5 V feszültség alkalmazásával. Az így létrehozott NbO_x üvegnek kiemelkedő tulajdonságai is vannak – az optikai kontraszt ötszörösére nőtt és rendkívül stabil.

<http://www.nature.com/nature>

A sötét energia a Higgs-bozon következménye lehet

A részecskefizika Standard Modellje az anyagot felépítő alapvető részecskéket és az azokat közvetítő tereket foglalja magában. A foton például az elektromágneses térhez tartozik. A tavalyi évben felfedezett Higgs-bozonhoz szintén tartozik egy erőter, azonban ez a Higgs-tér a többiektől eltérően skalár – nincs irányfüggése.

Az ismert részecsketerek együttesen hozzák létre az Univerzumot kitöltő, bizonyos sűrűségű energiát. A sötét energia felfedezése előtt a részecskefizikusok azért aggódtak, mert a Standard Modell legegyszerűbb változatai olyan óriási, esetleg végtelen nagy energiasűrűséget jósoltak, amely az Univerzumot egyre gyorsabb tágulásra kényszeríti.

Ez valószínűtlennek tűnt, amíg a távoli szupernóvák megfigyelései azt nem mutatták, hogy a galaxisok nemcsak távolodnak egymástól, hanem eközben egyre gyorsulnak is (*Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess*, Nobel-díj 2011). Ez a felfedezés látszólag megoldotta a kérdést, azonban kiderült, hogy az ezért felelős ok, amit sötét energiának nevezünk, sokkal gyengébb annál, mint ami a Standard Modelltől következne.

Frank Wilczek, a Massachusetts Institute of Technology (Cambridge) professzora szerint „ez a tény nagyon különbözik attól, amit a jóslatok adnak. Az Univerzumnak ez az alapvető tulajdonsága igen zavarba ejtő.”

A régóta megjósolt Higgs-bozon tavaly nyári feltűnésével *Lawrence Kraus* (Arizona State University, Tempe) és *James Dent* (University of Louisiana, Lafayette) a sötét energia nyomába eredtek. „Megmutatjuk, hogy ha a Higgs-bozon létezik – ami úgy tűnik –, egy új fizika kapuja lehet, amely elvben az

új térrel kapcsolható össze, és az Univerzumnak megfelelő nagyságrendű energiasűrűséget eredményez.” – mondja Krauss.

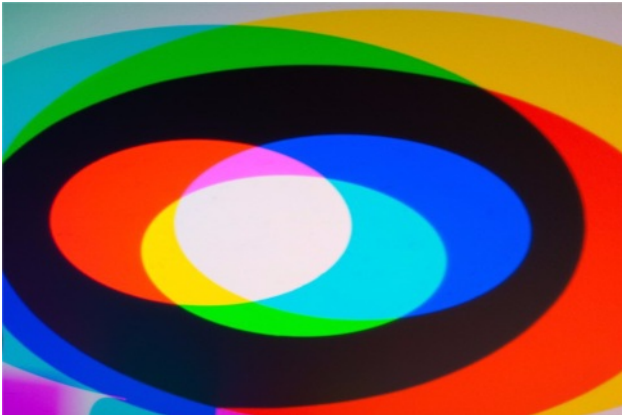
Lawrence Krauss és James Dent egy új skalárteret feltételeztek, amely a Standard Modellen kívül létezik. A Higgs-részecske nélkül e tér zérus energiasűrűségű lenne. A Standard Modell azonban azt mondja, hogy az összes alapvető kölcsönhatás és az ahhoz tartozó terek extrém nagy energiákon összeolvadnak, ami azt jelenti, hogy már létezik egy egyesített, nagyenergiájú tér. Ha az új skalár tér a Higgs-részecske segítségével összekapcsolódik ezzel a nagyenergiájú térrel, akkor saját energiához is juthat. Az energia mennyiségét egy hintamechanizmus határozza meg: ha az egyik tér energiája növekszik, a másikénak csökkennie kell. Mivel az egyesítetterőter-energia igen nagy, az új skalár tér energiája kicsi kell, hogy legyen. Krauss és Dent azt találta, hogy azonos nagyságrendű, mint a megfigyelt sötét energia. „Számomra ez a legelső alkalom, hogy nem természetellenes ilyen kis energiaskálát létrehozni, amely más-különben a részecskefizikában megmagyarázhatatlan” – mondja Krauss.

Wilczek, aki nem vett részt az új munkában, megjegyzi, hogy bár az elképzelés lehetővé teszi a megfigyelt sötét energia létrehozását, nem magyarázza meg, hová tűnt a részecskeelméletek által megjósolt energia.

„Az a kérdés, hogy mit veszünk és milyen áron? Nem ad választ a nagy kérdésre, hogyan ejtette ki egymást minden más energia. Ha ez igaz, akkor figyelemreméltó. Ha azonban téves, akkor nem hiszem, hogy bárki is nagyon bánkódna.”

www.newscientist.com

Törlik, hajlik, felbomlik – kísérletezz a fényvel a szegedi Agorában!



Az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék munkatársai együttműködve a DEAK Kooperációs Kutatási Non-profit Zrt.-vel 2013 márciusa óta rendszeresen tartanak kísérletes bemutatókat optikai, fotonikai témakörökből a szegedi **Szent-Györgyi Albert Agora „Informatorium”** nevű bemutató terében. Az elmúlt hónapokban – egész napos rendezvények, kihelyezett projektnapok és rendhagyó fizikaórák keretében – több száz diák láthatott és próbálhatott ki különböző kísérleteket a színeképek, a színkeverés, a polarizáció, valamint az UV- és infravörös sugárzás témaköreiből.

A nyári szünetet követően 2013 októberétől kollégáink újra, előre meghirdetett időpontokban várják az Agorában a szegedi és Szegedre látogató iskolás csoportokat. Az érdeklődő felső tagozatos és középiskolás diákok a korábbi témakörök mellett a fény további tulajdonságaival és alkalmazásaival (például fénytörés, teljes visszaverődés, optikai távközlés) is megismerkedhetnek. Az ingyenes foglalkozások célja, hogy a különböző jelenségek megértését olyan kísérletekkel segítsük, amelyeket az iskolákban idő- és eszközhiány miatt általában nincs lehetőség bemutatni. A pontos időpontokról és a jelentkezés módjáról az Agora-**Informatorium** honlapján adunk tájékoztatást (www.informatorium.hu, www.agoraszeged.hu). Érdeklődni a következő címen lehet: Gortva-Kónya Mónika, konya.monika@deakszeged.hu.



Az **Informatorium** időszakos rendezvényei mellett állandó programok (Informatikatörténeti Kiállítás, MTA Szegedi Biológiai Központ Látványlaboratóriuma) is várják az érdeklődőket.

A rendhagyó fotonikai bemutatók a DEAK Kooperációs Kutatási Nonprofit Zrt. TÁMOP-4.2.3-12/1/KONV-2012-0058 azonosítószámú, „Hétköznapi tudomány” című pályázatának keretein belül valósulnak meg. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Gyere el a múzeumba!

A kiállítás
korhatár nélkül,
fényképes
igazolvánnyal
ingyenesen
látogatható.

Nyitva tartás:
hétfő-péntek: 8.00-15.00
szombat: 9.00-13.00
vasárnap: ZÁRVA

Érdeklődni lehet: 75/50-74-32

MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
7031 Paks, Pf. 71. hrsz. 8803/15
telefon és fax: 06-75-505-000; 1/355-1332
weboldal: www.atomeromu.hu
Facebook profil:
www.facebook.com/paksiatomeromu



Atomenergetikai Múzeum



mvm paksi atomerőmű

