

fizikai szemle

2013/4

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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

Gomolyfelhők a Magas-Tátra vonulatai
felett Farkas Alexandra felvételén.
A nyári hőségben gyakran előfordul,
hogy egy vízszintes légáramlatot egy
magas hegy vonulatai felszállásra
kényszerítenek, amiből igen heves
zivatarok is kialakulhatnak.

TARTALOM

<i>Varga Péter</i> : Esszé a mérésekről, amelyek a Planck-törvény felfedezéséhez vezettek – 4. rész	109	
<i>Szatmáry Zoltán</i> : Mérési eredmények kiértékelése Jánossy Lajos szerint	112	
<i>Molnár László</i> : Nap-típusú oszcillációk tengere	116	
<i>Király Márton</i> : Lehetséges megoldások az atomenergia-ipar jelenlegi problémáira – I. rész	121	
<i>Herman Edit, Kádár József, Martinás Katalin, Bezezb András</i> : A kukorica alapú bioetanol magyarországi előállításának exergiaelemzése	125	
A FIZIKA TANÍTÁSA		
<i>Stonauski Tamás</i> : Felhők hátán	129	
<i>Riedel Miklós, Barta Zsuzsanna</i> : Az égbolt hőmérsékletének mérése az üvegházhatás vizsgálatára a fizikatanárok CERN-i tanulmányútján	133	
<i>Härtlein Károly György</i> : Fakirány légömbnek, pizzatávtartóból	144	
KÖNYVESPOLC		136
HÍREK – ESEMÉNYEK		139

P. Varga: On the measurements which led to the discovery of Planck's law – part 4
Z. Satmáry: L. Jánossy's directives concerning the evaluation of measured data
L. Molnár: The ocean of solar-like oscillations
M. Király: Actual problems of industrial nuclear energy supply and their possible solutions – part I
E. Herman, J. Kádár, K. Martinás, A. Bezezb: The exergy analysis of producing bioethanol from maize in Hungary

TEACHING PHYSICS

T. Stonauski: The observation of extremely slow processes
M. Riedel, Zs. Barta: Sky temperature measurements
K. G. Härtlein: A fakir's bed for balloons

BOOKS, EVENTS

P. Varga: Über die Messungen, die zur Entdeckung des Planckschen Gesetzes führten – Teil 4.
Z. Satmáry: L. Jánossy über die Auswertung von Messergebnissen
L. Molnár: Das Meer der bei Sonnen beobachteten schwankungen
M. Király: Mögliche Lösungen aktueller Probleme der Versorgung mit Kernenergie
E. Herman, J. Kádár, K. Martinás, A. Bezezb: Die Exergie-Analyse der Herstellung von Bioethanol aus Mais in Ungarn

PHYSIKUNTERRICHT

T. Stonauski: Die Beobachtung besonders langsamer Vorgänge
M. Riedel, Zs. Barta: Temperaturmessungen am Himmel
K. G. Härtlein: Ein Stifftbett für Luftballone

BÜCHER, EREIGNISSE

П. Варга: Измерения, служащие основами изобретения закона Планка – часть четвертая
З. Сат.мари: Показания Л. Яноши по обработке результатов измерений
Л. Молнар: Море колебаний, похожих тем у нашего солнца
М. Киравль: Возможные решения актуальных проблем снабжения промышленной ядерной энергией – часть первая
Э. Херман, Й. Кадар, К. Мартинаш, А. Безеб: Анализ эксэргии отечественного производства биоэтанола из кукурузы

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Т. Стонауский: Наблюдение сверх-медленных явлений
М. Ридел, Ж. Барта: Измерения температуры на небе
К. Г. Гэртлейн: Хранение баллонов на специальном наборе держателей

КНИГИ, 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 Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXIII. évfolyam

4. szám

2013. április

ESSZÉ A MÉRÉSEKRŐL, AMELYEK A PLANCK-TÖRVÉNY FELFEDEZÉSÉHEZ VEZETTEK – 4. RÉSZ

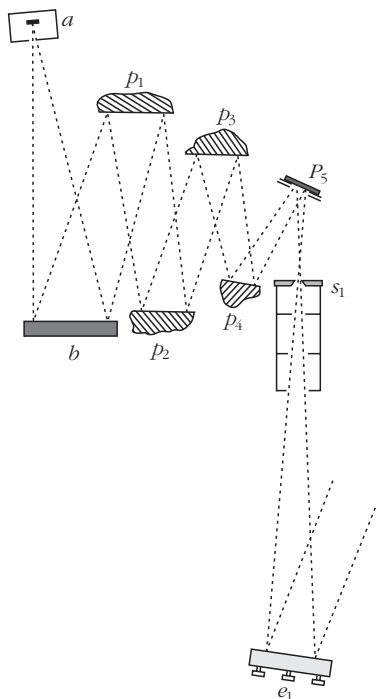
Varga Péter
KFKI

A döntő kísérlet

Tovább kellett lépni a még hosszabb hullámok felé. De miből készítették volna a monokromátor prizmáját, hiszen a kalcium-fluorid $20\ \mu\text{m}$ felett már elnyeli az elektromágneses sugárzást?

Rubens és Nichols [19] ekkor még nem ezt a kérdést vetették fel, hanem azt: hogyan lehet felírni a szilárd testek törésmutatóját, mint a hullámhossz függvényét. Paschen és Rubens már bebizonyították a Ketteler–Helmholtz-formula:

14. ábra. Rubens és Nichols elrendezése: a cirkonéző, b gömbtükrő, amely a sugárzást az s_1 rése gyűjti össze, $p_1 \dots p_5$ a vizsgált anyagból készített síktükrök, e_1 a rácsos monokromátor belépő tükrje.



$$n^2 = b^2 + \frac{M_1}{\lambda^2 - \lambda_1^2} - \frac{M_2}{\lambda_2^2 - \lambda^2}$$

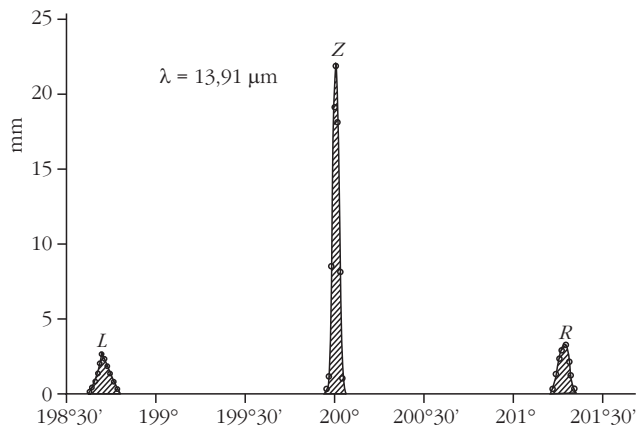
használhatóságát, ahol n a törésmutató, λ a hullámhossz, a többi mennyiség anyagi jellemző. A képlet nyilvánvalóan közelítés, azt hivatott kifejezni, hogy bizonyos hullámhosszaknál rezonancia lép fel. A nevezőkbe be kellett volna írni az abszorpció hatásának megfelelő additív tagot, de ez a lényegen nem változtat. Ma a szilárdtestek energianívóinak sávszerkezetéről beszélünk.

Rubens és Nichols a különböző anyagok $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ rezonancia-hullámhosszait keresték a távolabbi infravörös tartományban. Mivel a prizmás spektrométereket már nem használhatták, rácsos spektrométert készítettek. A rácsállandó közel $0,2\ \mu\text{m}$ volt (magáról a rácsról bővebben dolgozatunk utolsó részében).

A rezonanciasávok jelenléte az abszorpcióképesség és a reflexióképesség megnövekedését okozza. Mivel a szilárdtestek minden hullámhosszon reflektálnak, a megnövekedett reflexiót úgy emelték ki a háttérből, hogy több egymás után elhelyezett mintán verették vissza a sugárzást (14. ábra). Ha a sávon belüli R reflexióképesség nagyobb, mint a sávon kívüli (r), akkor a kettő aránya n -szeres visszaverődés után

$$\left(\frac{R(\lambda)}{r(\lambda)} \right)^n.$$

Bár a reflexiók számának növelésével a maximum helyén mérhető sugárzás intenzitása csökken, azonban az arány növekszik és – ami fő szempont volt a kísérletezők számára – a görbe szélessége is csökken, a maximum helye pontosabban mérhető. Az utolsó reflexió utáni sugarat Rubens *Reststrahlung*nak, maradéksugárzásnak keresztelte el. Egy ilyen spektrum



15. ábra. A kősó maradéksugárzásának spektrogramja.

látható a 15. ábrán. Csak keskeny sávokban ver vissza az anyag, a sávon kívül a reflektált fény teljesítménye gyakorlatilag eltűnik.

A frekvenciaszelektív reflexiót a homogén (monokromatikus) sugárzás előállítására lehet felhasználni. Fordítva: mivel a sávon belül az anyag abszorpcióképessége is nagy, ha egy ilyen lemezt transzmisszióban használunk, akkor sávot vágunk ki a spektrumból. Ennek hasznát vehetjük, ha az adott sávba eső fényrel dolgozunk, és meg akarunk győződni arról, nincs-e a kívánt sávon kívüli háttérsugárzás. Ezt ugyanis nem látjuk, hiszen az infravörös tartományban vagyunk.

A maradéksugárzás használata azért is előnyös, mert nincs szükség a bonyolult és kényes optikára (lásd a prizmás vagy rácsos monokromátort). A fényforrás lehet akár mekkora, a nyaláb térszögét sem korlátozza semmi, hacsak mi magunk nem.

Rubens és Nichols tíz különböző anyagot, köztük a fent prizmaként felsoroltakat (egyes elemeknél két sávot is találtak), de még amorf közegeket is megvizsgáltak. A jelenséget a szilárdtestfizika magyarázza meg, de az ismeretek ekkor még nem tartottak ott. Ettől még a maradéksugárzást fel lehetett használni a fekete sugárzás kísérleteinél.

Az elsőként *H. Beckmann* alkalmazta, akinek a doktori disszertációjára (1898, Tübingen) többször hivatkoztak (például [15], [20] [21]), de nem találtam meg Beckmann közleményét. Beckmann kalcium-fluorid $24\ \mu\text{m}$ hullámhosszú maradéksugárzásán mért az izokromáta-módszerrel, mégpedig szénsavhó hőmérséklete és $600\ \text{K}$ között. Az eredmény $c_2 = 24\,000\ \mu\text{mK}$ lett, ami messze eltért minden addig mért értéktől. A mérés azért is volt fontos, mert a Wien-formulát igazoló Paschen–Wanner és azt cáfoló Lummer–Pringsheim párviadalban független hozzájárulás volt. Rubens szerint azért kapott Beckmann konstans c_2 értéket, ellentétben Lummerék görbülő izokromátaival [15], mert kis hőmérséklet-intervallumban mért.

Mivel Rubens és Nichols az adott [19] munkában nem utaltak arra,

hogy a maradéksugárzás a feketesugárzás mérésében is felhasználható, feltételezhetjük, hogy a maradéksugárzás feketesugárzás mérésében való felhasználásának az ötlete Beckmanné volt. Utalást már csak a Beckmann követő cikkekben találunk, továbbá Planck is felfigyelt rá [11]. A mindent eldöntő mérést ismertető [21] cikkben pedig, a megelőző kísérletek ismertetése során, Beckmann eredményét tárgyalják a leghosszabban.

A döntő kísérletet Rubens és Kurlbaum végezték el. Erről a Német Tudományos Akadémia 1900. október 9-i ülésén számoltak be, mi most a részletesebb és közben kiegészített közlemény [21] alapján ismerhetjük.

A mérőberendezés sémája a 16. ábrán látható. A *K* fekete testet cserélni lehetett, mert a méréshatárok $-188\ ^\circ\text{C}$ -tól $1500\ ^\circ\text{C}$ -ig terjedtek, ehhez váltani kellett a forrásokat. Hűteni cseppfolyós levegővel, szénsavhóval, fűteni forró folyadékokkal és elektromosan lehetett. A forrást mindig a megfelelő D_1 diafragma mögé állították be úgy, hogy tengelye merőlegesen álljon a diafragma síkjára és annak a közepére essen.

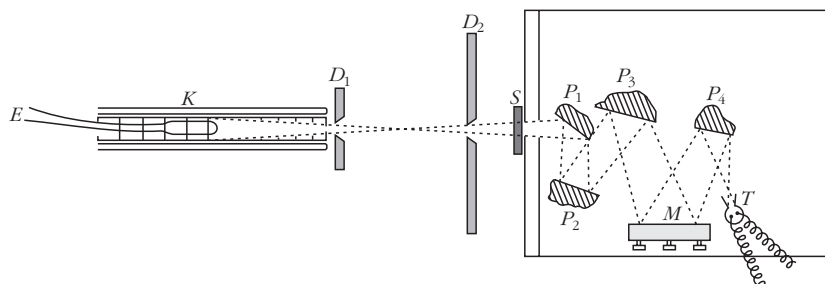
A D_1 diafragma átmérője $10\ \text{mm}$ volt, szemben a monokromátoroknál használható $0,5\ \text{mm}$ -rel! A D_2 diafragma határozta meg a $\Delta\Omega$ térszöveget, méretét nem közölték. Ugyanezzel a diaframmával érték el, hogy sugárzás csak a fekete test legbelsejéből jusson el a reflektorokra. Alacsony hőmérsékleten, a legnagyobb hullámhossznál a D_1 diafragma $10\ \text{mm}$ -es átmérője kicsinek bizonyult, ilyenkor a sugárforrást közvetlenül a D_2 elé helyezték és $30\ \text{mm}$ nyílású sugárforrást használtak. Ennél valamivel kisebb lehetett a D_2 diafragma. Ilyenkor a térszög is megváltozott, ezt tekintetbe kellett venni, de a szerzők nem említik. A levehető *S* lappal lehetett megállapítani a háttérteret.

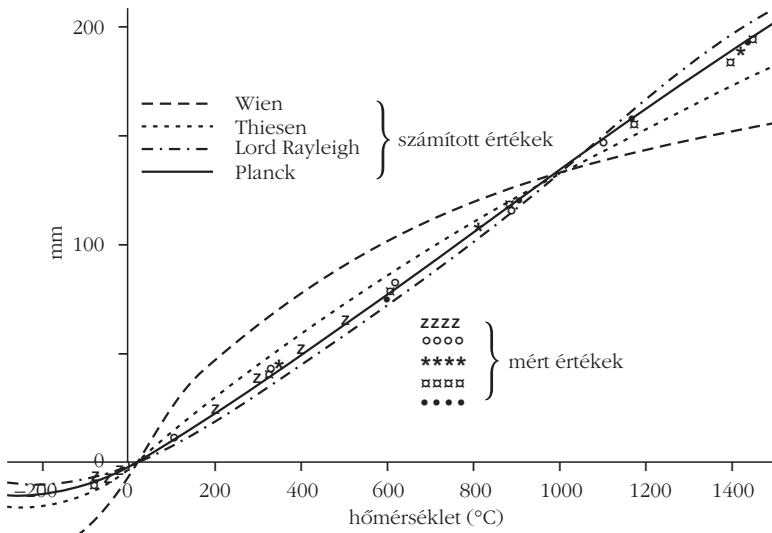
Hullámhossz-szelektív anyagként kvarc ($8,5\ \mu\text{m}$ és $9,05\ \mu\text{m}$), kalcium-fluorid ($24,0\ \mu\text{m}$ és $31,6\ \mu\text{m}$), valamint kősó ($51,2\ \mu\text{m}$) szolgált.

A teljesítményt szobahőmérsékleten levő termoelemmel mérték. Vegyük észre, szobahőmérséklet alatt a termoelemet a fekete test már hűtötte! Fel kell tennünk, hogy ez is feketesugárzó volt.

A kalcium-fluoriddal mért izokromáta a 17. ábrán látható, ide berajzolták a különböző elméletek görbéit is. Abszcissza a hőmérséklet, ordináta a teljesítmény mérő termoelemhez kötött galvanométer kitérése. A különböző görbéknek két közös pontjuk van: a szo-

16. ábra. Rubens és Kurlbaum mérőberendezése: *K* a fekete test, D_1 és D_2 diafragmák, *S* felemelhető takaró, $P_1 \dots P_4$ a szelektív visszaverő lemezek, *M* konkáv tükör, *T* termoelem.

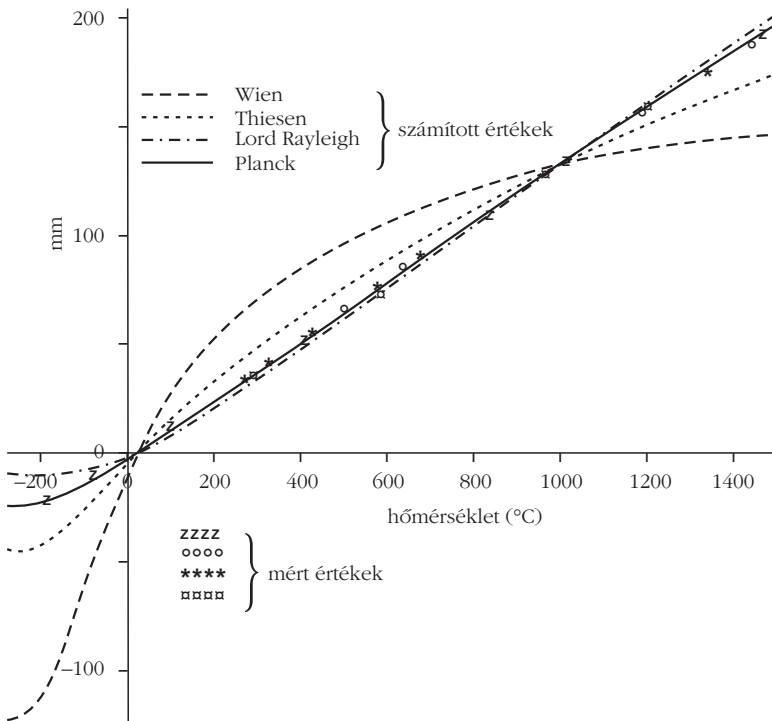




17. ábra. A kalcium-fluorid izokromátája és az egyes elméleti görbék. A mért adatok jelei: 1. sor – Beckmann mérései, 2. sor – Rubens és Kurlbaum mérése sylvinlemez-zel, 3–5. sor – Rubens és Kurlbaum mérései a CaF₂ felületek különböző jusztlásánál.

bahőmérséklet, ahol egyensúly van a sugárzó és a mérőeszköz között, valamint az 1000 °C-nál fekvő mérési pont. Ezekre fektették az elméleti görbéket. A különbözőképpen jelölt mérési pontokat különböző napokon, a reflektáló felületek újraállítás után vették fel. Bejelölték Beckmann méréseit is. Mivel a kalciumfluoridnak két rezonancia-hullámhossza van, egyes méréseknél a fényútba KCl lemezt tettek, amely a hosszabb hullámokat teljesen kiszűrte, a rövidebb hullámhosszaknál kapott értékeket pedig egy konstanssal szorozni kellett, hogy illeszkedjen a többi méréshez.

18. ábra. A kőso izokromátája és egyes elméleti görbék. A mérési adatok jelei a különböző fekete testekhez tartoznak.



Ha a mért görbét elfogadjuk, akkor látjuk, hogy Wien sugárzási törvénye egyáltalán nem tesz eleget a tapasztalatnak. Thiessen görbéje kevésbé, de azért szignifikánsan tér el a mért adatoktól. Viszont két görbe megfelel.

Az egyik a Planck-törvény [22]:

$$u(\lambda, T) = C \frac{\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (19)$$

Nem véletlen az egybeesés, hiszen Planck a most ismertetett mérések hatására módosította az entrópia kifejezését éppen azért, hogy a tapasztalatnak megfelelő függvényt kapjon. Ezért kapta a törvény az interpolációs formula kifejezést is. Pálfordulását Planck azzal indokolja, hogy a feketesugárzás (Wien törvényét) igazoló formuláját bebizonyította ugyan, de azt nem, hogy ez az egyetlen lehetséges megoldás. Planck tudta ezt jól, amint ezt már idéztem. Az új törvény magyarázatára majd novemberben kerül sor, de már nem a régi úton, hanem a kvantumhipotézis segítségével.

A Planck-törvény mellett továbbra is fennmarad Rayleigh (17) formulája.

A szerzők a mérés eredményeit és a különböző formulákból számítottakat táblázatban is közlik. A fentiek kívül itt számításba vesznek egy további formulát, Lummer és Jabnke (18) empirikus képletét, amelyik egy μ, ν értékpárra szintén jól közelíti a tapasztaltakat.

Sajnos a kalcium-fluoriddal végzett mérésnek van szépséghibája. Éppen Rubens [20] szerint a két rezonancia-hullámhossz (24,0 μm és 31,6 μm) kiszélesedett görbéi a nagy különbség ellenére még hatszoros reflexió után is összefolynak. (A rövidebb hullámhosszhoz tartozó maximum duplája a hosszabbikénak.) A jelen mérésben meg csak négyszeres volt a reflexió. Bár a szerzők megjegyzik, hogy az ábrán szereplő görbék kiszámításánál a dubletet figyelembe vették, de nem tapasztaltak jelentős eltérést a csak 24,0 μm értékkel számolt görbétől. Érdeemes lett volna kvantitatív módon is alátámasztani.

Még kedvezőbb képet mutat a 18. ábra, amit a kősoval végzett mérés alapján kaptak. 52,2 μm volt a legnagyobb hullámhossz, amin mértek. A 15. ábra mutatja, hogy a maradéksugárzás szinglett, sávzélessége viszonylag kicsi, de a spektrális tisztaság érdekében a kísérletezőknek ötszörös reflexiót kellett használniuk. A kis detektált teljesítmény miatt a sugárforrás feketetesteket cseréltetni kellett. A térszögre vonatkozó adatközlés hiányáról szóló kritikámtól azért

lehet most eltekinteni, mert a döntő megfigyelések a magas hőmérsékletek tartományába estek. Viszont 600 °C felett a kontinuum háttér megnőtt. Ezt könnyű volt meghatározni, mert az S lemez helyére rakott kőslap a mérendő sugárzást kiszűrte, a zavarót átengedte.

Ugyancsak versenyben tartotta a (17), (18) és (19) formulákat a kvarc maradék sugárzási hullámhosszain végzett mérés. Bár a kvarchoz is két hullámhossz tartozik, de ezek olyan közel fekszenek egymáshoz, hogy ettől el lehet tekinteni. A 8,5 μm beleesik abba a tartományba, ameddig kritikus méréseikben Lummer és Pringsheim elmentek [15].

Marad tehát Planck, Rayleigh és Lummer–Jahnke. Az utóbbit Rubens és Kurlbaum azzal ejtik el, hogy formulájuk túl bonyolult. Rayleigh formulájáról azt állítják, hogy Lummer és Pringsheim kimutatták, hogy rövid hullámhosszaknál nem használható, ami valóban igaz. Hivatkozást sajnos nem közöltek, az általam ismert Lummer–Pringsheim cikkekben nem láttam.

Utócsatározások

Résztevők: Paschen [23, 24] és a Lummer–Jahnke páros [25, 26]. Az egymásnak látszólag ellentmondó eredményeket publikáló szerzők között folytatott vita olykor szubjektívnek tűnő, és kétségkívül szubjektív indítatású érvelést is tartalmaz, aminek ismertetésétől eltekintek.

Ám a jó fizikus, ha konkrét kérdésekről van szó, fizikus marad. Paschen új fekete testeket épít, és kimutatja, hogy magas λT értékeknél az izokromáták már nem egyenesek [23]. Lummer és Pringsheim gyakorlati célokra (hőmérsékletmérésre) is fel kívánja használni az új törvényt, és ajánlja Paschen és Wanner fotometriai eljárását [26, 27].

Ezek után a fizikusok közül, *Jeans* kivételével, talán már senki sem vonta kétségbe Rubens és Kurlbaum mérésének helyességét.

Irodalom

19. H. Rubens, E. F. Nichols: Versuche mit Wärmestrahlen von grosser Wellenlänge. *Annalen der Physik* 296 (1897) 418–462.
20. H. Rubens: Über die Reststrahlen des Flussspathes. *Annalen der Physik* 305 (1899) 576–588.
21. H. Rubens, F. Kurlbaum: Anwendung der Methode der Reststrahlen zur Prüfung des Strahlungsgesetzes. *Annalen der Physik* 309 (1901) 649–666.
22. M. Planck: Über eine Verbesserung der Wien'schen Spektrahlgleichung. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900) 202–204.
23. F. Paschen: Ueber das Strahlungsgesetzes des Schwarzen Körpers. *Annalen der Physik* 4 (1901) 277–298.
24. F. Paschen: Ueber das Strahlungsgesetzes des Schwarzen Körpers, entgegnung auf Ausführungen der Herren O. Lummer und E. Pringsheim. *Annalen der Physik* 311 (1901) 646–658.
25. O. Lummer, E. Pringsheim: Kritisches zur Schwarzen Strahlung. *Annalen der Physik* 311 (1901) 192–210.
26. O. Lummer, E. Pringsheim: Temperaturbestimmung hoch erhitzter Körper (Glühlampe, usw.) auf bolometrischen und photometrischen Wege. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 3 (1901) 36.
27. O. Lummer, E. Pringsheim: Die Strahlungstheoretische Temperaturskala und ihre Verwirklichung bis 2300° abs. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 5 (1903)

MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE JÁNOSSY LAJOS SZERINT

Szatmáry Zoltán
BME Nukleáris Technikai Intézet

Jánossy Lajos szerteágazó tudományos tevékenységében fontos terület a mérési eredmények kiértékelése. Erről szól egyik kézikönyve [1], amelyet már megjelenésének évében lefordítottak oroszra. Később megjelent a magyar kiadása is némileg szűkített, némileg bővített tartalommal. A könyvet számos ország kutatói forgatták és alkalmazták saját méréseik kiértékelésére – többnyire eredményesen. Emlékezetes számomra, amikor egy reaktorfizikai tárgyú, nemzetközi nyári iskola kávészünetében jugoszláv résztvevők a szememre hányták, hogy beprogramozták Jánossy képleteit, de az iteráció sehogyan sem „akart” konvergálni. Ez egy évvel a könyv megjelenése után, tehát 1966-ban történt. A magyar valószínűségelméleti iskola hírneve alapján a beszélgetés résztvevői természetesen vették, hogy egy magyarnak betéve kellene ismernie nemcsak Jánossy könyvét, hanem a többi világhírű matematikus (*Rényi*, *Prékopa* stb.) munkásságát is. Akkor még túlságosan

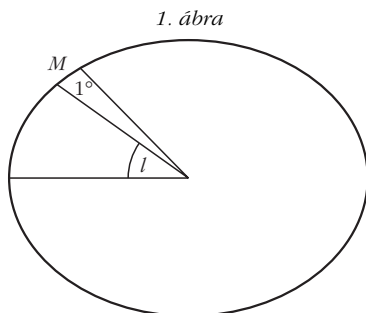
fiatal voltam ahhoz, hogy erre a szemrehányásra megadjam a „helyes” választ. Én ugyanis azt válaszoltam, hogy feltehetően rosszul programozták be a képleteket, ami igaz lehetett, de ma úgy látom: másról volt szó. Később ugyanis felismertem, hogy helyesen beprogramozott helyes képletek még nem feltétlenül elégségesek nagy tömegű mérési eredmény kezelésére. A számítógépi alkalmazásoknak saját problémáik vannak, amelyek megoldásához szintén sajátos módszerekre van szükség. Nem sokkal halála előtt tapasztaltam, hogy maga Jánossy is ráértett minderre: 1978-ban a KFKI egyik igazgatótanácsi ülésén rosszkedvűen megjegyezte, hogy az ő könyve éppen akkor jelent meg, amikor a számítógépek elterjedtek, így ő már nem terjeszthette ki munkásságát a számítógépek használatára. Az igazgatótanács akkori elnöke (*Pál Lénárd*) megnyugtatta, hogy a „Jánossy-iskola” létezik és éppen ebbe az irányba fejlődik, nézze meg például az én dol-

gozataimat. Örömmel adtam át a reaktorfizikában általánosan használt RFIT program elméletéről akkor már létező dolgozataimat. Azután csak egyszer találkoztam vele, amikor jelezte, hogy olvasásukkal még nem végzett, de rövidesen jelentkezik. Nem sokkal később sajnos elhunyt, és csak remélhetem, hogy munkámat támogatta volna, ha tudtunk volna eszmét cserélni róla.

Ez után a kissé személyes bevezető után nézzük meg tartalmilag, melyek voltak Jánossy legfontosabb gondolatai és eredményei, illetve ezek hogyan élnek tovább napjainkban. A legfontosabb gondolat magától értetődőnek tűnik: a mérések eredményeit a matematikai statisztika tételeinek szabatos alkalmazásával kell kiértékelni, ami elsősorban a konfidenciatartomány megszerkesztésére (köznapin nevéen: a hibaszámításra) vonatkozik. Sok laboratóriumot ismerek, ahol ugyanezt a Jánossy által elvárt korrektséggel végzik, de jártam egy világszinten is vezetőnek számító laboratóriumban, ahol így gondolkodtak: „a mérési hibán belül nem egyeznek meg a számított és mért adatok, ezért minden mért adat hibáját megnöveljük 1%-kal”. Így azután egyezés lett, de akkor minek mértünk? – ezt már én teszem hozzá. Sajnos a mérési adatok kiértékelése olyannak tűnik, mint a labdarúgás vagy a gyermeknevelés: sokan azt képzelik, hogy eleve értenek hozzá. Jánossy könyve ennek csattanós cáfolata: minden, általa vizsgált probléma esetében kellő figyelmet fordít a szórások, illetve a kovarianciamátrix becslésére.

Az ismeretlen paraméterek becslésére konzekvensen a maximum likelihood módszert alkalmazta. Maga a módszer hosszú fejlődés eredménye. A témakörben kevésbé járatos olvasóink számára talán nem lesz haszontalan, ha röviden összefoglaljuk a történelmi fejlődést. Abban az értelemben, ahogy azt ma értjük, a 18. század végén merültek fel mérési kiértékelési problémák. Nevezetes *P. S. Laplace* számítása (1786), amellyel a Föld alakját meghatározta. Már akkor tudták, hogy a Föld nem gömb alakú, hanem egy forgási ellipszoiddal közelíthető. Az ellipszoid paramétereit mérésrel határozták meg. Tekintsük az *1. ábrát!* A Föld keresztmetszetét mutatja (erősen torzítva), amely a feltevés szerint ellipszis. Különböző földrajzi helyeken megmérték a délkör 1° középponti szöghöz tartozó darabjának M hosszát. A mérés helyét az l szélességi körrel jellemezték. Geometriai megfontolásokkal levezette, hogy M és l között a

$$M = a + b \sin^2 l = a + b x$$



1. táblázat

A Föld alakjára vonatkozó mérések			
földrajzi hely	l (°)	$x = \sin^2 l$	M (dupla öl)
Peru	0	0	25538,85
Jóreménység foka	37,0093	0,30156	25666,65
Pennsylvania	43,5556	0,39946	25599,60
Olaszország	47,7963	0,46541	25640,55
Franciaország	51,3327	0,52093	25658,28
Ausztria	53,0926	0,54850	25683,30
Lappföld	73,7037	0,83887	25832,25

1 dupla öl = $2 \times 1,949$ m

összefüggés áll fenn, ahol a és b az ellipszis alakjától függő ismeretlen állandók. (a és b nem az ellipszis féltengelyeinek a hossza, de azokkal ismert összefüggésben áll. Ha tehát meghatározzuk a -t és b -t, a féltengelyeket is kiszámítjuk.)

A mérési eredmények az *1. táblázat*ban találhatók. Az eredeti jelöléseket és egységeket az érdekesség kedvéért hagytuk meg: a hosszúságot „dupla öl” egységekben, a szögeket olyan fokban mérték, amely szerint a teljes szög 400° . Laplace a következőképpen okoskodott. Tekintve, hogy nem lehet a és b értékét úgy megválasztani, hogy a képlet minden mérésre pontosan érvényes legyen, a képlet hibáját a lehető legkisebb értékre próbálta leszorítani. Adott a és b mellett meghatározta az

$$|M - a - b \sin^2 l|$$

hibatagok maximumát, majd megkereste a és b olyan értékeit, amelyek mellett ez a maximum a legkisebb. A modern terminológia szerint ezt minimax becslésnek nevezzük. Laplace eredménye a következő volt:

$$a = 25525,1 \text{ dupla öl és } b = 308,2 \text{ dupla öl.}$$

Laplace-nak még ad hoc módszereket kellett alkalmaznia, de *Neumann János* játékelméletében napjainkra már közismert módszereket dolgoztak ki a minimax problémák megoldására.

Eredetileg *A. M. Legendre* javasolta a legkisebb négyzetek módszerét (1806). Javaslatát az *1. táblázat*ban szereplő adatokra vonatkozóan fogalmazzuk meg. Ha az egyes mérések megkülönböztetésére bevezetjük az i indexet, akkor szerinte a

$$Q = \sum_{i=1}^7 (M_i - a - b x_i)^2$$

négyzetösszeg minimumát kell keresni. *C. F. Gauss* – többek között – csillagászati és geodéziai megfigyelések kiértékelésével foglalkozott. 1809-ben ő vetette meg a legkisebb négyzetek módszerének az alapjait. A mai napig használjuk az általa bevezetett fogalmakat és jelöléseket.

A 19. század végén már alkalmazták az úgynevezett L_1 -normában vett minimális eltérések módszerét, amely szerint a

$$Q_1 = \sum_{i=1}^7 |M_i - a - b x_i|$$

összeg minimumát keressük az a és b paraméterek függvényében. A felmerülő matematikai nehézségek miatt a legkisebb négyzetek módszere, de főleg a maximum likelihood módszer (lásd alább) háttérbe szorította ezt a módszert. Időközben a gazdasági optimalizálás céljaira kifejlődött a lineáris programozás (szimplex módszer), amelyre matematikai szempontból visszavezethető az L_1 -norma minimalizálása. Miután erre közhasznú programok jelentek meg, a matematikusok újra ajánlják ennek használatát is, ugyanis a módszernek jelentős előnyei vannak.

Döntő áttörést eredményezett *A. Fisher* munkássága a 20. század tízes éveiben. Az ő nevéhez fűződik a ma általánosan alkalmazott maximum likelihood módszer. Eszerint a keresett paraméterek becsült értékét úgy választjuk meg, hogy azok mellett a kapott kísérleti eredmények a legvalószínűbbek legyenek. A módszer előnye, hogy matematikailag jól kezelhető formulákra vezet, továbbá hogy a becslésnek kedvező matematikai statisztikai tulajdonságai vannak. Legfontosabb tulajdonságát a paraméterek becslésében alapvető Cramér–Rao-egyenlőtlenség segítségével tudjuk megvilágítani: reguláris becslési problémák (lásd alább) esetében a becsült paraméterek szórása nem lehet egy alsó határnál kisebb, bármilyen módszert használunk is a becslési probléma megoldására. Nos, bebizonyították, hogy a maximum likelihood becslések szórása az alsó határhoz tart, amikor a mérési adatok száma minden határon túl nő. Vannak esetek, amelyekben a szórások már véges számú adatok esetén is minimálisak.

Ezen a ponton visszatérünk Jánossyhoz. Mivel sokat foglalkozott kozmikus sugárzással és elemi részecskékkel, könyvének példái ilyen jellegűek: a részecskéknél fotoemulzió segítségével való megfigyeléssel és a részecskeszámolással kapcsolatosak. Ha a mérési eredmények Gauss-eloszlásúak, a maximum likelihood módszer átmeny a legkisebb négyzetek Gauss óta bevett módszerébe, de az említett mérések esetében inkább a Poisson-eloszlás az érvényes, tehát nem volt más választása, mint a maximum likelihood módszer.¹ A dolgot egy konkrét mérés példáján mutatjuk be részletesen. Tegyük fel, hogy egy részecske-detektorral egy radioaktív anyagban történő bomlások számát mérjük a t idő függvényében. A t_i időpontban T_i idő alatt mért beütésszám legyen N_i , amelynek várható értéke

$$M(N_i) = T_i(a_1 e^{-a_2 t_i} + a_3 e^{-a_4 t_i} + a_5) = \\ = T_i f_i(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Itt feltettük, hogy a vizsgált anyag két radioaktív izotópot tartalmaz, amelyek bomlási állandója a_2 és a_4 ; az egyes izotópok mennyisége az a_1 és a_3 paraméterekkel arányos; végül az a_5 paraméter a mérőlaboratórium háttéré. Az f_i függvényt illesztőfüggvénynek nevezzük, és az időegységre vonatkozó beütésszám várható értékét adja meg a t_i időpontban. A maximum likelihood módszer szerint fel kell írunk annak valószínűségét, hogy ebben a mérésben az N_1, N_2, \dots, N_n beütésszám-együttest kapjuk eredményül. A Poisson-eloszlás szerint az i -edik mérésben

$$P_i = e^{-T_i f_i} \frac{(T_i f_i)^{N_i}}{N_i!}$$

valószínűséggel kapjuk az N_i beütésszámot. Mivel az egyes mérések egymástól függetlenek, az együttes valószínűség ezek szorzata:

$$L(N_1, N_2, \dots, N_n; a_1, \dots, a_5) = \prod_{i=1}^n e^{-T_i f_i} \frac{(T_i f_i)^{N_i}}{N_i!}.$$

Ezt a függvényt likelihood-függvénynek nevezzük (erre utal az L jelölés). A maximum likelihood módszer értelmében az ismeretlen paramétereket úgy kell megválasztani, hogy L maximális legyen. Matematikailag ez azt jelenti, hogy meg kell oldani a

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a_k} = 0, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5$$

egyenletrendszert.

Mivel transzcendens egyenleteket kaptunk, megoldásuk csak numerikus módszerekkel képzelhető el. Mint a legtöbb kísérleti fizikus, Jánossy is többször írt fel ehhez hasonló egyenletrendszereket (persze más illesztőfüggvényekkel), sőt megoldásukra javasolt iterációs eljárásokat is. Mivel itt már csak számítógépek használata képzelhető el, az iterációk hatékonyságát – mint már megbeszéltük – nem tudta vizsgálni. A fent választott ötparaméteres illesztőfüggvény olyasmiről lehet, amellyel fent említett jugoszláv kollégáim próbálkoztak. Nos, az ehhez hasonló függvények a kísérleti fizikusok rémálmai közé tartoznak. Ez különösen akkor igaz, amikor az a_2 és a_4 paraméterek alig különböznek egymástól. Ilyenkor ugyanis a konvergenciát csak nagyon szerencsésen megválasztott kezdőértékekkel sikerül elérni. Miután az iteráció konvergált, becslést kapunk a keresett paraméterekre, de ezzel párhuzamosan becsülnünk kell a kapott paraméterbecslések szórását is, mivel ez határozza meg a végeredmény statisztikai bizonytalanságát.

A kezdőértékek megválasztása csak az egyik numerikus probléma, a számítógépi programban tanácsos az iterációt stabilizálni. A számítógépek használata

¹ Csak mellékesen jegyezzük meg, hogy ebben az esetben a maximum likelihood módszer egyenletei matematikailag ugyanolyan alakúak, mint a legkisebb négyzetek módszerének egyenletei, tehát mindkét módszer esetében ugyanazt a számítógépi programot alkalmazhatjuk. Mindez persze nem kisebbíti Jánossy érdemeit, aki – mint már említettük – nem ment el a számítógépi megvalósításig.

latának vannak más következményei is. Ha ugyanis számítógépet használunk, jelentősen megnő a kiértékelhető adatok mennyisége – különösen a korszerű számítógépek teljesítménye mellett. Például a nehéz atommagok ütközésekor egyetlen esemény mintegy 20 Mbyte adatot eredményez, amelyeket μs -ok alatt kell eltárolni. Ilyen feltételek mellett a kísérletező általában nem is látja a primer adatokat, legfeljebb a kiértékelés végeredményét ismeri meg. Ha elég körültekintő, készíttet a szoftverével néhány grafikont, de ez nem változtat azon, hogy a fizikai alapfeltevések (például az illesztőfüggvény) helyességének vizsgálata, a kiszóró adatok kiszűrése és hasonló feladatok fejlett statisztikai módszerek kidolgozását igénylik. Jánossy idejében ezek másképpen merültek fel, mint manapság.

A paraméterek becslésének szabatos végrehajtásán túlmenően Jánossy egy további kérdéssel is foglalkozott. Bár a maximum likelihood módszer önmagában biztosítja, hogy a becslőt paraméterek szórása a lehető legkisebb legyen, jogos felvetni azt a kérdést, lehet-e a mérések körülményeinek alkalmas megválasztásával a Cramér–Rao szerinti alsó határt csökkenteni. Ez a kísérletek tervezésének problémája, amellyel Jánossyn kívül számos szerző foglalkozik. Ennek ellenére ezen a területen átütő eredményről még nem sikerült olvasnom.

Befejezésül még két példát hozunk, amelyek jól illusztrálják Jánossy gondolkodását. Az egyik az [1] kézikönyv magyar változatában található, a másikat személyesen tőle hallottam. A részecskeszámlálásban óhatatlan fellép a holtidő: egy részecske megszámlálása után a számlálóberendezés egy τ ideig nem tud további részecskéket megszámlálni. A holtidő hatását az alábbi példával világítjuk meg. Ha T_i idő alatt N_i részecskét regisztráltunk, akkor a számlálóberendezés $N_i\tau$ ideig „halott” volt, tehát az effektív számlálási idő

$$T_i^{\text{eff}} = T_i - N_i\tau,$$

vagyis holtidő nélkül

$$\frac{N_i^{\text{eff}}}{T_i} = \frac{N_i}{T_i - N_i\tau} = \frac{N_i}{T_i} \frac{T_i}{T_i - N_i\tau} = \frac{N_i v_i}{T_i}$$

részecskét számláltunk volna meg időegység alatt. Az itt szereplő v_i tényező a holtidő-korrekciós tényező, amelyet gyakran alkalmazunk a nukleáris mérések gyakorlatában.² Nem triviális, de be lehet látni, hogy sem N_p , sem N_i^{eff} nem követi a Poisson-eloszlást, hanem eloszlásuk valami más. Amíg tehát nem számítjuk ki ezt az eloszlást, nem alkalmazhatjuk a maximum likelihood módszert, legfeljebb a legkisebb négyzetek módszerének valamilyen közelítő változatára vagyunk utalva. Jánossy vezette le, hogy N_i eloszlása

$$P_i = e^{-(T_i - N_i\tau)f_i} \frac{[(T_i - N_i\tau)f_i]^{N_i}}{N_i!},$$

ami lehetővé teszi a maximum likelihood módszer korrekt alkalmazását. A tapasztalat mutatja, hogy a holtidő okozta számlálási veszteségek drámaian tudják befolyásolni az a_2 és a_4 paraméterek becslött értékét – ha a fenti példa mellett maradunk. Nem mindegy tehát, hogyan vesszük figyelembe ezeket a veszteségeket: a Jánossy szerinti korrekt módon vagy a holtidő-korrekciós tényező alapján valamilyen heurisztikus módszerrel.

A másik példánk az elemi részek megfigyelésére vonatkozik. Tegyük fel, hogy valamilyen részecske impulzusát szeretnénk megmérni, de a detektorban (fotoemulzióban, ködkamrában stb.) kapott nyomnak csak egy síkra való vetületét tudjuk megfigyelni.³ Mivel a részecske impulzusának irány szerinti eloszlása izotróp, az i -edik megfigyelt részecske p_i vetülete egyenletes eloszlású a $[0, p]$ intervallumban, ahol p a részecske keresett impulzusa. Mindenek előtt tisztázzuk, hogy ezen mérés kiértékelése nem reguláris becslési probléma. Regulárisnak ugyanis azokat a méréseket nevezzük, amelyek likelihood-függvénye a mért mennyiségeknek olyan halmazán különbözik zérustól, amely független a becslött paraméterektől. Az adott esetben a p_i vetület likelihood-függvénye csak a $[0, p]$ intervallumban különbözik zérustól, azon kívül viszont zérus. Mivel itt éppen a p mennyiséget kívánjuk becslőni, a probléma nem reguláris. Ha ezt figyelmen kívül hagyjuk, p becslésére a reguláris problémáknál megszokott átlagot használjuk:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n},$$

ami reguláris becslések esetében fel szokott merülni. Segítségével a $\hat{p} = 2\bar{p}$ becslést kapjuk, amelynek várható értéke p . Meg lehet mutatni, hogy szórása $p(3n)^{-1/2}$. Itt visszakaptuk a reguláris becsléseknél megszokott eredményt: a becslött paraméter szórása $n^{-1/2}$ rendben tart zérushoz. Mivel azonban a probléma nem reguláris, esetleg ennél lényegesen jobb becslést is lehet találni. Vegyük ezért a mért vetületek közül a legnagyobbat: p_{\max} . Meg lehet mutatni, hogy várható értéke

$$M(p_{\max}) = \frac{np}{n+1},$$

vagyis

$$\hat{p} = \frac{n+1}{n} p_{\max}$$

a p mennyiség torzítatlan becslése.

² τ értéke Jánossy idejében 100 μs nagyságrendű volt, ami korunkban a μs -os tartományba csökkent. Így vagy úgy, de a kísérleti fizikusok hajlamosak túlfeszíteni a húrt: v_i jellegzetes értéke 1,05–1,10.

³ A modern kísérleti technikával az impulzus mindhárom komponensét meg tudjuk mérni. Így az alábbiaknak csak módszertani jelentőségük van.

$$\frac{p}{\sqrt{n(n+2)}}$$

eredményt kapjuk. Elég nagy n -re tehát a szórás $1/n$ rendben tart zérushoz, ami lényegesen gyorsabb, mint az átlagon alapuló becslés esetében.

Levonhatjuk tehát azt a következtetést, hogy nem árt a likelihood-függvény természetét alaposan megvizsgálni, mielőtt mérési eredményeink kiértékelésébe fogzánk.

Irodalom

1. L. Jánossy: *Theory and practice of the evaluation of measurements*. Oxford University Press, 1965.

NAP-TÍPUSÚ OSZCILLÁCIÓK TENGERE

Molnár László

MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Még a 2012 nyarán megrendezett Kepler asztroszeizmológiai konferenciáról, Balatonalmádiból maradt meg az emlékeimben két megjegyzés, amelyek jól jellemzik, hogy miként formálja át az űrtávcső az exobolygókról és csillagokról alkotott képünket. *Natalie Batalba*, a misszió tudományos vezetőhelyettese épp a lakhatósági zónába eső bolygójelölteket mutatta be, amikor valaki megjegyezte nekem: „Ez tiszta Star Trek!” „Az a helyzet, hogy nincsen konstans csillagunk.” – ez pedig egy kérdezz-felelek során hangzott el, majd valaki pontosított, hogy a több mint százötvenezer csillagból azért akad egy-kétszáz speciális, Am színképtípusú (erős fémvonalakat mutató, a Napnál valamivel fényesebb) csillag, amelyek a Kepler fotometriai pontossága mellett sem mutatnak fényváltozásokat.

A nagyszerű eredmények elismeréséül a NASA meg is hosszabbította a küldetést 2+2 évvel 2016-ig, egy 2014-ben esedékes felülvizsgálattal. Az elsődleges misszió 2012 novemberében véget ért, de az űrtávcső igen jó állapotban van. Két komolyabb meghibásodás történt csak: 42 CCD detektora közül kettő 2010 januárja óta nem működik, 2012 júliusában pedig az egyik giroszkópja ment tönkre. Utóbbi jelent nagyobb veszélyt a misszióra nézve, mivel így megszűnt a redundancia, a maradék háromra mindenképpen szükség van, hogy precízen a kívánt irányban tartsák a űrtávcsövet.

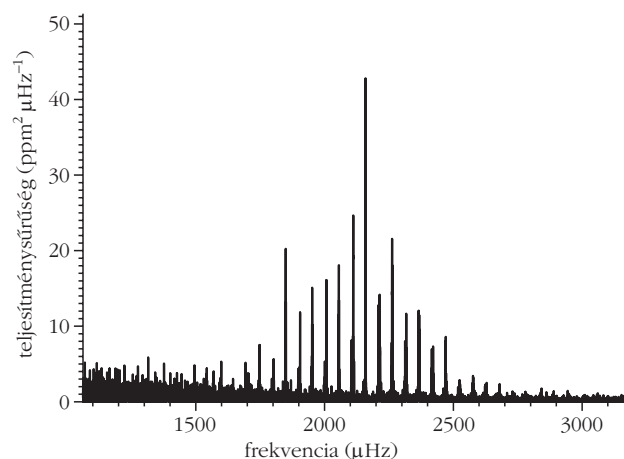
Új ablak a csillagokra

Szabó Róbert és Derekas Aliz 2011-es cikkükben már bemutatták, hogy milyen rezgések alakulhatnak ki csillagokban [1]. Míg néhány évvel ezelőttig mindössze tucatnyi csillagban sikerült Nap-típusú oszcillációkat, azaz lecsengő, de a konvektív mozgások által folyamatosan gerjesztődő rezgések kavalkádját detektálni, addig a Kepler első hónapjai alatt ez a szám ötszázra nőtt [2]. A csillagok oszcillációs spektrumainak vizsgálata számos lehetőséget nyitott: egyrészt

egyedi csillagok, különösen exobolygók anyacsillagának pontos fizikai paraméterei váltak meghatározhatóvá. A fedésből például csak a csillag és bolygó sugarainak arányát tudjuk meghatározni, de az oszcillációk modellezésével az abszolút geometriai méretet is megkapjuk a csillagra, és így a bolygóra is. Ha a tömegeket is meg tudjuk határozni valamilyen módszerrel (például radiális sebesség-méréssel, vagy több bolygó esetén a kölcsönös gravitációs hatásokból), akkor adódik a bolygó sűrűsége, ami komoly megszorítás a lehetséges összetételre. Így történt például a Kepler első kőzetbolygója, a Kepler-10b esetén is [3].

Az asztroszeizmológiai modellillesztés másik szép példája a 16 Cygni A és B kettőscsillag. A kettős mindkét tagja régóta ismert Nap-analóg: sok tekintetben, bár nem minden paraméterében hasonlít a Napra (1. ábra). Ezen csillagok összehasonlítása a mi központi égitestünkkel lehetővé teszi, hogy a Napot a Tejútrendszer egyik csillagaként is elhelyezhessük a többi között. A Kepler első három hónapnyi méréseiből 46,

1. ábra. A 16 Cygni A csillag teljesítményspektruma: a teljesítménysűrűség az oszcillációs frekvencia függvényében. Az azonos szerkezetű csúcsok ismétlődése által kirajzolt fésűszerkezet a Nap-típusú oszcillációk spektrumának fő jellemzője. Az ismétlődést az egyre növekvő n radiális kvantumszámú módusok sorozata okozza, a köztük levő távolságot nevezzük nagy szeparációnak ($\Delta\nu$) [4].

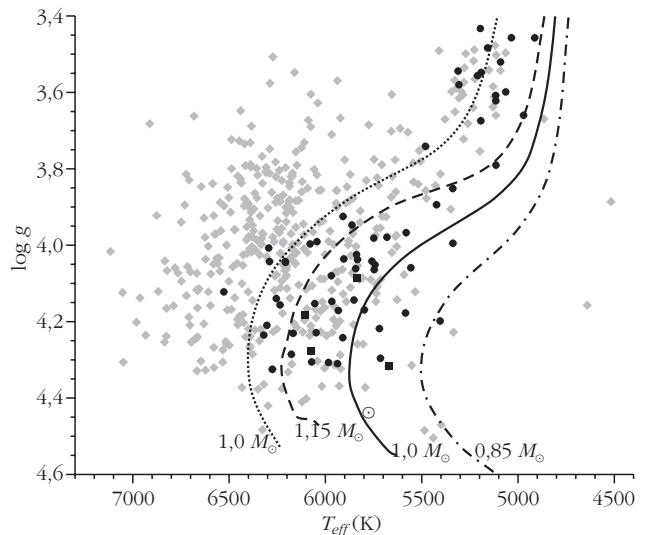


illetve 41 oszcillációs módust sikerült kimutatni a két csillagban, $l = 0-3$ közötti horizontális kvantumszámokkal [4]. Az $l = 3$ módusok detektálása bizonyítja a Kepler fotometriai pontosságát: az eleve igen kis amplitúdójú oszcillációk ebben az esetben már több, fázisban ellentétes régióra oszlanak szét a csillag felszínén, jelentősen csökkentve a csillagkorongra integrált fényváltozást. A legérdekesebb eredmény, hogy a modellillesztés során a két csillag közös tulajdonságaira, például a korukra, kémiai összetételükre nem adtak semmilyen megkötést, annak ellenére, hogy joggal tehetjük fel: ugyanakkor, ugyanabból a közös gázfelhőből alakultak ki. A modellek a függetlenség ellenére szinte ugyanazt az eredményt adták mindkettőre, a korra például $6,8 \pm 0,4$ milliárd évet, vagyis pusztán asztroszeizmológiai szemmel nézve is testvéreknek bizonyultak.

A tudományos közösség számos recepttel rendelkezik a modellek illesztésére vonatkozóan. Ezek közül az interneten is elérhető és relatíve felhasználóbarát Asteroseismic Modeling Portal (AMP, <https://amp.ucar.edu>) érdemes említésre. Az AMP kétféleképpen használható: optimalizációs módban a csillag frekvenciaspektrumából meghatározott adatokat (a detektált csúcsokhoz tartozó l kvantumszám, frekvenciaérték és hiba) kell megadni, majd ezek alapján a kód megkeresi a legjobban illeszkedő paraméterekkel (tömeg, sugár, kor és kémiai összetétel) jellemezhető csillagmodell. Direkt számítási módban pedig ennek az inverzét végzi el, a megadott globális paraméterekhez tartozó oszcillációs spektrumot számítja ki. Az AMP mellett azonban más kódokat is használnak kutatócsoportok, attól függően, hogy a szakirodalomból pontosan melyik opacitási táblázatot és a csillagokban zajló magfúzió hatékonyságát leíró reakciós rátákat használják inkább, vagy éppenséggel hogyan kezelik a konvekciót a modelljükben.

Együttes és differenciális asztroszeizmológia

Ha már rendelkezésünkre állnak több száz csillag adatai, az egyedi modellillesztések mellett statisztikai vizsgálatokra is lehetőség nyílik, együttes asztroszeizmológiát (vagy a konkurens szakkifejezés-jelölt szerint: szinasztroszeizmológiát) végezve. Az egyik első nagy eredmény a vörös óriás csillagok szétválasztása volt az energiatermelés szempontjából. Ahogy az öregedő csillagok magjában a hidrogén aránya lecsökken, a fúzió is megszűnik, illetve átvődik a magot körülvevő köpeny legaljába: ez a hidrogénhéjégés fázisa. Egy idő után viszont a mag annyira összehúzódik, hogy a hélium is fúzióba kezd, a $3 \cdot ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ reakció formájában. Bár a két energiatermelési fázis miatt ezen csillagok belső viszonyai jelentősen különböznek, a felszíni tulajdonságaik igen hasonlóak. Spektrumok alapján például nem különböztethetőek meg, problémát okozva például populációvizsgálatoknál, vagy a tömegvesztés ütemének meghatározásánál.



2. ábra. Naphoz hasonló csillagok sorozata (a felszíni gravitációs gyorsulás logaritmus az effektív hőmérséklet függvényében): a világos szürke, csúcsára állított négyzetek a teljes minta, a fekete körök tömege $1 \pm 0,15$ naptömeg közötti, a fekete négyzetek pedig, amelyekről spektroszkópiai adatokkal is rendelkezünk. A vonalak eltérő tömegű, illetve nehézelem-tartalmú csillagok elméleti fejlődési útjait mutatják. A pontok két csoportba tömörülnek, alul a fősorozati, felül az óriásági csillagok találhatók, a gyors fejlődés miatt a köztes állapotban keveset találunk. A Nap jele (kör ponttal a közepén) mutatja a hozzá tartozó pozíciót [8].

A belső szerkezet változásai miatt a mag-köpeny határ az óriáscsillagokban a korral egyre élesebb választóvonalá válik: nagy gradiens lép fel a nyomásban és a kémiai összetételben is, ami jelentősen módosíthatja az oszcillációs módusok tulajdonságait. Ennek hatására a magban terjedő g -módusok és a köpenyben terjedő p -módusok (nehézségi, illetve hanghullámok) hasonló frekvenciákra tolódhatnak el, és kölcsönhathatnak egymással, kevert módusokat létrehozva. Azok a kevert módusok pedig, amelyek a köpenyben p -domináltak, olyan kivételes helyzetben vannak, hogy információt hordoznak a magról, de a felszínt is detektálható amplitúdóval érik el. A Kepler-adatokban sikerült ilyen kevert módusokat azonosítani, és végre sikerült a hidrogénhéjat, illetve a magjukban héliumot égető csillagokat megbízhatóan szétválasztani [5–7].

A csillagok szétválogatása elvezet az együttes vizsgálatok alcsoportjának tekinthető differenciális asztroszeizmológiához, vagyis amikor a mintánkat egy közös tulajdonság alapján leszűkítjük, és az így fennmaradó csillagok különbségeit vizsgáljuk tovább. Egy ilyen lehetőség, ha kiválogatjuk az összes Nap-analóg csillagot, például a pontosan egy naptömegű példányokat. Ezek között természetesen mindenféle korú csillag felbukkan, amiket sorba rakva a csillagfejlődéssel járó szerkezeti változásokat is feltérképezhetjük és összehasonlíthatjuk az evolúciós modellek eredményeivel. Az első ilyen vizsgálat 72 csillagot azonosított és hasonlított össze a modellekkel (2. ábra). Az eredmények megerősítették, hogy a csillagok relatíve gyorsan fejlődnek át a fősorozatról az óriáságra, illetve az asztroszeizmológiai tömeg- és sugármeghatározás il-

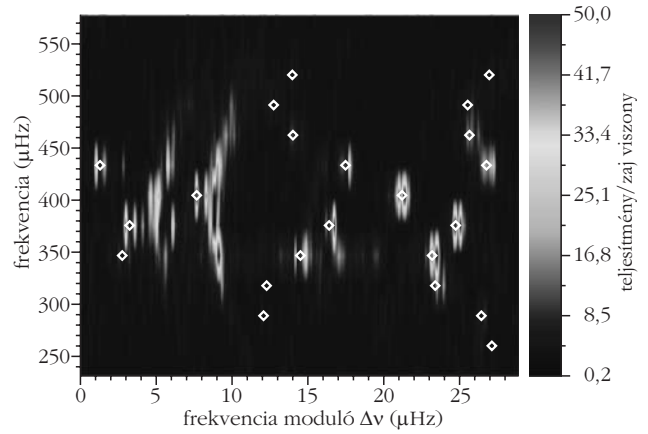
leszkedik a fejlődési modellekhez. A fő bizonytalanság ennél a vizsgálatnál a héliumnál nehezebb elemek gyakorisága (a csillagászatban ez a fémesség): a továbblépéshez szükséges lesz a csillagok pontos kémiai összetételének meghatározása spektroszkópiai vizsgálatokkal. Ha ezt a bizonytalansági tényezőt sikerül kiküszöbölni, még részletesebb összehasonlításokra lesz mód: pontosabban megismerhetjük az adott tömegű és kémiai összetételű csillagok belső szerkezetének változását a fősorozattól az óriáság felé, illetve a Napnak megfelelő és attól eltérő tömegű szekvenciák szerkezeti különbségeit is feltérképezhetjük. Ezekkel az eredményekkel pedig a csillagfejlődési modellek számos paraméterét, mint például a konvektív túllövés mértékét is pontosíthatjuk majd [8].

Rotáció és evolúció

Bár sokszor nem veszünk róla tudomást, sem a modellekben, sem az észlelések értelmezésekor, a csillagok valójában forognak. (A rotáció elhanyagolásának persze sok oka lehet, például ha túl lassú ahhoz, hogy megfigyelhető legyen, vagy érdemben befolyásoljon jelenségeket.) Azonos n radiális és l horizontális, de eltérő m azimutális kvantumszámú módusok rotáció nélkül egyetlen frekvenciaértéknél jelennek meg a Fourier-spektrumban. Viszont, ha a csillag forog, az egyetlen frekvenciacsúcs felhasad az eltérő m -eknek megfelelő $2l+1$ csúcsra – persze a megfigyelhetőség függ a forgás sebességétől és a mérési pontosságtól. De miért olyan fontos a forgás mérése? És főleg, mi nek a forgása?

A Naphoz hasonló, fősorozati csillagokban is kétféle rotáció zajlik. A konvektív köpeny differenciálisan rotál, az egyenlítőről a pólusok felé csökkenő ütemben, míg beljebb, a köpeny radiatív része és a mag szilárd testként forog. Amikor aztán a csillag elhagyja a főágot és vörös óriássá válik, a szerkezete is átalakul. A köpeny kitágul, ennek következtében a forgás lelassul. A mag összehúzódik, amíg a hélium fúziójához megfelelőek nem lesznek a körülmények, és eközben felgyorsul. Azonban valamilyen csatolásnak fenn kell maradnia a két régió között, amely viszszalassítja a mag forgását, mert amikor a csillag életének végén fehér törpeként előbukkan, már ismét lassú ütemű forgást tapasztalunk. A probléma modellezési szempontból meglehetősen bonyolult: a forgással szorosan összefügg a mágneses tér és a konvekció is, és a három jelenség (hidrodinamika, oszcillációk és mágnesség) együtt felel az impulzusmomentum-transzportért, vagy a kémiai elemek keveredéséért a csillagban. Megkötéseket a megfigyelések adhatnak, a mag forgását pedig a kevert módusok felhasadásának detektálásával mérhetjük.

Az első vizsgálatok három vörös óriás esetében azt mutatták, hogy a mag legalább tízszer gyorsabban forog, mint a csillagok felszíne, vagyis valóban létezik a megjósolt, éles gradiens a szögsebességprofilban a mag felé [9]. A kis tömegű vörös óriás KIC7341231 esetében



3. ábra. A KIC7341231 csillag echelle-diagramja: lényegében a frekvenciaspektrum felszeletelve a nagy szeparáció modulója szerint, és az egyes szeletek egymás fölé helyezve. A modellekből származó értékeket a négyszögek jelzik: jól látható, hogy a mag gyors rotációja miatt az $l = 1$ kevert módusokhoz tartozó csúcsok felhasadnak két tagra [10].

a rotációs felhasadások alapján a mag forgási periódusa 16,3 nap, míg a felszín 77 napnál lassabban fordul körbe, vagyis legalább ötszörös a különbség (3. ábra) [10]. A KIC5365621 esetén pedig még élesebb, legalább hússzoros [11]. Furcsa, hogy míg ezekben a szinte véletlenszerűen választott vörös óriásokban a forgási periódust ilyen mélyen, a sugár 1-2 százalékánál meg tudjuk határozni, addig, kevert módusok hiányában, a Nap négyötödénél nem jutottunk még beljebb.

Végül pedig háromszáz vörös óriás adatainak elemzéséből további következtetéseket lehetett levonni. A vörös óriás ágon található csillagok magja átlagosan gyorsabban forog, mint az idősebb, vörös kupacbeli (red clump – fémekben gazdag, héliumégető csillagok helye a Hertzsprung–Russell-diagramon) társaiké, de mindkét esetben egyértelmű gradiens található a rotációs profilban. Vagyis valóban zajlanak a magból a köpeny felé impulzusmomentumot szállító folyamatok a csillagokban, de nem elég erősek ahhoz, hogy ezen az időskálán teljesen kiegyenlítsék a különbséget [12].

De igaz-e?

Mint láthattuk, az asztroszeizmológiai vizsgálatok egészen példátlan részleteket tudtak felfedni, mind egyedi csillagok esetében, mind pedig összehasonlító vizsgálatok során. Felmerül azonban a kérdés, hogy ezek az eredmények mennyire konzisztensek, mekkora szisztematikus hibával terheltek. Ennek kiderítésére a CoRoT és Kepler által megfigyelt, fényes (6-7 magnitúdós) csillagokról interferometrikus mérések készültek. A Mt. Wilsonon található CHARA távcsőrendszer, és annak PAVO nevű interferométere segítségével mérték meg 10 csillag szögátmérőjét. Ezekre a csillagokra pontos parallaxismérések is rendelkezésünkre állnak, a Hipparcos műholdnak hála, így lineáris méretük, a bolometrikus fluxus becsülésével pedig a felszíni hőmérsékletük meghatározható, és összehasonlítható az astrometriai eredményekkel.

Az összehasonlítás fényes eredményekkel zárult: az asztroszeizmológiai modellillesztéssel kapott sugár- és hőmérsékletadatok minden csillagra hibán belül megegyeztek az interferometrikus eredményekkel [13]. Azért is fontos eredmény ez, mert az asztroszeizmológiai összefüggések és modellek jelentős részben a Napról szerzett ismereteinken alapulnak, onnan vannak extrapolálva, és folyamatos vizsgálat tárgya, hogy ezek mennyire skálázhatók más csillagokra, egészen a vörös óriásokig. Elméleti megfontolások alapján például a legnagyobb teljesítményű frekvenciacsúcs (v_{\max}), vagy a csúcsok közötti nagy szeparáció értéke ($\Delta v = v_{n,l} - v_{n,l-1}$) a következők szerint skálázódik:

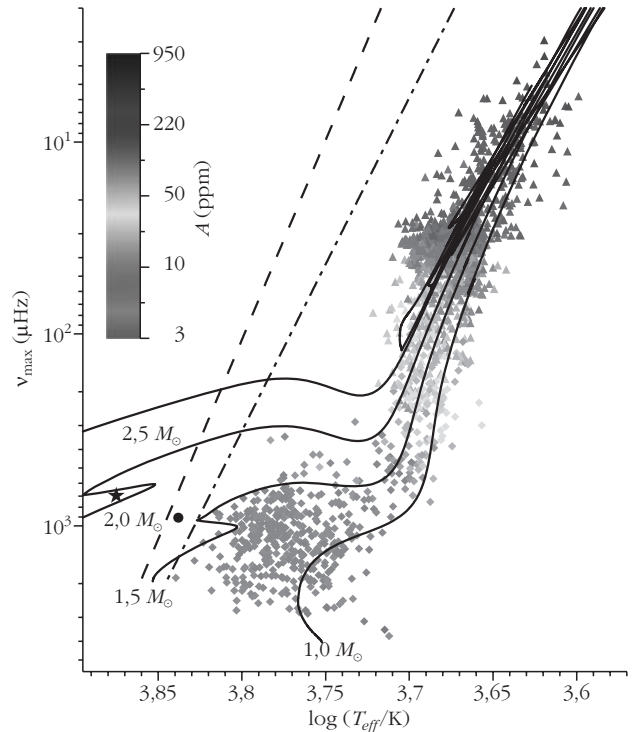
$$v_{\max} \approx \frac{M}{M_{\text{Nap}}} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff,Nap}}} \right)^{3,5} \frac{L}{L_{\text{Nap}}} v_{\max, \text{Nap}},$$

$$\Delta v \approx \left(\frac{M}{M_{\text{Nap}}} \right)^{0,5} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff,Nap}}} \right)^3 \left(\frac{L}{L_{\text{Nap}}} \right)^{0,75} \Delta v_{\text{Nap}}.$$

Hasonlóképpen az amplitúdók is skálázhatóak egy $A \sim L^s/M^t$ arányosság szerint [14]. Csillagfejlődési modellek és a Kepler által megfigyelt csillagok adatainak összehasonlításával már igazolták, hogy a skálázási összefüggések megfelelőek, de az evolúciós modellek szintén tartalmazhatnak bizonytalanságokat. Az interferometrikus mérésekkel viszont kvázi függetlenül sikerült bizonyítani, hogy az asztroszeizmológiai eredmények igen pontosak: a csillagok sugárára például mindössze néhány százaléknyi eltérés adódott. A legnagyobb differenciát egy fémgazdag, fősorozati csillagnál találták, de ott is a csillagfejlődési modellek voltak leginkább problémái, az interferometrikus és asztroszeizmológiai illesztések közel voltak egymáshoz. Ez a vizsgálat tehát újabb igazolása annak, hogy a Nap-típusú oszcillációk modellezése igen hatékony eljárás a csillagok és ezen keresztül a körülöttük keringő bolygók jellemzőinek meghatározására.

Két világ között

A Nap-típusú oszcillációkat mutató csillagokat hagyományosan nem sorolják a pulzáló változók közé: míg előbbieken a konvekció által sztochasztikusan gerjesztett, csillapodó rezgések kavalkádját látjuk, a pulzáló csillagokban általában kevesebb, de nagyobb amplitúdójú instabil módus jelenik meg, amelyeket általában a kappa-mechanizmus (az anyag opacitásának hőmérsékletfüggése) hajt a csillagok részleges ionizációs zónáiban. A két jelenség együttes fellépéséhez speciális körülményekre van szükség.



4. ábra. Együttes asztroszeizmológia: 1686+1 csillag adatai egy ábrán. A legnagyobb amplitúdójú oszcillációs csúcs frekvenciája (v_{\max}) van ábrázolva az effektív hőmérséklet függvényében, mindkét mennyiség úgy skálázva, hogy a Hertzsprung–Russell-diagramra jellemző szerkezet megmaradjon (alul a fősorozati, feljebb az óriásági csillagok). A szükességi kód a v_{\max} csúcs amplitúdóját jelzi. A folytonos vonalak fejlődési utak, a két szaggatott és a fekete pont a δ Scuti instabilitási sáv vörös szélének különböző meghatározásai. A fekete csillag a pulzációt és Nap típusú oszcillációkat is mutató HD 187547 helyét jelzi [14].

Az oszcillációk a konvektív köpenyben alakulnak ki, a köpeny pedig eltérő arányban van jelen különböző méretű, fősorozati csillagokban: a vörös törpék teljesen konvektívek, míg a Napnál nagyobb tömegű csillagokban egyre vékonyabb lesz ez a külső réteg, és végül 2 naptömeg és A színeképtípus táján a csillag sugárához képest már csak 1% körüli. Ezt idáig csak elméleti megfontolások alapján lehetett kijelenteni, de az űrfotométerek eljövételével erre egyre pontosabb megfigyeléseket is kaphatunk. Két jelenséget is sikerült megfigyelni A típusú csillagokban, amelyek egyértelműen a konvekció jelenlétére utalnak. 2010-ben két, a francia CoRoT űrtávcső által megfigyelt, A2 színeképtípusú delta Scuti csillagban detektáltak granulációt, vagyis a csillag felszínét elérő, folyton cserélődő konvektív cellák okozta mintázatok jelét [15]. 2011-ben pedig a Kepler űrtávcső egyik delta Scuti csillagánál, a HD 187547-nél sikerült a pulzációval egyidejűleg Nap-típusú oszcillációkat is megfigyelni. Ehhez 100 mikromagnitúdónál is kisebb fényváltozások detektálására volt szükség! A megfigyelések alapján ezekben a forró csillagokban is kialakulhat még 1%-nyi konvektív réteg, amelyben hatékony konvektív mozgások zajlanak [16]. Az úgy azonban még nincs lezárva: a Balatonalmádban tartott konferencián bemutatott újabb adatok alapján nem biztos, hogy az észlelt jelek „szimpla” Nap-típusú oszcillációk – kérdés viszont, hogy akkor mi okozhatja őket.

A Kepler mellett és után

A Nap-típusú oszcillációk megfigyelése új ablakot nyitott a csillagokra: belső szerkezetük olyan finom részleteit is megismerhetjük, amelyekre idáig legfeljebb homályos tippjeink lehettek. De nemcsak a minőség, hanem a mennyiség is új lehetőségeket adott, hiszen immár több száz csillag adatait lehet összehasonlítani. Az ilyen mérésekhez természetesen extrém pontosságra van szükség, de ez a közeljövőben biztosítva lesz: bár a CoRoT a jelek szerint 2012 végére végleg meghibásodott, a Kepler és az apró, kanadai MOST miniűrtávcső továbbra is üzemel. Idén csatlakozott hozzájuk két nanoműhold az ausztriai BRITe-Constellation program keretében, amelyek az űrtávcsövek között új rekordot állítottak fel: lepipálva az eddigi legkisebb, változócsillagok megfigyelésére használt űreszközt, a WIRE műhold 5 cm-es csillagkövető kameráját: a két BRITe mindössze 3 cm-es átmérőjű optikával van felszerelve. Ezek segítségével az ég 534 legfényesebb csillagát tudják megfigyelni, egyszerre két optikai sávban is. Hasonlóan apró eszköznek tervezik az ExoplanetSat műholdat, ami a CubeSat platformot fogja használni, ugyanazt, mint a magyar Masat-1. A három 10 cm-es élhosszúságú kockából álló műholdba egy 85 mm-es objektív fér be, amellyel a legfényesebb csillagok körül fognak exobolygókat keresni. Egyik űrtávcsőnek sem a Nap-típusú oszcillációk megfigyelése lesz a fő célja, ám vélhetően mindkettő tudományos programjában jelen lesz ez a feladat is.

Az űr mellett a földfelszíni lehetőségek is bővülnek: a tervek szerint néhány hónapon belül beindul a SONG első távcsöve (5. ábra). A SONG (Stellar Observations Network Group) a tervek szerint nyolc darab, egy méteres tükörrel szerelt robottávcső hálózata lesz, amelyek közül négy-négy az északi és déli féltekén fog elhelyezkedni a bolygó négy eltérő földrajzi hosszúságú pontján, hogy legalább az egyik felett éppen éjszaka legyen. Így biztosítható, hogy az űrtávcsövekhez hasonlóan közel folyamatos megfigyeléseket végezzenek. Az űrbéli eszközökkel ellentétben azonban nemcsak



5. ábra. Pillanatkép a tenerifei SONG távcsövet mutató webkamera felvételéből. A spektrográf a távcsőtől külön, a kupolához kapcsolódó kiszolgálóépületben kapott helyet. A robottávcsőnek saját meteorológiai műszerei is vannak az épületen álló árbocon elhelyezve.

fotometriára, hanem nagyfelbontású spektroszkópiára is használni fogják a távcsöveket. Ez egyrészt az asztroszeizmológiai vizsgálatokhoz is fontos, másrészt exobolygók keresésére is alkalmas lesz, a radiálissebességmérési módszer által. Az első SONG távcső Tenerifén kapott helyet: a következő példány pedig már épül Kínában, hogy a csillagokra nyitott új ablakunk még sokáig szolgálhasson minket új információkkal.

Irodalom

1. Szabó R., Derekas A., *Fizikai Szemle* 61 (2011) 222.
2. W. J. Chaplin, H. Kjeldsen, et al., *Science* 332 (2011) 213.
3. N. Batalha, W. J. Borucki, et al., *ApJ* 729 (2011) 27.
4. T. S. Metcalfe, W. J. Chaplin, et al., *ApJ* 748 (2012) L10.
5. P. G. Beck, T. R. Bedding, et al., *Science* 332 (2011) 205.
6. T. R. Bedding, B. Mosser, et al., *Nature* 471 (2011) 608.
7. M. P. Di Mauro, D. Cardini, et al., *MNRAS* 415 (2011) 3783.
8. V. Silva Aguirre, W. J. Chaplin, et al., *ApJ* 740 (2011) L2.
9. P. Beck, J. Montalbán, et al., *Nature* 481 (2012) 55.
10. S. Deheuvels, R. A. Garcia, et al., *ApJ* 756 (2012) 19.
11. M. J. Goupil, B. Mosser, et al., *A&A* 549 (2013) 75.
12. B. Mosser, M. J. Goupil, et al., *A&A* 548 (2012) 10.
13. D. Huber, M. J. Ireland, Bedding, et al., *ApJ* 760 (2012) 32.
14. D. Huber, T. R. Bedding, et al., *ApJ* 743 (2011) 143.
15. T. Kallinger, J. M. Matthews, *ApJ* 711 (2010) L35.
16. V. Antoci, G. Handler, et al., *Nature* 477 (2011) 570.

Jobb egy mentőötlet mint öt mentő egylet

– írta Karinthy Frigyes az egyletistápolás margójára.

Most Társulatunknak lenne szüksége
egyletmentő ötletekre!



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



LEHETSÉGES MEGOLDÁSOK AZ ATOMENERGIA-IPAR JELENLEGI PROBLÉMÁIRA

I. rész – A sóolvadékreaktor

Király Márton
Budapest

A Földön kitermelhető fosszilis energiaforrások biztosítják az energiaigény közel 80%-át. A világon naponként 18 millió tonna kőszén, 15 millió m³ kőolaj és 3 milliárd m³ földgázt termelnek ki [1]. A felhasználás helyétől messze található az energiahordozó-készletek. A jelenlegi becslések szerint a növekvő igény figyelembe vételével a jelenlegi kőolaj kitermelés 40-60 évig, a földgázkitermelés 60-100 évig, a kőszénfejtés pedig mintegy 150-200 évig folytatható. A kitermelés mennyisége azonban idővel csökkenni fog, nem tud lépést tartani a meredeken növekvő fogyasztással, ötven éven belül tehát súlyos, globális méretű energiaválsággal kell szembenéznünk. A válság elkerülésére olyan megoldási javaslatok születtek, mint a korlátozás, a kiváltás megújuló forrásokkal, azonban ezek egyike sem csökkentette jelentősen a hagyományos tüzelőanyagok használatát.

Az atomenergia múltja

Bár az atommagkutatók első jelentős eredményeit katonai célokra használták, az 1960-as évektől az atomenergia békés célú felhasználása került előtérbe. Több atomerőmű-típust fejlesztettek ki és kerültek ezek kereskedelmi forgalomba. A legelterjedtebb konstrukciók a PWR (Pressurized Water Reactor), BWR (Boiling Water Reactor) és a CANDU (CANada Deuterium Uranium) voltak, vagyis rendre a nyomottvízes, a forralóvízes és a nehézvízes reaktorok. Ezek adják a ma működő reaktorok nagy részét is. Ekkoriban úgy gondolták, hogy az atomenergia megfelelően biztonságos, hatékony és kiadhatatlan energiaforrás lesz a következő évszázadokra.

Ma a világ több mint 30 országában működnek atomerőművek. Egy atomerőmű beruházási költségei óriásiak, de a fenntartási és üzemeltetési költségek alacsonyak, így viszonylag olcsón termelhető elektromos energia. Általában állami beruházások és banki befektetések finanszírozzák a telepítési költségek harmadát, a többi hosszú távú kölcsönszerződés, 10-20 évre, változó kamattal. A telepítés átlagos költsége új nyomottvízes erőmű létrehozása esetén 2000-4000 \$/kW, tehát a Magyarországra telepítendő 1 GWe teljesítményű III+ generációs atomerőmű 2-4 milliárd dollár értékű beruházás árán valósulna meg. Ezeknél a zónaszerűlés várható valószínűsége 10⁻⁶/év, 50-60 éves üzemidőre tervezettek, termodinamikai határfokuk – elsősorban a megnövelt göznyomásnak köszönhetően – 33-37% közötti.

Nukleáris energiatermelésről lévén szó fontos megemlíteni a közvélemény és a média szerepét. A nukleáris technológia elmúlt mintegy 70 éve alatt sok

esemény befolyásolta negatívan az atomenergia elfogadottságát. Történt néhány súlyosnak ítélt baleset a működő atomerőművekben, amelyek megrendítették a közvélemény bizalmát. Az 1986-os csernobili katasztrófa után az atomerőművektől való félelem oda vezetett, hogy világszerte gyakorlatilag leállt a reaktorok építése. Néhány ország még a teljes kivonulás lehetőségét is felvetette. Az 1990-es évektől kezdődően elszórtan egy-egy atomerőmű épült, némelyiket az átadás előtti hónapokban kellett felszámolni. Az atomenergia bizalmi válságba jutott.

A 2010. március 11-i Tōhoku-földrendés és az azt követő szökőár mintegy 15 000 áldozatot követelt. A Fukushima prefektúrában található Fukushima Daiichi atomerőművet egy órával a földrendés után 10 métert meghaladó cunami sújtotta. Ez ismét súlyos atomerőmű-balesethez vezetett, amelyről – többek közt – e lap hasábjain is részletes beszámoló jelent meg [2].

A nyugati hírekben a földrendés napján még a szökőár által okozott károkról és az áldozatok lehetséges számáról lehetett hallani, másnapra azonban megváltozott a helyzet. Az éjszaka folyamán beékezt hírek, amelyek szerint a TEPCO közleményben ismerte el az egyik japán erőmű meghibásodását és kis mennyiségű radioaktív anyag kibocsátását a környezetbe, arra készítették a nyugati újságírókat, hogy elővegyék a Csernobil óta alig használt félelmet keltő szavakat, mint a sugárzás, zónaolvadás, radioaktív kibocsátás, nukleáris baleset, atomkatasztrófa, kitelepítés és halálzóna. Ezek egytől-egyig megjelentek mind a hazai, mind más európai hírekben, felnagyítva, közel hozva a több ezer kilométerre történeteket és elhítelve, hogy a Japánban történt kibocsátás egészségügyi kockázatot jelent a világ egészére. A fukushimai baleset jó példa arra, hogy egy lokális baleset a média által felnagyítva és a közvéleményt feltűzelve hogyan indíthat el atomerőmű-ellenes fellángolásokat világszerte.

Mindez mutatja, hogy az atomenergia megítélése a mai napig igen kedvezőtlen, és ez adott esetben nyomást tud gyakorolni a politikai vezetőkre és egyes országok energetikai iparára, ahogy Németországban történt. Ott kijelentették, hogy a ma még működő atomerőműveiket 2022-ig leállítják és más energiahordozót fognak alkalmazni. Az elhatározott energiastratégia előre láthatólag mintegy 240 milliárd eurós beruházást kíván a következő tíz évben, 370 millió tonna többlet CO₂ kibocsátással jár és az ország addig is jelentős elektromosenergia-importra szorul [3]. A 2011-es olasz népszavazás eredményeképpen az 1990-ben leállított atomerőművek helyett nem építhetnek újakat, így Olaszország továbbra is import földgázból fedezi szükségleteit. Az atomenergiát ki-

váltani pedig nem könnyű, mivel nincs még egy ilyen kis fenntartási költséggel üzemelő, ilyen nagy energiasűrűségű és CO₂-semleges energetikai technológia.

Atomenergia a közeljövőben

Manapság – a növekvő energiaigény és a működő erőművek elöregedése miatt – egyre több országban, köztük hazánkban is újra felvetik az atomenergia alkalmazását a fosszilis erőművekkel szemben. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának globális következményei lassan beszivárogtak a köztudatba. A globális felmelegedés okait tekintve a jelenlegi álláspont szerint a természetes és a mesterséges kibocsátások egyaránt felelősek a klímaváltozásért. A Kyotói Egyezmény keretében a fejlett államok kötelezték magukat a CO₂ kibocsátásuk korlátozására. A kormányok először CO₂ kvótát határoztak meg, jelenleg pedig adó kivétését tervezik a CO₂ kibocsátással járó tevékenységekre, elsősorban szénttartalmú fosszilis tüzelőanyagok égetésére. Ez jelenleg is fokozottan érinti az egyre dráguló fosszilis tüzelőanyagokon alapuló áramtermelést. Ezek mind a nem fosszilis energiatermelés felé billentenék a gazdaságot, azonban egy atomerőmű építése hihetetlen mértékben megdrágult.

A manapság kereskedelmielg elérhető atomerőmű-típusok jó része a III+ generációba tartozik. Ezek III. generációs reaktorok továbbfejlesztései, méretnövelései, rendszerint 1000 MW fölötti elektromos teljesítménnyel. Az új technológiák nagyobb kapacitással és elképesztően összetett irányítási és biztonsági rendszerek segítségével próbálják a befektetők bizalmát ismét elnyerni. Egy ilyen reaktor beruházási költsége azonban több milliárd dollárra rúg, amely évente mintegy 5-10%-kal nő. A nagy gyártók tökéletesen egyeduralgokká váltak, sok kisvállalkozás nem élte túl a hosszú recesszív időszakot. A nagy gyártók azonban a fűtőelem-utánpótlásra és a más területekre irányuló kereskedelmi beruházások révén folyamatosan nyereségesek maradtak. Egy adott gyártó által épített atomerőmű gyakorlatilag csak a gyártó üzemanyag-kazettáit tudja felhasználni, mivel szinte minden típus különbözőt használ. Az évek során nagyon sok fajta kazettaelrendezést fejlesztettek ki, az üzemanyaggyártók pedig ehhez alkalmazkodnak. Az atomerőművek – a megvalósítást tekintve – jelentősen eltérnek egymástól, a különböző gyártók hasonló reaktorai, továbbá minden erőmű a helyi sajátságoknak és kéréseknek megfelelően egyedül. A világon összesen négy cég van (a Japan Steel Works, a China First Heavy Industries, az orosz OMZ Izhora és a koreai Doosan Heavy Industries), akik 1000 MWe vagy annál nagyobb PWR-ekhez reaktortartályt tudnak gyártani. Ez erősen korlátozza az évente építhető reaktorkapacitást.

Fukushimát követően a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség jelezte, hogy a 2035-ig előre jelezhetően épülő reaktorok száma megfelelő. Az 1950-es évek óta előre jelzett nukleáris fellendülés napja leáldozóban van. Nő a bizalmatlanság a népesség, a befektetők, az

államok és a gyártók részéről egyaránt. A jelenlegi helyzetben a vizet használó, továbbfejlesztett technológiák nem tudják hatékonyan orvosolni az iparág gondjait. Szükségessé vált tehát az atomenergia-ipar újjászülése, amely teret nyithat új elképzeléseknek és forradalmi újításoknak, egy új, biztonságosabb, fenntartható és hatékony nukleáris energiatermelés felé.

A fejlődés irányai, a IV. generációs reaktorok

A IV. generációs elképzelések a nukleáris technológiák újragondolását, hatékonyabbá tételét tűzték ki maguk elé. A magas hőmérséklettel operáló elgondolások a nagyobb termodinamikai hatásfok elérésére és kapcsolt energiatermelésre is alkalmassá teszik a reaktorokat [4]. Egy magas hőmérsékletű reaktor olcsó hőforrásként szolgálhat különböző energia-átalakító műveletekhez mint:

- vízbontás termokémiai úton, jód-kén ciklus, réz-klor ciklus,
- másodlagos, CO₂-semleges üzemanyagok gyártása hidrogén felhasználásával (metanol, dimetil-éter, etanol, ammónia, metán),
- nitrogénmegkötéses műtrágyagyártás,
- termikus depolimerizáció, műanyag-feldolgozás,
- tengervíz sótalanítás, új termőterületek létrehozása.

A világon jelenleg több száz kis és közepes kísérleti reaktort terveznek, építenek vagy üzemeltetnek [5]. Ezek jó része az eddigi technológiák fejlesztéséből, továbbgondolásából származnak, akadnak azonban az eddigi hagyománnyal szakító, forradalmian új ötletek is. A 2000-ben felvázolt negyedik generációs reaktorok még csak a tervezőasztalon léteznek, de bizonyos alapvető előnyök így is felmerülnek.

A reaktortípusok alapvetően két kategóriába sorolhatók: a termikus, vagyis lassú neutronokkal üzemelő, víz, nehésvíz vagy grafit által moderált reaktorokhoz, illetve a gyors neutronokkal működő tenyésztőreaktorokhoz. A IV. generációs elképzelések közül három termikus (magas hőmérsékletű, szuperkritikus vízhűtésű és a sóolvadékos reaktor) három pedig gyors neutronokkal működik (hélium-, nátrium- és ólom-bizmut hűtésű gyorsreaktorok). Ezek a tervezett reaktorok a ma elérhető technológiai háttér, a precíziós mérőberendezések és új műszaki anyagok felhasználásával igyekeznek megvalósítani a hatékonyabb, kevesebb hulladékot termelő, a jelenlegi hulladékot újrahasznosító, biztonságosabb és olcsóbban megépíthető atomerőművek új generációját. Jelen írás további részében a sóolvadékos technológia történetét és elért eredményeit részletezem.

MSR – A sóolvadékos reaktor

Ezt a reaktortípust az amerikai Oak Ridge National Laboratory (ORNL) által vezetett Sóolvadékos Reaktor Kísérlet (Molten Salt Reactor Experiment) során fej-

lesztették ki az 1960-as években [6]. Léteznek elképzelések, amelyek a sóolvadékot szilárd üzemanyag hőjének elvezetésére használnák, de az elterjedtebb koncepció szerint a sóolvadékos reaktorokban a primer körű hűtőközegben, a fluorid-alapú sóolvadékokban oldva található meg maga az urán-tetrafluorid (UF_4) üzemanyag, a reaktor pedig lassított, termikus neutronokkal működik. A sóolvadék nagy előnye, hogy így közvetlen a hőátadás, nem falon keresztül kell a hőt a rossz hővezető kerámiatöltetű burkolaton keresztül átvezetni a hűtőközegig. Másik alapvető jó tulajdonsága az atmoszférikus nyomáson elérhető magas hőmérséklet, amellyel magasabb átalakítási hatások érhetőek el, vagy kapcsolt energiatermelésre teszi alkalmassá a reaktort.

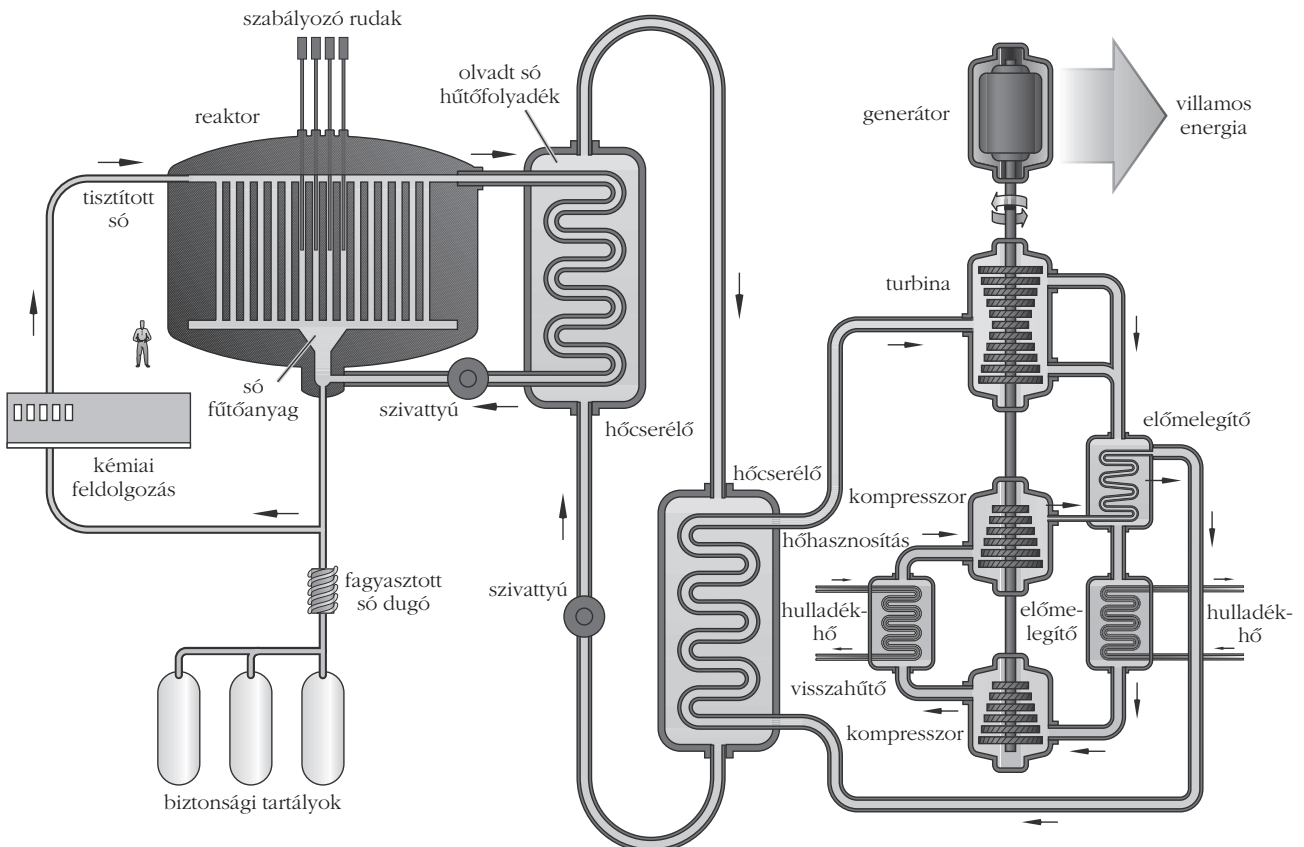
Az MSR története

Egy olvadt sóval, mint üzemanyaggal működő reaktor koncepcióját Wigner Jenő vetette fel 1945-ben. Az ötlet szerint közvetlen hőátadást kellene megvalósítani a hasadóanyag és a hűtőközeg között. Az első sóolvadékos erőmű tervét Wigner Jenő barátjával, Alvin Weinberggel közösen 1947-ben jelentette meg, az első jelentősebb kutatás-fejlesztés azonban csak 1954-ben indult. Az Amerikai Légierő egy kis méretű, repülőgépek üzemeltetéséhez használható reaktor megalkotását kérte az ORNL-től (Aircraft Nuclear Propulsion, ANP), ugyanekkor Alvin Weinberget tették meg a kutatóintézet igazgatójának. A program si-

kerrel zárult 1959-ben, megalkotva a világ első sóolvadékkal működő reaktorát, amely közel 900 °C-os hőmérsékleten üzemelve mai napig hőmérsékleti csúcstartó [7].

A sóolvadékosreaktor-kísérlet (Molten Salt Reactor Experiment, MSRE) az ANP eredményeit szem előtt tartva 1960-ban indult Oak Ridge-ben. Több száz kutató végzett számításokat, tervezte, építette a reaktort és vetett fel megoldandó kérdéseket a radikálisan új, addig ismeretlen technológiával kapcsolatban. Ennek során egy olyan, olvadt fluoridokból álló elegyben oldott urán felhasználásával működő reaktor megalkotása volt a cél, amely képes lakossági villamosenergia-termelésre és biztonságtechnikai vonásai merőben eltérnek a szilárd üzemanyagú reaktoroktól. A kutatás kezdeti, tervező szakasza 1962-ig tartott, majd elkezdődött az újonnan létrehozott ötvözetek kipróbálása és a tervezett berendezések elemeinek legyártása. 1965 június 1-jén lett kritikus a reaktor, amely ekkor 0,3 mol% $^{235}UF_4$, 0,6 mol% $^{238}UF_4$, 5 mol% ZrF_4 , 29 mol% BeF_2 és 65 mol% 7LiF összetételű olvadt sóval működött, teljes víz- és levegőkizárással a rendszerből. Azért kellett a lítium 7-es izotópját használni, mert a 6-os tömegszámú enyhén neutronelnyelő. A teljesítményt fokozatosan növelték, a maximális teljesítményt (7,7 MW hőteljesítmény) 1966 májusára érték el. A primer kör egy szekunder sóolvadékkal cserélt hőt, amely $NaF-NaBF_4$ összetételű volt. Ezt a termelő hőt elvezették a reaktorból és egy léghűtőben a rajta átáramló levegőnek, a környe-

1. ábra. A sóolvadékos reaktor vázlatja [9].



zetnek adta át. A primer és a szekunder kör is leállás esetén passzívan lecsapolható, a grafit moderátortól elvezethető volt. Erre találták ki a „freeze plug”, vagyis a „fagyott dugó” rendszert. A sóolvadék útja a lecsapoló tartályok felé nyitva volt, szerelvény nélküli csövekkel közvetlen összeköttetésben álltak a tartályokkal, azonban a cső egy pontját kívülről hűtötték. Azon a ponton a só megfagyott, megszilárdult és dugót képezett. Leállás, áramszünet vagy üzemzavar esetén a hűtés megszűnt, a dugó felolvadt és az olvadék a gravitáció által a tartályokba folyt. A sóolvadék ilyenkor több, passzívan hűtött tartályba folyt át, ahol az olvadáspontja alá hűlve megdermedt és így teljesen elszigetelhető volt.

Több hosszabb folyamatos üzem után 1967 szeptembere és 1968 márciusa között a reaktor hat hónapig át működött 5-8 MW teljesítménnyel, terv szerint, 3840 órán át folyamatosan kritikus állapotban. A körülálló sóolvadék más paramétereit, összetételét ez alatt nem változtatták, a jelen lévő urán mennyiségét folyamatos mérésrel és beadagolással tartották állandón. Az utántöltés szintén nem jelentett gondot, mivel ez mindössze néhány gramm urán-fluorid hozzáadását jelentette az elegyhez, amely azonnal elolvadt és elkeveredett. Ez a kísérleti reaktor tehát hagyományos üzemanyagot (^{235}U) használt, újdonságot csupán a folyékony fluorid sóban való oldás és az új típusú reaktor jelentett. Ezzel a kísérlettel sikerült igazolni a technológia megvalósíthatóságát, biztonságosságát és nagyon sok tapasztalatra tettek szert a reaktorfizikai paraméterekkel és az üzemeltetéssel kapcsolatban.

A kísérlet végeztével a teljes uránmennyiséget kivonták fluorinálással, vagyis fluorgáz átáramoltatásával. Ekkor a sóolvadékban található UF_4 -ból UF_6 gáz keletkezik, amely könnyen elválasztható a sótól. 221 kg uránt sikerült így kinyerni hat nap alatt, mely a teljes mennyiség mintegy 99,5%-át jelentette.

1968 októberében a hordozó sóhoz, a $^7\text{LiF-BeF}_2$ elegyhez $^{235}\text{UF}_4$ -ot adtak, majd a reaktort újraindították, így ez lett a világ első kizárólag ^{235}U üzemanyaggal működő reaktora. Stabil üzemelést értek el, amely jól illeszkedett a számított előrejelzésekhez.

1969 szeptemberében $^{239}\text{PuF}_3$ -ot adtak a sóolvadék-elegyhez, így vizsgálva annak hatását és üzemanyagként való alkalmazhatóságát. Ezen vizsgálatok bebizonyították, hogy sikerrel alkalmazható a plutónium dúsított ^{235}U mellett [8].

Általánosságban elmondható, hogy a sóolvadékos reaktorban a primer körű hűtőközegben, a fluorid-alapú sóolvadékban oldva található meg az üzemanyag (1. ábra). A sóban oldott $^{235}\text{UF}_4$ kémiaiilag stabil. A maghasadáshoz a ma elterjedt reaktorokhoz hasonlóan termikus neutronokra van szükség. A hasadási reakcióban keletkező neutronokat le kell lassítani moderátor közeg segítségével. Erre a célra grafit-tömbök szolgálnak, amelyek között kialakított csatornában folyik a sóolvadék. Az üzemanyag csak a grafit-tömbök között lehet kritikus, mivel a só önmagában nem alkalmas moderátornak. A grafitot elhagyó olvadék ezután egy szeparátorba kerül, ahol hélium bubo-

1. táblázat

Reaktorokban alkalmazható hővezető közegek fizikai paramétereit [10]

fizikai paraméterek	Na	66% ^7LiF - 34% BeF_2	H_2O
olvadáspont ($^\circ\text{C}$)	97	455	0
üzemi hőmérséklet ($^\circ\text{C}$)	500	700	320
üzemi nyomás (MPa)	0,1	0,1	12
fajhő (kJ/kg $^\circ\text{C}$)	1,3	2,34	5,62
sűrűség (kg/m 3)	841,3	2050	720
hővezetési tényező (W/m $^\circ\text{C}$)	66,8	1	0,558
dinamikai viszkozitás (cP)	2,21	5,6	0,087

ról át rajta és eltávolítja a gáz halmazállapotú hasadási termékeket, köztük a nemesgáz kripton és a ^{135}Xe reaktormérget. Ugyanitt leválasztják a sóból kicsapódó, főként hasadási terméként keletkező fémeket, amelyek nem alkotnak fluoridot. Az olvadék tovább haladva egy hőcserélőbe kerül, ahol energiáját egy szekunder sóolvadékos körnek adja át, majd a szivattyú után visszakerül a grafitos aktív zónába.

Sóolvadékokat jelenleg is előszeretettel alkalmaznak különböző területeken, például fémek hőkezelésénél és hőtartó közegként naperőművekben. Magas olvadáspont, közepes hőkapacitás, 2 g/cm 3 sűrűség, vízszerű hővezetés, nagy viszkozitás jellemző rájuk. Mivel tenziójuk kicsi, így alacsony, atomszférikus nyomáson lehet velük dolgozni, hátrányuk hogy általában igen korrozívak. Ezt a problémát a reaktortervezés korai szakaszában sikerült megoldani egy ellenálló, magas hőmérsékleten is megfelelő szilárdsággal rendelkező szuperötvözet kifejlesztésével (Hastelloy $^{\text{®}}$ N).

A legtöbb mai elképzelés szerint sóolvadékos reaktorban $^7\text{LiF-BeF}_2$ sókeverék használatát tervezik, nagyjából 66–34 m/m% arányban. Ez a keverék minimális olvadáspontú eutektikumot alkot, olvadt állapotban átlátszó, forráspontja 1400 $^\circ\text{C}$ körüli, tehát a várt üzemi hőmérséklet közelében (600–900 $^\circ\text{C}$) atomszférikus nyomásviszonyok mellett használható. Tulajdonságai alkalmassá teszik atomreaktorok primer hűtőkörében való használatra (1. táblázat).

A sóolvadékos technológia előnyei a jelenleg elterjedt reaktorokkal szemben:

- a só egyszerre folyékony üzemanyag és hőelvonó közeg, direkt hőátadás,
- nincs ^{135}Xe mérgezés, héliumos gázleválasztás és adszorpció,
- atomszférikus nyomású sóolvadék, nincs víz a rendszerben, nincs dekompresszió,
- magas üzemi hőmérséklet (600–800 $^\circ\text{C}$), magasabb átalakítási hatások ($\eta = 0,5$, Brayton-, Rankine-ciklus) vagy kapcsolt energiatermelés,
- nincs LOCA (loss of coolant accident, hűtőközeg elvesztésével járó baleset), a hűtőközeg egyben az üzemanyag is,

- on-line üzemanyag-betöltés vagy csere, nincs kizettaátrakódás,
 - passzív biztonság, csak a grafit moderátorok között van termikus neutron,
 - az üzemanyag gyorsan és biztonságosan eltávolítható grafit magból, „fagyott dugó”,
 - negatív termikus reaktivitás-visszacsatolás a só hőtágulása miatt,
 - a radioaktív hulladék fluorapatit vagy üveghulladék formában biztonságosan tárolható,
 - nincs utólagos reprocessálás, működés közbeni szeparáció lehetséges, értékes orvosi izotópok (^{99}Mo , ^{213}Bi , ^{225}Ac , ^{229}Th , ^{125}I , ^{106}Ru , ^{90}Y).
- A folytatásban a tóriumos tenyésztőreaktorok működése kerül bemutatásra.

Irodalom

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel
2. Aszódi Attila, Boros Ildikó: Az atomenergia jövője Fukushima után. *Fizikai Szemle* 62 (2012) 23–27, 46–51.
3. Cserhádi András: A leépítők – osztrák, olasz, német, svájci és japán atomenergia. *Nukleon* 2012. szeptember, http://mnt.kfki.hu/Nukleon/download.php?file=Nukleon_5_3_115_Cserhati.pdf
4. US DOE, Generation IV International Forum: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF-002-00, 2002
5. <http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR/>
6. http://en.wikipedia.org/wiki/Molten-Salt_Reactor_Experiment
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_Nuclear_Propulsion
8. M. W. Rosenthal: Molten-Salt Reactor Program Semiannual Progress Report For Period Ending February 28 1970. ORNL-4548, Oak Ridge National Laboratory (1970)
9. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Molten_Salt_Reactor_hu.svg
10. Yamaji Bogdán: *A sólvadékos reaktor és a hozzá kapcsolódó hűtőkör termohidraulikája*. Diplomamunka, BME NTI, 2002, 28.

A KUKORICA ALAPÚ BIOETANOL MAGYARORSZÁGI ELŐÁLLÍTÁSÁNAK EXERGIAELEMZÉSE

Herman Edit – egyetemi hallgató, ELTE-TTK/BME-VBK
 Kádár József – ELTE, TTK, Környezettudomány Doktori Iskola
 Martinás Katalin – ELTE TTK, Atomfizika Tanszék
 Bezegh András – Bezekon Kft., Budapest

A világ gazdasági fejlődése az energiaszükséglet növekedését hozta magával. Ezt az igényt a hagyományos, fosszilis tüzelőanyagok segítségével sokáig ki lehetett elégíteni, azonban ezek mennyisége véges. Ez a tény, valamint az, hogy a szükséges energiamennyiség jelenleg is évről-évre nő, arra készítette az embereket, hogy alternatív megoldások után nézzenek. Egyik lehetőség a szükséges energiamennyiség csökkentése (energiatakarékosság, -hatékonyság), másik pedig az egyéb energiaforrások alkalmazása. A hagyományostól eltérő energiaforrások iránti igényt a fosszilis eredetű széndioxid-kibocsátás csökkentésének szándéka is erősíti.

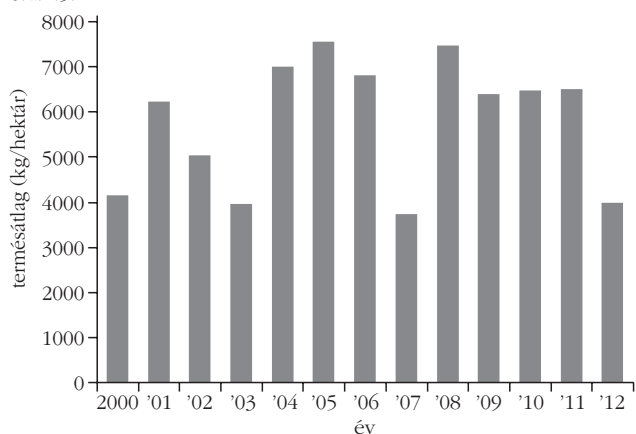
A Nap energiájának egyik közvetett hasznosítása a bioüzemanyagok felhasználása, azonban meg kell vizsgálni, hogy a használat mennyire gazdaságos. Jelen munkánkban erre teszünk kísérletet. Konkrétan megnézzük, hogy egy jelenleg már használt bioüzemanyag, a bioetanol mekkora fizikai hatékonysággal jellemezhető. E témában már számos kutatás készült, azonban a mi vizsgálatunk újnak tekinthető egyrészt a vizsgált terület, másrészt a vizsgálati módszer tekintetében.

A bioetanol szerves vegyület, valójában etilalkohol. Előállítása bármilyen növényből, növényi részből történhet, amennyiben annak van cukor- vagy más szénhidrát tartalma, a bioetanolt ugyanis leegyszerűbben a cukor erjesztésével lehet előállítani. Az, hogy végül melyik növényből készítenek bioetanolt, a gazdaságosságtól függ. Ezt jelentősen befolyásolja

egy adott terület éghajlati adottsága, mezőgazdasági fejlettsége, valamint gazdasági helyzete, támogatási rendszere. A leggyakoribb alapanyagok a cukornád, cukorrépa, kukorica, búza. Magyarországon a kukorica a legelterjedtebb alapanyag cukortartalma, valamint eltarthatósága miatt. Az éghajlati adottságok kedvezőek e növény nagy mennyiségű termesztésére, amit a növény viszonylag magas terméshozammal hálál meg (1. ábra).

A bioetanolt alapvetően autók tüzelőanyagaként hasznosítják önmagában, vagy a benzínhez különböző arányban keverve. Előnye az eredete, valamint a jobb oktánszáma, azonban jelentős hátránya a

1. ábra. Kukoricahozam Magyarországon. Forrás: KSH STADAT 6.4.1.5.



benzinnél rosszabb fűtőértéke: a tiszta etanol fűtőértéke csak 26,8 MJ/kg, szemben a benzin 43,9 MJ/kg-os értékével. Ez a hétköznapokban az autók nagyobb fogyasztásban jelenik meg. De a keverékek használata, valamint az etanol nagyobb oktánszáma miatt kevesebb a többletfogyasztás (mintegy 20-25%-os), mint ami a fűtőértékek különbségéből következne.

A megfelelő vizsgálati módszer éppúgy nélkülözhetetlen, mint a tökéletes körbetekintés abban az esetben, ha egy folyamat vagy termék gazdaságosságát vizsgáljuk. Jelenleg is nagyon sokszor az energia, mint fizikai mennyiség segítségével próbáljuk összehasonlítani az anyagokat aszerint, hogy melyik folyamatba mennyi energiát kell befektetni, és a végén mennyit tudunk kinyerni belőle. Azonban a termodinamika II. főtételeiből az entrópia mellett egy másik fizikai mennyiség is levezethető, ez pedig az exergia. Ez az anyag adott környezetbeli maximális munkavégző-képességét adja meg. Az exergia fogalmát először egy szlovén tudós, *Z. Rant* használta a múlt század közepén. A gyakorlati alkalmazás az 1980-as évek második felében terjedt el, amikor *J. Szargut* lengyel mérnök megmutatta, hogy a különböző technológiai folyamatok leírására ez a fogalom nagyon alkalmas [1]. A környezeti folyamatok vizsgálatában az exergia használata az 1990-es évek második felében jelent meg [2]. Az exergia használatával összehasonlításra használhatóbb módszert kapunk. Minden irreverzibilis jelenség exergiavesztést okoz, amely jelzi az energia hasznosságának, illetve hasznosíthatóságának csökkenését. Az exergiaelemzés fő célja a vizsgált eljárásban azonosítani és számszerűsíteni a termodinamikai törvényeket. Számos anyagról és folyamatról már az eddigiekben is kiderült, hogy ugyan az energetikai mérleg alapján nyereségesnek tekinthetjük, azonban az exergetikai számítások szerint a folyamat veszteséges.

A bioetanol előállításának exergiafolyamata a következő: a kiválasztott földet előkészítjük, majd elvetjük benne a vetőmagot. Ezek a folyamatok exergiabefektetést igényelnek. Ezt követően a növény növekedni kezd a locsolás (exergiabefektetés), illetve a napsugárzás hatására. A Napból jövő sugárzás tiszta exergiának tekinthető, a növény ezt felveszi és elraktározza magában. Amikor a termés megérett, akkor a termelő részéről szintén exergiabefektetés a betakarítás, a szállítás. Ezt követi a feldolgozás. Az előállított bioetanol pedig elszállítják a töltőállomásokra, ott bekerül az autók motorterébe, majd elég. Az égés során az általunk befektetett, valamint a Napból kinyert exergia szabadul fel. Minél több az emberi input, annál kisebb az exergianyereség. Megtérülőnek akkor tekinthetünk egy folyamatot, ha egy teljes ciklust tekintve legalább annyi az exergiaoutput (vagyis a nyereség), mint az input.

Az egyik legnehezebb vizsgálati tényező az emberi munka számbavétele. Ez az exergiamérleg tekintetében nagyon komplex: ahhoz, hogy mi, emberek munkát végezhessünk, szükséges táplálékot fogyasztani,

ami jelentős exergiainput. Továbbá nemcsak a többlettáplálék-fogyasztás, hanem a közlekedés, ruházkozás is exergiafelhasználással jár. Azonban a nagyüzemi kukoricatermesztésnél az emberi munka biztosításához szükséges exergiafelhasználás elhanyagolható az üzemanyag-felhasználáshoz képest.

Számítás

Vizsgálatunkban az előző fejezetben leírt folyamat exergiaértékeit számszerűsítjük. A Napból elnyelt exergiát nem lehet egyszerűen meghatározni, ezért helyette megbecsüljük, hogy mekkora a termelés során az exergiainput, illetve megnézzük, körülbelül mekkorák az egyes folyamatok veszteségei. Ezt követően pedig megvizsgáljuk a kinyert exergiát. Elméletileg a különbség a haszon, az az exergia, amit a Napból jövő exergiából fel tudunk használni.

Mérlegünk és számításunk azonban csak a termelési-előállítási folyamatra vonatkozik, a motorban történő égésre nem. A témában hazánkban már készült elemzés [3], amiből azt a megállapítást tehetjük, hogy a bioetanol hatásfoka a motorban nagyjából megegyezik a benzinével.

A számítás menete a következő: lépésről-lépésre elemezzük a vizsgált folyamatot. Megállapítjuk, melyik lépés milyen anyag-, illetve energia-befektetést (inputot) igényel, illetve azt, hogy ezen inputok mennyisége mekkora. Ezt követően megnézzük, hogy mik a különböző végtermékek, illetve megkeressük, hogy mekkorák a különböző anyagokhoz tartozó fajlagos exergiaértékek. Az exergiával foglalkozó szakirodalom elég széleskörű, így gyakorlatilag a legtöbb anyaghoz tartozó érték megtalálható. Ez a számérték azonban nemcsak az anyagi minőségtől, hanem a környezettől is függ. Az összehasonlíthatóság érdekében éppen ezért a kutatók a standard környezethez viszonyítva adják meg az értékeket.

Számításainknál a különböző fajlagos exergiaértékeket eltérő kutatási eredményekből kaptuk meg, ahol a standard környezet is eltérhet. Azonban az ebből fakadó eltérés még mindig kisebb – és így elhanyagolható – a többi paraméter változékonyságához képest. A fajlagos exergia és a bevitt anyagok mennyisége alapján egyértelműen meghatározható a bevitt összes exergia mennyisége (= a mennyiség és a fajlagos érték szorzata a különböző anyagokra nézve), és ehhez hasonlóan a kinyert exergia is. Ennek mérlege az, amivel első körben meg lehet állapítani, hogy egy folyamat fizikai hatékonysága pozitív vagy negatív. Ennél pontosabb értéket is kaphatunk, ha a folyamatot behatóbban tanulmányozzuk. A különböző inputok ugyanis szintén egy folyamat végtermékei, így ezeknek is van egy, a folyamatra jellemző fizikai hatékonyságuk. És hiába pozitív a fő folyamat hatékonysága önmagában, ha minden egyes input csak exergiavesztéssel állítható elő. Ez a vizsgálati folyamat a teljes életciklus elemzés (LCA), ami azonban túlmutat jelen munkánkon.

Az azonban egyértelmű, hogyha az elsődleges vizsgálat – vagyis csak az inputok és outputok teljes exerigiájának mérlege – negatív, akkor egy részletesebb vizsgálat sem fog pozitív végeredményt adni, tehát egy ilyen mérleg elkészítése értékes tájékoztató információt nyújthat a számunkra.

Alapanyag előállítása

Magyarországon, mint ahogy azt már korábban említettük a legelterjedtebb bioetanol-alapanyag a kukorica. A kukorica termesztésének nagy hagyománya és gyakorlata van az országban, így könnyen lehet vele dolgozni. További előnye, hogy nem csak a kukoricaszemekből lehet a bioetanol előállítani, hanem a növény többi részéből is kivonható a keményítő (amit át lehet alakítani etanollá): a szárból, csőből, levélből egyaránt. Jelen tanulmányunkban csak a morzsolt kukoricát vesszük figyelembe, összességében azonban javíthat a mutatókon, ha a teljes növényvel számolunk, hiszen akkor egységnyi termőterületen több bioetanol lehet előállítani, ráadásul kevesebb hulladék keletkezik (ami szintén exergiavesztésnek tekinthető).

Maga a termesztés folyamata a következő: a kukorica elvetéséhez körülbelül 20 kg/ha mag szükséges. Mielőtt a magot elvetjük, el kell végeznünk számos talajművelési folyamatot. Elsőnek fel kell szántanunk a földet, majd következik a fogasolás és a kombinátorozás. Ezután kerül sor a műtrágyázásra és a vetésre. A trágyázás célja a talaj tápanyagokban való gazdagítása a kultúrnövények növekedése, fejlődése érdekében, így biztosítva a magasabb terméshozam elérését. A műtrágyák növényi tápanyagot tartalmazó, ipari eredetű, illetve bányászati anyagok, amelyek célja a termőföldre való kiszórással az elhasznált tápanyagok pótlása. Így lényegesen nagyobb terméshozamot érhetünk el, mint a hagyományos, természetes eredetű trágyával. A műtrágyaigény nitrogén esetében 34 kg/ha, foszfor esetében 21,6 kg/ha és kálium esetében 10,2 kg/ha. A műtrágya kiszórása, valamint a különböző talaj-előkészítési folyamatok gépeket és emberi munkát igényelnek.

Miután elvetettük a magokat és elkezd növekedni a termés, a növényvédelem következik. Ennek feladata a kultúrnövények védelme, a termelésbiztonság, a minőségbiztosítás a lehető legkisebb környezeti terhelés és takarékos energiafelhasználás figyelembevételével. A növényvédelmi eljárások döntő többségében szórással juttatják ki a hatóanyagot a kezelendő felületre.

A magok elvetése és a növény kifejlődése után következik a betakarítás. A kukorica esetén ez az időszak októberre esik. A vizsgált terület termésátlaga 2005-ben 7631 kg/ha, míg 2007-ben 2981 kg/ha volt.

Ezek után a szárított kukoricát elszállítják a bioetanolgyárhoz. Ezeknek az üzemeknek lehetőség szerint az alapanyag közelében kell letelepedniük, hogy minél alacsonyabbak legyenek az alapanyag-szállítási költségek.

Felhasznált adatok

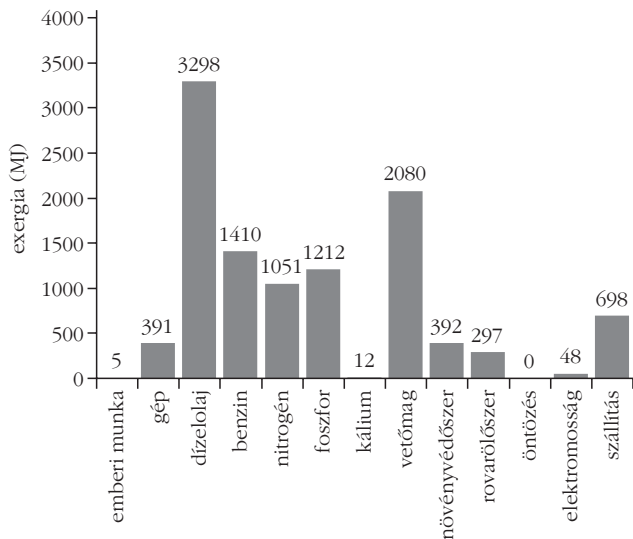
Az általunk készített exergiaelemzés egy magyarországi, átlagos termőterület valós adataira vonatkozik (Jász-Nagykun-Szolnok megye, csernozjom talaj), emiatt előfordulhat, hogy az ország más régióban eltérő eredményeket kapunk a kukorica-bioetanol folyamat gazdaságosságára. Az analízis jelen esetben nem tekinthető LCA-nak, sokkal inkább a szűk, közvetlen exergiaigények feltüntetését célozza meg. Ennek köszönhetően inkább tájékoztató, semmint konkrét eredménynek tekinthető az adatok. Annak érdekében, hogy az összegyűjtött és kiszámolt számadatokat viszonyíthassuk valamihez, *T. W. Patzek* egyik hasonló elemzésével [4] vetettük össze értékeinket, ezáltal lehetőségünk nyílt arra, hogy a fizikai-környezeti gazdaságosság alapján a magyar és az USA-beli kukoricatermesztést összehasonlítsuk. Hangsúlyozni kell azonban, hogy ez csak a kinyerhető exergiára (munkavégző-képességre) vonatkozik, nem pedig a pénzbeli gazdaságosságra.

Az egységnyi exergiaértékek bizonyos esetben eltérőek lehetnek, attól függően, kit választunk forrásként. Az eltérések abból következnek, hogy az értékeket a kutatók más-más kiindulási, illetve végállapotra határozták meg. Fontos azonban, hogy az eltérő források értékei nagyságrendileg azonosak, emiatt – valamint amiatt, mert nem teljes életciklus-elemzést végeztünk – összességében el lehet tekinteni a különböző szerzők adataiból származó eltérésektől. Mindemellett azt a tényt sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a többi paraméter adatainak változékonysága sokkal jelentősebb, mint ezek az eltérések, így a fajlagos exergiaértékek közti különbségek elhanyagolhatóak.

A vizsgálat a következő volt: a magyarországi átlagos termőterületre megnéztük, hogy a termeléshez milyen anyagok szükségesek, valamint ezekből mennyit kell felhasználni (1 ha-ra nézve). A mennyiségi adatok (input) tapasztalati értékek. A külföldi szakirodalomban már számtalan információ található a befektetett anyagok fajlagos exergiaértékére, amiket felhasználtunk a saját folyamatunk elemzésére. Mint már korábban láthattuk, a következő anyagok szükségesek a kukorica megtermeléséhez: vetőmag, N-, P-, K-tartalmú műtrágya, növényvédő és rovarölő szer, dízelolaj, benzin, emberi munka, gépek.

Az ábrákban nemcsak alapanyagok találhatóak meg, hanem néhány egyéb tényező is, amelyek azonban mind jelentősek (2. és 3. ábra). Az emberi munka alatt azt az emberi exergiabefektetést értjük, ami a termelés folyamatában nélkülözhetetlen. Ennek meghatározása becslésen alapszik: azt tudjuk meghatározni, hogy mi egy ember napi exergia-bevitele. Fizikai munkát végző embernél ezt a kutatók 0,7 MJ/h-ban határozták meg [5].

Az emberi feladatok közé tartozik a gépek kezelése, adott esetben kétkezi fizikai munka (gépek feltöltése vetőmaggal, műtrágyával stb.). Az érték meghatározásánál pedig a következő módszert alkalmazták:



2. ábra. A magyar kukoricatermés hektáronkénti exergiaigénye.

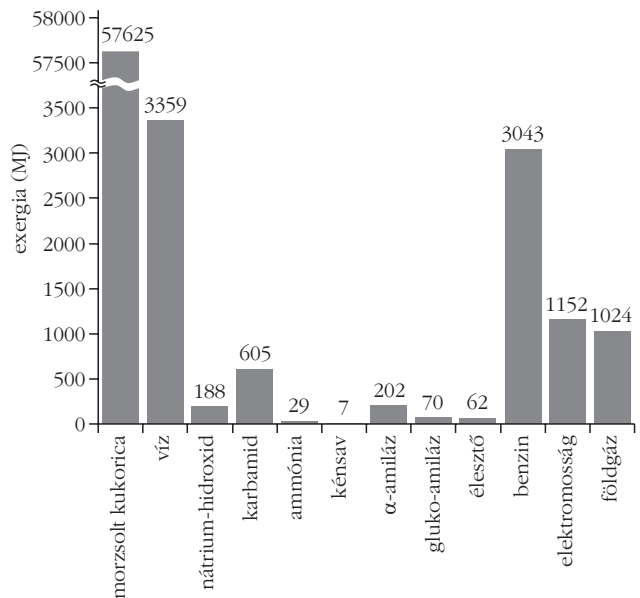
megnézték, hogy egy természaki alatt összesen hány órát dolgoztak az emberek, majd ezt az értéket vetítették egy hektárra (körülbelül 7 h/ha).

Másik, szintén értelmezést igénylő tétel a gépek csoportja. A gépek „befektetett mennyisége” nem az egyes gépek tömegét jelenti, hanem az előállításukhoz befektetett anyagmennyiséget, valamint egy kicsit nehezebben számolható tételt, az amortizációjukat, aminek mértéke egy természakra szintén meghatározható és így egy hektárra vetíthető.

Az adott anyagra nézett exergiainput értéke a bevett mennyiség és a fajlagos exergia szorzataként kapható meg. Ezeket az adatokat megvizsgálva, három csoportra jól elkülöníthetők a befektetett mennyiségek, amik között nagyságrendi különbségek vannak.

A legkevésbé jelentősek: az elektromos energia, a kálium, mint műtrágya, valamint az emberi munkaerő (körülbelül 10 MJ/ha). A következő csoportban már egy nagyságrenddel nagyobb értékeket találunk: növény- és rovarölőszerek, valamint a gépek (néhány 100 MJ hektáronként). A harmadik csoportban találhatjuk a legjelentősebb exergiaértékeket, ezek azok, amelyek a legnagyobb mértékben növelik az input összességét, ezek értéke néhány ezer MJ/ha. Természetesen ide tartozik a vetőmag, ám emellett az üzemanyagok és a többi műtrágya jelentősége sem elhanyagolható. A dízelolaj kiugróan magas értékkel képviselteti magát, ezt azonban csökkenteni lehetne abban az esetben, ha üzemanyagként visszaforgatnák a gyártott etanolt, mert akkor nem (vagy csak kisebb mértékben) lenne szükség a fosszilis üzemanyagok használatára.

Összesen körülbelül 11 GJ exergiat kell befektetni egy hektárnyi föld megművelésébe kukorica megtermesztésénél. Azonban a kukoricát ezt követően el kell szállítani, és a szállítási költség erősen függ a távolságtól. Jelen esetünkben a távolságot 50 kgkm-nek vettük – ha az országban nem mindenhol van feldolgozó üzem, akkor könnyedén lehet ebből 200 kgkm is –, ami 13 GJ-ra emeli az összes, termelésbe befektetett exer-



3. ábra. Bioetanol előállításának exergiamérlege.

giát. Ha ezeket az értékeket összevetjük a morzsolt kukoricából kinyerhető exergiamennyiséggel, látható, hogy igencsak fontos érték a terület hozama. Jó termés esetén 74,8 GJ a kinyert exergia, míg rosszabb (például: aszályosabb) évben 29,2 GJ, ami alig több, mint kétszerese a befektetett mennyiségnek, vagyis ez esetben a határfok rossz.

A termelés a folyamat csupán egyik része, a morzsolt kukoricából ugyanis kémiai reakciók során állítják elő a bioetanol. A vizsgálat szigorúan csak az alapanyagokra vonatkozik, így nem veszi számításba például az üzem felépítésének, majd amortizációjának költségeit, de fontos kiemelni, hogy ezek a tényezők egyáltalán nem elhanyagolhatóak.

A vizsgálat második része a bioetanol-előállításra vonatkozott: egy konkrét magyarországi bioetanolgyár adatait felhasználva számítottuk ki az 1 tonna etanol előállításához ipari mértékben szükséges anyagok teljes exergiját (3. ábra).

Ezek az értékek sok szempontból specifikus adatnak tekinthetők – hasonlóan az egy adott területen mi szükséges a kukoricatermesztéshez –, más adalékanyagokat, más tisztaságú vegyszereket használhatnak a különböző országokban. Az általunk vizsgált gyár nagy mennyiségű vizet, villamos energiát, földgázt, enzimeket, valamint különböző vegyszereket (kénsav, ammónia, nátrium-hidroxid, szulfínamsav) használ fel. Van, ami csak adalékanyag kell – ennek mennyisége gyakorlatilag elhanyagolható, míg például a nátrium-hidroxid a kémiai reakció egyik alapanyagának tekinthető, így exergiaértéke nem hagyható ki a számításokból.

Az előállítás folyamata során jelentős mennyiségű melléktermék is keletkezik, amit elméletileg hasznosítani lehet. A nagy mennyiségű szerves maradékot, a szárított gabonatörkölyt (Distillers Dried Grains with Solubles – DDGS) állati takarmányként el lehet adni. A DDGS exergiatartalma 18,8 MJ/kg.

1 tonna etanol előállításakor 2007-ben a kukorica-termesztéshez 11 GJ (3 t kukoricából lesz 1 t etanol), míg a gyártáshoz 9 GJ exergiabemenetre volt szükség, azaz a 29,43 GJ bioetanolhoz 20 GJ exergiát használtunk fel. 2005-ben a jobb termésátlag miatt az exergiabemenet csak $4,4 \text{ GJ} + 9 \text{ GJ} = 13,4 \text{ GJ}$ volt.

Az adatok azonban még kevésbé pozitívak, ha figyelembe vesszük a bioetanol-gyártásnál is az emberimunka-igényt és az infrastruktúra (épület, gépek) exergiaigényét. Ekkor Patzek értékelése szerint a gyártási exergiafelhasználás 1 t etanol előállításánál 18,9 GJ-ra növekszik [6]. Azaz a 2007-es adatot használva 29,9 GJ fosszilis üzemanyag exergiával 29,4 GJ bioetanol-exergiát állítunk elő. Természetesen az exergiamérleg pozitívabb lesz, ha a DDGS exergiáját is figyelembe vesszük.

Konklúzió

A számításokat összefoglalva arra a következtetésre kell jutnunk, hogy fizikai szempontból a bioetanol előállítása és felhasználása hosszú távon nem alkalmas a fosszilis üzemanyagok kiváltására. Pénzügyileg lehet, hogy megéri, ám a Föld egyensúlyát nem a pénz irányítja, hanem a természeti törvények, márpedig ez a folyamat a természet hosszú távú kizsákmányolását jelenti, ami éppen ellentétes az eredeti elképzelésekkel.

Levonhatjuk azt a következtetést, hogy bioetanol használni (házánkban) nem célszerű, bármilyen is a pénzügyi támogatottsága. Kedvezőtlen időjárás esetén

előfordulhat, hogy több exergiát kell befektetni a termesztésbe és az előállításba, mint amennyit kinyerünk, ha csak a bioetanol tekintjük, és nem nézzük azt, hogy a folyamat mellékterméke szerencsésen hasznosítható. Ez utóbbit azért is érdemes figyelmen kívül hagyni, mert egyrészt ennek is vannak járulékos terhei (tárolás, szállítás), másrészt jelenleg a kereslet messze alul marad a keletkezett mennyiséghez képest, így a DDGS, a szárított gabonatorkőly feleslegként jelenik meg, tehát a veszteségoldalon kell számításba venni.

Fontos, hogy jelen tanulmány csak tájékoztató jellegű, a módszer korlátai miatt inkább csak a nagyságrendet, a tendenciát mutatta meg. Azonban minél részletesebb egy vizsgálat, annál több tényezőt számol bele a folyamatba, amibe anyagot-exergiát-pénzt kell befektetni, vagyis összességében az előállítás hatékonyságát tovább csökkenti.

Irodalom

1. J. Szargut, D. R. Morris, F. R. Steward: *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. Hemisphere, New York, 1988.
2. R. U. Ayres, L. W. Ayres, K. Martinás: Eco-thermodynamics: Exergy and Life cycle analysis *Energy* 23 (1998) 355.
3. Emőd I., Füle M., Tánczos K., Zöldy M.: A bioetanol magyarországi bevezetésének műszaki, gazdasági és környezetvédelmi feltételei. *Magyar Tudomány* (2005/3) 278–286.
4. T. W. Patzek: The Real Biofuel Cycles. Online Supporting Material for Science Letter (2006), letöltve: petroleum.berkeley.edu/patzek/BiofuelQA/Material/RealFuelCycles-Web.pdf
5. D. Pimentel, M. Pimentel: *Food, Energy and Society*. Niwot, University Press of Colorado, 1996.
6. T. W. Patzek: Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle. *Critical Reviews in Plant Sciences* 23/6 (2004) 519–567.

A FIZIKA TANÍTÁSA

FELHŐK HÁTÁN

Néhány természeti jelenség lefolyásának időtartama túlságosan hosszú, ezek vizsgálatához szükség van úgynevezett time lapse rendszerrel rendelkező szoftverre, illetve megfelelő felbontású kamerára is. A felhők vonulása, a Hold, a Nap látszólagos mozgásai, a növények növekedése, az esőcseppek párolgása, a jég olvadása... stb. olyan lassan mennek végbe, hogy érdekesebb normál film valós idejű 30 kép/s rögzítése helyett olyan filmeket készíteni, amiben percenként, esetleg óránként exponálódik egy-egy képkocka. Ilyen film normál sebességű lejátszása esetén gyorsítva láthatjuk a vizsgált jelenségeket. Ezekkel a felvételekkel lényegesen könnyebben készíthetünk elemzéseket különböző analízis szoftverek segítségével.

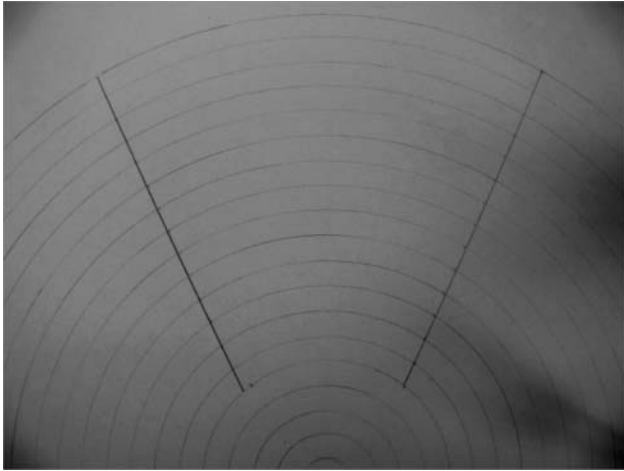
Stonawski Tamás

Báthori István Református Gimnázium
és Kollégium, Nagyecséd

Felhők sebességének mérése

A légkör különböző magasságaiban lebegő apró vízcseppek vagy jégkristályok halmazait nevezzük felhőnek. A meteorológia 10 fő-felhőfajt különböztet meg. A felhők osztályozásánál a következő szempontokat veszik figyelembe: a felhő magassága, mérete, alakja, textúrája, fényereje és színe. A felhők tulajdonságait az őket létrehozó különböző fizikai folyamatok határozzák meg, amelyekkel a környezeti áramlások fizikája foglalkozik.

Elhatároztuk tanítványaimmal, hogy szakköri munka keretén belül, webkamera segítségével megmérjük a felhők sebességét.



1. ábra. A4-es papírlapra rajzolt koncentrikus körvonalakon bejelölt látóhatárpontok.

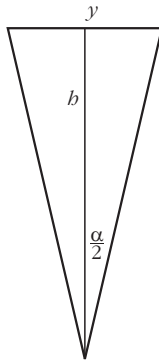
A felhők szélességét nem ismertük, ezért két adatra szükségünk volt: a felhő légköri magasságára és a webkamerára jellemző α látószögre.

A webkamerára jellemző α szög meghatározása

A webkamera, hasonlóan az emberi szemhez, a körülötte lévő tér egy részét képes csak érzékelni. A kamera által látható síkrész szélességét a látószög határozza meg, ami a kamerára jellemző állandó. Sok esetben a gyártó a kamera leírásában fel is tünteti ezt az értéket. Ha ez az adat mégsem áll rendelkezésünkre, akkor geometriai módszerekkel könnyen meghatározhatjuk. Rajzoljunk egy A4-es lapra koncentrikus köríveket, majd helyezzük a kamerát a középpontba! Állítsuk elő ezután a számítógépen létrejövő képet! A koncentrikus vonalakon haladva keressük meg a ceruzánk hegyével azokat a helyeket, ahol éppen a képernyő szélén látszik a ceruzahegy! A pontokat összekötve két metsző egyenest kapunk. A két metsző egyenes által bezárt α szög a kamera látószöge (1. ábra).

Az α látószög ismeretében a kamera által készített képen meghatározhatjuk a b magasságban lévő tárgy valódi y szélességét.

$$y = 2 b \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$



A kamera látószögének ellenőrzése

A kamera látószögét A4-es lapon geometriai módszerekkel állapítottuk meg. Mivel ilyen kis méretű szerkesztéseknél a kis szögelterések nem szembetűnőek, ezért elvégeztük a kamera látószögének ellenőrzését ismert tárgytávolság- és tárgynagysáértékekkel is.

A kamerát az osztályterem végében, a táblával szemben helyeztük el. Mérőszalaggal megmértük a

tábla és a kamera távolságát, illetve a tábla hosszúságát és szélességét is. Ezt követően a kamerával képet készítettünk. A Tracker videoanalízis szoftver segítségével a tábla szélességét bekalibráltuk a valós értékekre, és a program segítségével megmértük a teljes képernyő szélességét. A képernyő szélességéből és a kamera-tábla távolság arányából ismét kiszámítottuk a látószög nagyságát. A kapott érték csak kissé tért el a papírlapon mért értéktől: $\alpha = 52,84^\circ$ adódott.

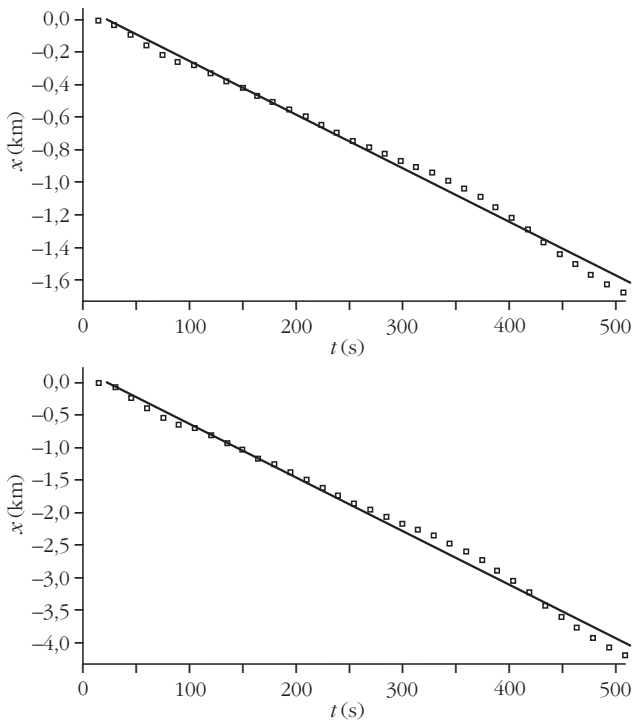
A felhők tengerszinttől mért magasságának meghatározása

Ha ismert a kamera és az objektum távolsága, a teljes képernyőn látható kép valódi szélessége (1) alapján kiszámítható.

2012. május 10-én a Nagyecsed Református Gimnázium fizikaszertára ablakából felhők mozgását filmeltük. A Webcamlaboratory szoftvert használtuk, amit úgy állítottunk be, hogy a rögzített kamera segítségével 15 másodpercenként készítsen egy felvételt. A felhők igen közelinek tűntek és gyorsan mozogtak

2. ábra. A felhők azonosítása fényképük alapján történt. A felső fénykép a szertáráblakból készített felvételt mutatja, az alsó képen a Wikipédiából azonosított *Cumulus humilis*, lapos gomolyfelhő látható.





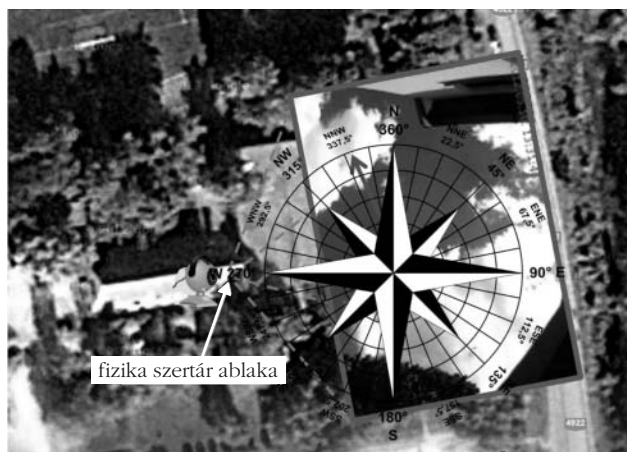
3. ábra. A videoanalízis során nyert $x(m) - t(s)$ grafikonok képei. A felső ábrán a 2 km-es távolságban feltételezett, az alsó ábrán az 5 km magasságban feltételezett felhő $x-t$ grafikonja látható.

a kissé borongós égbolton. A felhők fényképei alapján kiválasztottuk a felhőatlaszból a hozzá legjobban hasonlót és kigyűjtöttük a rendelkezésre álló paramétereket. A vizsgált felhők leginkább a *Cumulus* felhőcsaládra hasonlítottak (2. ábra).

A *Cumulus humilis* hosszan elnyúlt (1-20 km átmérőjű) és rendszerint elmosódott körvonalú felhőfajta. Szélük fehér vagy gyöngyházfényű színeződést mutat, közepük szürkés árnyalatú. Középmagasan, 2-5 km magasságban képződnek a termikus konvekció következményeként. Az Antarktiszon kívül (a hideg felszín gátolja a konvekciót) bármely földrészén előfordulhatnak.

A felfelé áramló levegőben a vízgőz a magasabban fekvő hideg levegővel érintkezve kicsapódik, amit a filmfelvételen is jól megfigyelhettünk: több kisebb

4. ábra. A Google műholdas képe alapján meghatároztuk a felhő sebességének irányát.



pamacs, ellentétben a nagyobb társaikkal, nem beúszott a képmezőbe, hanem a kék háttérből sejtelmesen előbukkant. Ez a folyamat fordítva is lejátszódott: a felhők bizonyos részei szertefoszlottak a felvételeken a folyamatos melegáramlásnak köszönhetően.

Nyáron az esetek többségében a gomolyfelhők késő délutánra összeomlanak. A *Cumulus humilis* ugyan nem esőfelhő, de a közeljövőben (12-24 óra múlva) bekövetkező esőre is utalhat, főleg, ha kialakul a gomolyfelhő-képződés következő fázisa, a *Cumulus congestus* karfiolszerű, több kilométer magasú felhő. 2012. május 10-én a késő délutáni órákra sem tudtak kialakulni a magasabb gomolyfelhők, csapadék sem esett.

A felhők méretének meghatározása

A felhők magasságából kiszámoltuk a kamera által felvett teljes képernyőszélességnek megfelelő valódi hosszt:

$$y_{\min} = 2 \cdot 2 \text{ km} \cdot \text{tg } 26,42^\circ = 1,987 \text{ km} \approx 2 \text{ km},$$

$$y_{\max} = 2 \cdot 5 \text{ km} \cdot \text{tg } 26,42^\circ = 4,968 \text{ km} \approx 5 \text{ km}.$$

A képernyő teljes szélességét a fenti minimális és maximális kalibrációkra állítottuk és kiválasztottunk egy kis és egy nagy méretű felhőt. A kalibrációt fixen hagyva a program lehetőséget ad a kalibrációnak megfelelő síkokban az objektumok szélesség- és hosszúságméreteinek meghatározására. A felhők így 1-3 km szélességűeknek adódtak.

A felhők sebességnagyságának meghatározása

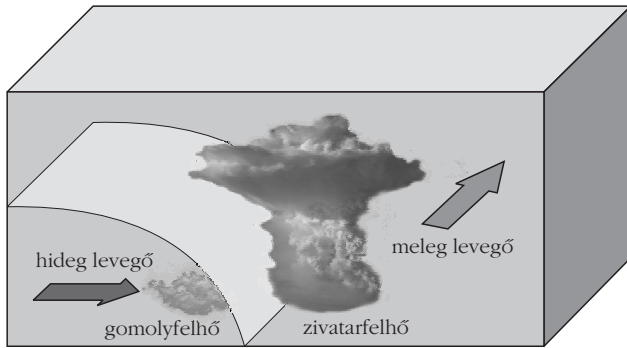
A felhő egy jellegzetes pontját kiválasztottuk és mozgása során a program segítségével nyomon követtük. A koordinátarendszer x tengelyét a felhő haladási irányának egyenesében vettük fel.

A mérés során a maximális és a minimális értékek is lefutattuk az analízist.

Az $x-t$ grafikonokra egyeneseket illesztettünk, az egyenesek meredekségei a felhő lehetséges sebességértékeinek feleltek meg (3. ábra). A kapott sebességérték: $3,28-8,2 \text{ m/s} \approx 12-30 \text{ km/h}$ volt.

A felhők sebességirányának meghatározása

Először a fizikaszertár ablakának tájolását végeztük el a <https://maps.google.hu/> oldal segítségével. Beírtuk az iskola címét, és a maximális nagyítást választva kivágtuk az iskoláról készített műholdfelvételt (ezek a fotók a térképek szerinti tájolásban készülnek). Ezután a kamera által, az ablakkeret síkjával párhuzamosan készített képet ráillesztettük, és bejelöltük a felhők áramlási irányát (4. ábra). A felhők sebességének iránya jó közelítésben északnyugati volt, azaz délkeleti szél fúj a felhők magasságában.



5. ábra. Az érkező hidegfront hatására a meleg levegő határán intenzív feláramlás következik be, amely elősegíti a zivatarfelhők (*Cumulus congestus*) keletkezését.

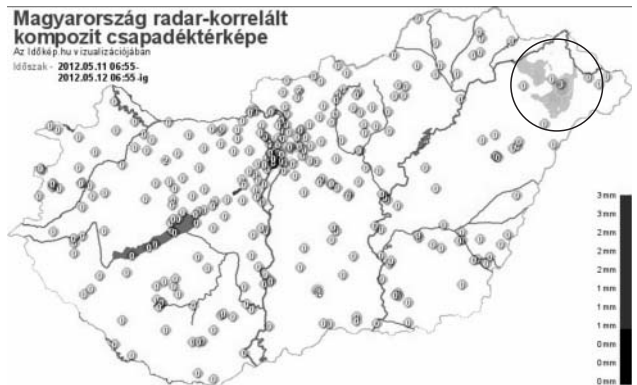
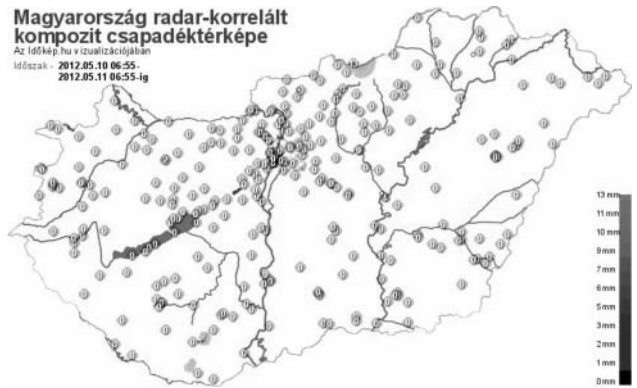
A talajszinten is megmértük a szélirányt: az iskola mellett fekvő sportpályán egy könnyű cérnaszálat kötöttünk egy botra, és iránytű segítségével leolvastuk a szél mozgatta cérnaszál irányát (északnyugat), amely jól közelített a felhők sebességének irányához.

Következtetések

A *Cumulus* felhőcsalád gyakran a hidegfront érkezésével keletkezik. A mért felhősebesség-értékek is a hidegfront közeledtét támasztották alá. A hidegfront áramlási sebessége általában 25–40 km/h, a lökészerűen megjelenő szél észak-északnyugatra fordul és viharossá fokozódhat. Jellemző csapadékformája a zápor, zivatar jégesővel kísérve (5. ábra).

A vizsgált felhők áramlási iránya északnyugati volt. A felvétel készítése utáni napon Nagyecsedtől néhány kilométerre északnyugatra 3 mm, majd 2 nap múlva 24 mm csapadék hullott (ezen a napon országos eső volt). Május 13-án átlagosan 5 mm csapadék hullott a térségben, majd 14-én megszűnt az esőzés (6. ábra).

A szakköri munka során egyszerű sebességmérő-ötletből indultunk ki, ám a mérés kivitelezése során több érdekességet is felfedeztünk a légköri jelenségekkel kapcsolatosan. Összefüggéseket kerestünk a felhők fajtája, sebessége és a légköri áramlások között. Ok és okozati viszonyokat tapasztaltunk a saját bőrünkön, hiszen a szakkört követő napokon erőtel-

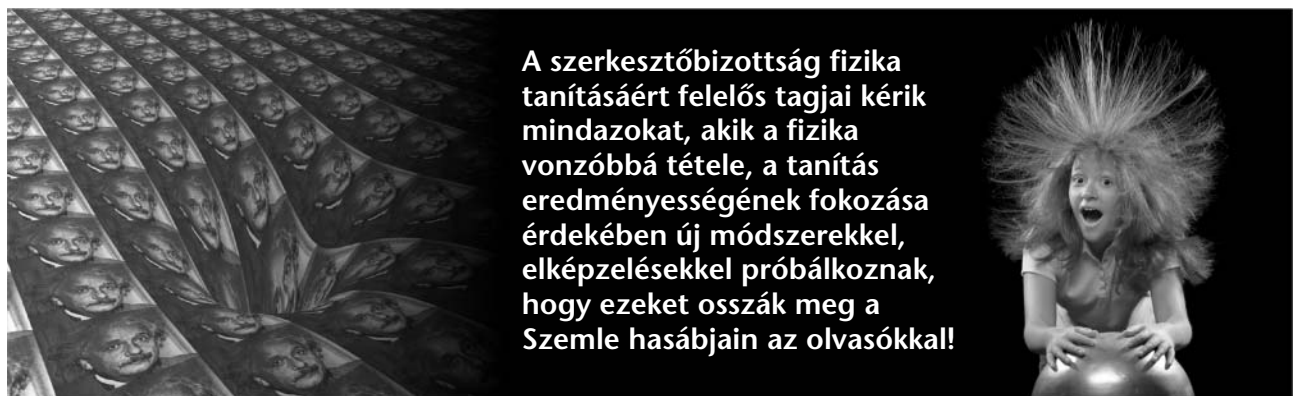


6. ábra. Az érkező hidegfront hatására kiadós eső érte a Nagyecsed térséget.

jes esőzések következtek be. A meteorológiai weboldalakon ellenőrizhettük a szél áramlási irányát, nagyságát, a csapadék előfordulását és mennyiségi értékeit is. Megtanultuk néhány jellegzetes felhő nevét és tulajdonságát, felfedeztük a Föld forgásának áramlási következményeit, és gyakrabban tekintettünk fel az égre.

Irodalom

1. http://www.youtube.com/watch?v=Q_rMyTGKbDg
2. Koppány György: *Felhők*. Móra kiadó, 1978.
3. http://hu.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9gk%C3%B6ri_felh%C3%B6k
4. <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>
5. <http://webcamlaboratory.com>
6. <http://www.komfortabc.hu/ido/felhoatlasz/index.php#alacsony>
7. <http://www.idokep.hu/csapadek/20120511>
8. <http://www.youtube.com/watch?v=kPWtGY5MQ28>



AZ ÉGBOLT HŐMÉRSÉKLETÉNEK MÉRÉSE AZ ÜVEGHÁZHATÁS VIZSGÁLATÁRA A FIZIKATANÁROK CERN-I TANULMÁNYÚTJÁN

Riedel Miklós – ELTE Fizikai Kémiai Tanszék

Barta Zsuzsanna – Kecskeméti Főiskola Petőfi Sándor Gyakorló Iskolája

Az infravörös hőmérő lehetőséget ad arra, hogy meg nem közelíthető, távoli tárgyak hőmérsékletét is meg tudjuk mérni. Így például az égbolt felé fordítva megmérhetjük a troposzféra átlagos hőmérsékletét, és ezáltal tájékoztató információkat szerzünk az üvegházhatásról, vagy a települések környezetében fellépő hőszennyezésről. A felhők hőmérséklete pedig a vízgőz kondenzációjára, a harmatpontra szolgáltat adatokat. A fizikatanárok 2012. évi CERN-i tanulmányútja során több ilyen mérést is végeztünk, erről számolunk most be.

Elméleti háttér

A légkörön kívül a világűrben a hőmérséklet körülbelül -270 °C körül van, az égbolt mért hőmérséklete ennél sokkal magasabb, nappal és éjszaka egyaránt. A földfelszín, valamint a felhők hőmérséklete még ennél is jelentősen nagyobb. A jelenség oka a légköri üvegházhatás, ami a sugárzásátviteli folyamatokon keresztül alakítja a felszín és a légkör energiaháztartását. Az üvegházhatású gázok – mint a troposzférában (10–15 km magasságig) jelen lévő vízgőz – abszorbeálják a földfelszín által kisugárzott infravörös (IR) sugárzás egy részét, így végeredményben a Föld hőmérséklete az élhető zónában marad, mert e hatás nélkül a Föld átlagos hőmérséklete -30 °C körül lenne (*J. Tyndall*, 1863 [1]). A vízgőz a legfontosabb üvegházhatású gáz, ehhez járul a részben antropogén eredetű szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid, az ózon és más gázok, további üvegházhatást okozva. Az 1. táblázat a legfontosabb légköri gázok hozzájárulását mutatja a természetes üvegházhatáshoz az általuk okozott hőmérséklet-emelkedés értékével, valamint az effektushoz való százalékos hozzájárulással. A levegő fő komponensei (nitrogén és oxigén) az energiacsere folyamatában jelentéktelen szerepet játszanak. A víz speciális szerepe az üvegházhatásban a molekula dipólus-momentumának, kis tehetetlenségi nyomatékának, bonyolult rezgésienergia-szerkezetének tulajdonítható [3]. Ez mutatkozik meg a víz igen jelentős abszorpciósi spektrumában is az infravörös-tartományban.

A mérésben részt vettek: *Riedel Miklós* (vezető), *Barta Zsuzsanna*, *Gyarmatiné Iváncsik Judit*, *Hajdú Hajnal*, *Horváth Krisztina*, *Kovács Levente*, *Kulcsár Gáborné Erdei Éva*, *Péter András Ede*, *Tóth Katalin*, *Tulkán Zsolt*.

Köszönetet mondunk *Weidinger Tamás*nak (ELTE Meteorológiai Tanszék) a szakmai tanácsokért és *Szillási Zoltán*nak (ATOMKI, CERN) az infravörös kamera bemutatásáért és a mérésekért.

Mérési feladatok, kísérleti eszközök

A feladat az égbolt látszólagos hőmérsékletének mérése volt a teljes égbolton keresztül, a horizonttól mért szög függvényében, tiszta égbolt esetén. A szögfüggés információt ad a víz által okozott üvegházhatásra, továbbá a horizonthoz közel a talajközeli légrétegek hőmérsékletére (ez felel meg a levegő szokásos értelemben vett hőmérsékletének), és esetleg a települések által okozott „hőszennyezésre” is utal [4].

Az infravörös hőmérő érintésmentes hőmérsékletmérést lehetővé tevő műszer (non contact temperature measurement) [5, 6]. A hőmérsékletet a tárgy által a 8–14 μm tartományban kisugárzott infravörös energia alapján határozza meg; az objektum felületi hőmérsékletét méri. A műszer érzékelője a tárgy által kibocsátott, róla visszavert hősugárzást érzékeli, és ezt az információt hőmérsékletértékre alakítja át. Mivel a műszer a tárgy felületi hőmérsékletét méri, ezért például az üvegen nem „lát” át, az üvegek is a felületi hőmérsékletét adja meg. Egy felület infravörös-sugárzása függ a tárgy kibocsátóképességétől is (fényesen tükröző felületről az úgynevezett abszolút fekete testig). Ezt az IR hőmérővel való mérésnél az empirikusan definiált „emissziófaktor” veszik figyelembe [7]. (Ehhez pontosabb fizikai fogalmak is rendelkezhetők, de ezeket itt nem tárgyaljuk.) Minél nagyobb ez az érték, annál jobban képes a tárgy felülete az IR sugárzás kibocsátására. Fémfelületek vagy csillag, illetve fehér anyagok emissziófoka alacsonyabb. Ez azt jelenti, hogy hiába magas a hőmérséklete, ezt nem, vagy csak gyengén „jelzi” az infravörös sugárzás kibocsátásával. Fekete és érdes felületek emissziófoka nagyobb (2. táblázat). Sok anyag és felület emissziófoka 0,95, ezért a műszereken általában ez az alapbeállítás.

gáz	hőmérsékleti (ΔT) hozzájárulás (K)	százalékos hozzájárulás
H ₂ O	20,6	62,4
CO ₂	7,2	21,8
O ₃	2,4	7,3
N ₂ O	1,4	4,3
CH ₄	0,8	2,4
egyéb	0,6	1,8

2. táblázat

A Voltcraft IR 1200-50D hőmérő gépkönyve alapján megadott közelítő emissziófaktorok

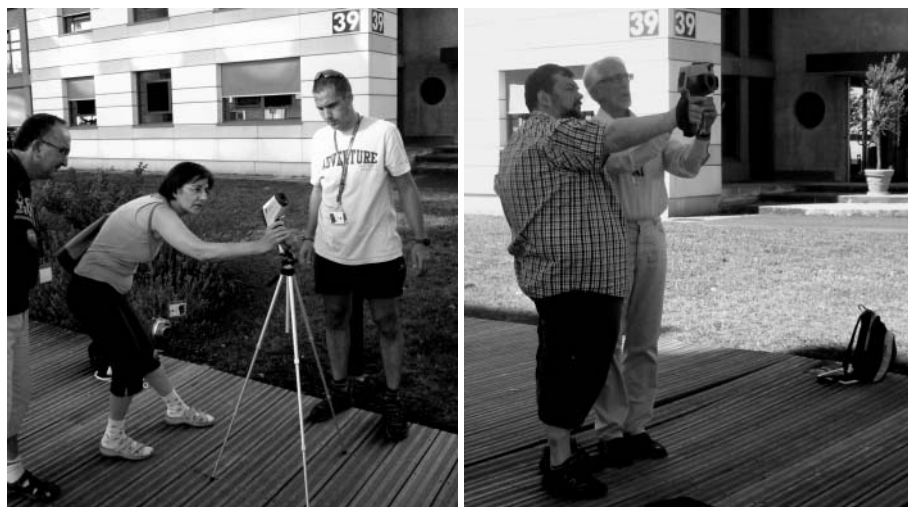
anyag	emissziófaktor
aszfalt	0,90–0,98
ember bőre	0,98
föld	0,92–0,96
habarcs	0,89–0,91
jég	0,96–0,98
tégla	0,93–0,96
víz	0,92–0,96

Az eszköz különösen hasznos forró, nehezen hozzáférhető, távoli vagy mozgó tárgyak hőmérsékletének mérésénél, így az égbolt hőmérsékletének a földfelszínről való tanulmányozására is. A mérendő felület nagyobb kell legyen, mint a hőmérő mérőfoltja. Ezt a hőmérőre jellemző arányszám alapján lehet megállapítani. Például a 6/1 arány azt jelenti, hogy a hőmérő 1 m távolságban egy 1/6 m átmérőjű foltot „lát”, ennek átlagos hőmérsékletét méri meg.

Ismert, hogy a légkör valóságos hőmérséklete változik a tengerszint feletti magassággal. A légköri hőmérséklet-méréseknél az infravörös hőmérő által mutatott adat átlagérték, a hőmérő által befogott kúp térrész (levegő) hőmérsékletének átlaga. Ezt a látszólagos hőmérsékletet nevezzük a továbbiakban az „égbolt hőmérsékletének”, és ezt hasonlítjuk össze a különböző körülmények között.

A feladathoz Voltcraft IR 1200-50D IR hőmérőt használunk. Ennek mérési hőmérséklet-tartománya: $-50-1200\text{ °C}$, pontossága körülbelül $\pm 2\text{ °C}$, távolság/folt aránya 50/1, azaz 1 km esetén 20 m. Az emissziófaktor a menürendszeren keresztül beállítható, erre azonban az égbolt tanulmányozása során nincs szükségünk (sőt lehetőségünk sem, hiszen nem is-

2. ábra. Mérés az infravörös hőmérővel (balra) és párhuzamos mérés a hőkamerával és az IR hőmérővel (jobbra).



1. ábra. A hőmérő az irány beállítására szolgáló szögmérővel.

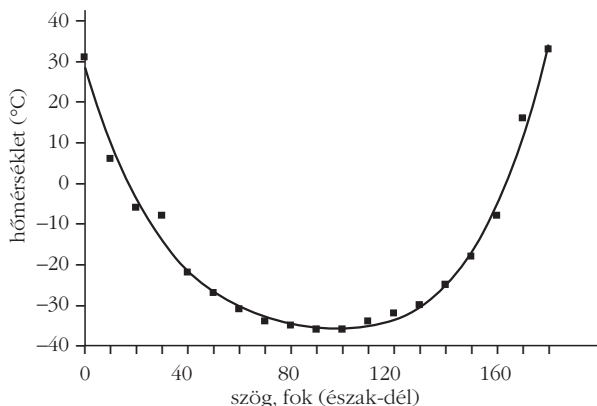
merjük ezt az adatot). A horizonttól mért szöget az IR hőmérő oldalára erősített egyszerű szögmérővel és függőzsinórrel állíthatjuk be (1. ábra).

Mérések, eredmények és tapasztalatok

2012. augusztus 14-én, a késő délutáni órákban (17 h) a CERN területén mértük az égbolt látszólagos hőmérsékletét a horizonttól (0°) a zeniten (90°) át az átel-lenben lévő horizontig (180°) 10° -os lépésekben. A pásztázás az északkeleti (22°) – délnyugati irányban történt. Az égbolt teljesen felhőmentes volt. Az eszköz árnyékban állt, ugyanis ügyelni kell arra, hogy ne érje hosszan tartó napsugárzás, a Nap felé fordítani pedig

tilos! A mérések figyelmet és több ember gondos együttműködését kívánták meg, az előre elkészített táblázat megkönnyítette az adatgyűjtést (2. ábra).

A mérési pontokra empirikus alapon negyedfokú görbét illesztettünk (3. ábra). A várakozásnak megfelelően a horizonthoz közel a hőmérséklet magasabb, mint a zenit közelében ($+30$, illetve -35 °C), hiszen a troposzférában (a légkör alsó, hozzávetőlegesen 10-12 km-es rétege) a hőmérséklet csökken a magassággal, s a felszínközeli légkörben a felszín, illetve az épített környezet hatása is meg-



3. ábra. Az égbolt látszólagos hőmérséklete a zeniten keresztül.

mutatkozik. A földközeli hőmérséklet megfelelt a levegő napi hőmérsékletének. A felhőmentes éjszakai égbolt hőmérséklete augusztus 16-án 20:45-kor ugyancsak -32 °C volt.

Augusztus 17-én 12 órakor hőkamerás (FLUKE ti25) és infravörös hőmérős egyidejű észlelést végeztünk 84° -os keleti irányban a $0\text{--}50^\circ$ horizont feletti magasságtartományban. A hőkamera képe függőlegesen körülbelül 20° -os szöget fog be. A 4. ábrán a kamera felvételeit és a kép közepén mért függőleges hőmérsékletprofilot mutatjuk be. Az égbolt teljesen fel-

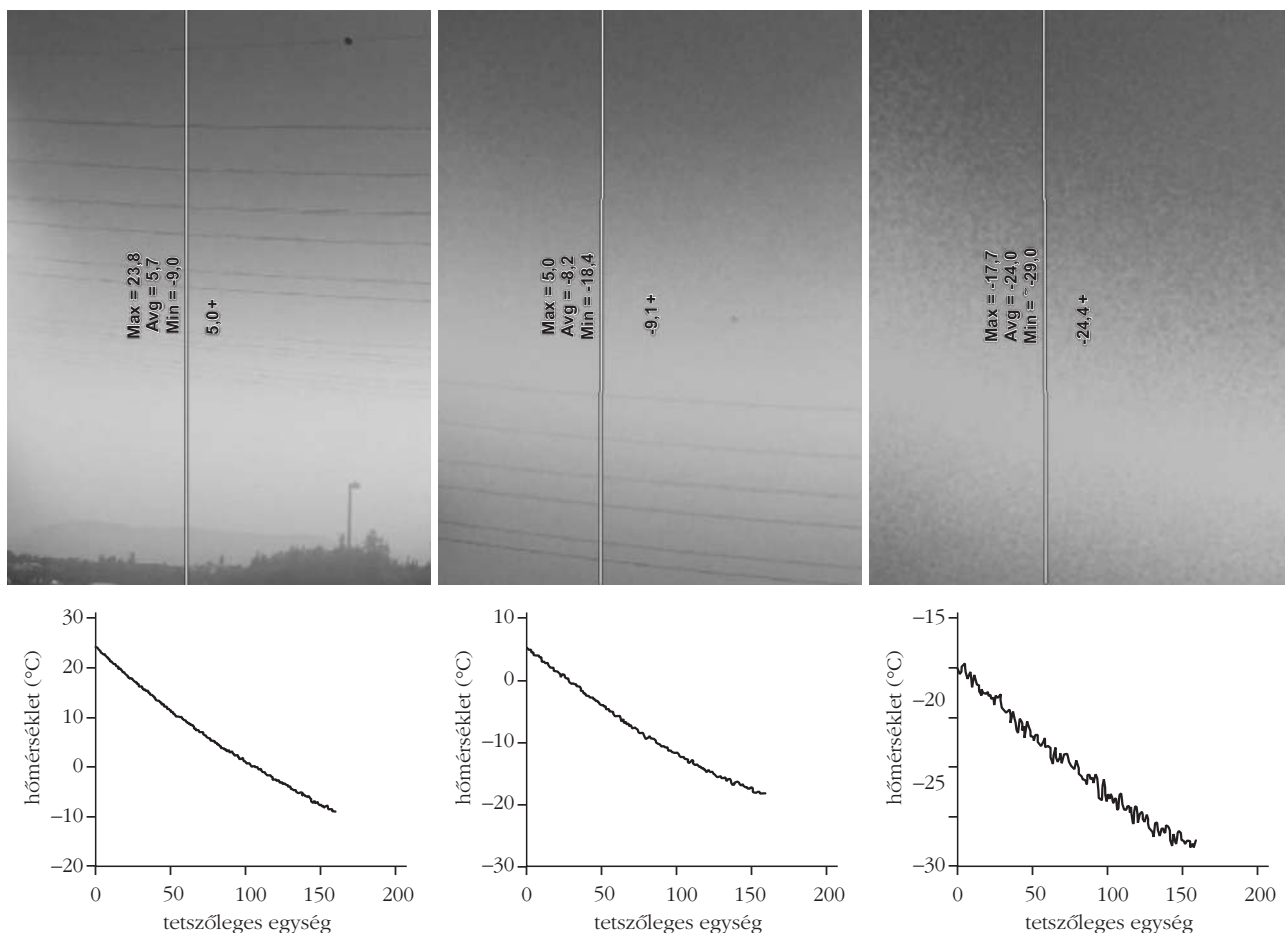
hőmentes volt. Látható, hogy a hőkamerás felvételek ugyanazt a tendenciát mutatják az égbolt hőmérsékletére és ezáltal az üvegházhatásra, mint ami az IR hőmérővel volt megfigyelhető.

Tanulságok, megfontolások az oktatásban való alkalmazhatóságra

Az üvegházhatásra vonatkozó kísérletek és elméleti tények hozzájárulhatnak azon hibás, köznapi – a médiából is félreértelmezhető – információ korrigálásához, miszerint az üvegházhatású gázok közül a széndioxid a legjelentősebb. Természetesen a széndioxid, a metán, a dinitrogén-oxid növekvő kibocsátása, az emberi tevékenység üvegházhatást növelő(!) hatása az egyik legfontosabb éghajlati kérdés, de nem felelkezhetünk meg arról, hogy a természetes üvegházhatás kialakításában a főszereplő, és a sok millió éves stabilitást biztosító anyag (vegyület) a víz.

Ma már egészen olcsó, és az iskolai célnak teljesen megfelelő infravörös hőmérők kaphatók. Kezelésük egyszerű, alkalmasak több érdekes – a természettudományok közös területeit érintő – diák projekt munka elvégzésére is. Már általános iskolában szerepel a fizika tananyagban a hőszugárzás, mint az energiaát-

4. ábra. A hőkamera képei a függőleges hőmérsékletprofillal a horizonttól mért $0\text{--}20^\circ$ (balra), $10\text{--}30^\circ$ (középen), $30\text{--}50^\circ$ (jobbra) szögtartományban. A felvételeket Szillási Zoltán készítette.



adás egyik formája. A tanulók egyszerű kísérlettel tapasztalatot szereznek a felületi minőség és a test színének befolyásoló szerepéről a két véglet esetében. Ezt egészítheti ki, és a fogalom megértését segítheti az IR hőmérővel végzett mérésorozat.

Megmérhető az emberi test (természetesen nem a lázmérő pontosságával), a hűtőszekrénybelső, a befagyott tőfelszín, a forró vaskályha hőmérséklete, az épületek hővesztesége stb. A pontosabb mérésekhez az emissziós tényező beállítása szükséges. Meg lehet mérni egy gépkocsi vagy egy motorkerékpár egyes részének a hőmérsékletét. Egyébként a többhengeres motorkerékpárok hengereinek egyenletes működését a kipufogócsövek IR hőmérővel való mérésével is vizsgálják.

Tanulságos a gomolyfelhők hőmérsékletének mérése is. A felhő hőmérséklete sokkal magasabb, mint a tiszta égbolté. Ha a felszálló légtömeg relatív páratartalma eléri a 100%-ot (telítetté válik), akkor a benne levő pára kicsapódik, megjelenik a felhő. A felhőalap hőmérséklete tehát megegyezik az ottani harmatponttal.

Könnyen kiszámítható a gomolyfelhők magassága is. Ehhez nem kell más, mint a felszíni hőmérséklet és a harmatpont ismerete, amit egy egyszerű hőmérséklet- és relatív nedvességmérő segítségével is meghatározhatunk. Ezekből kiszámítható az abszolút páratartalom (g/m^3 -ben), és a víz gőznyomás-táblázata

(Clausius–Clapeyron-egyenlet) segítségével megállapítjuk a felszíni harmatpontot is. A felszíni harmatpontdeficit (a T hőmérséklet és a T_d harmatpont közötti különbség) ismeretében megbecsülhetjük a felhőalap magasságát (b , méterben) a

$$b = 120(T - T_d)$$

munkaformula alkalmazásával.

Az ilyen és az ehhez hasonló egyszerű mérések, az azokból levont következtetések jól szemléltetik a fizika és a meteorológia szoros kapcsolatát, segítik a légköri ismeretek bővítését.

Irodalom

1. http://en.wikipedia.org/wiki/John_Tyndall
2. Andreas Heintz, Guido Reinhardt: *Chemie und Umwelt*. Vieweg Vlg., Braunschweig, 1991
3. Császár Attila: A földi üvegházhatás. *Természet Világa* 140 2009. február; <http://www.termeszvilaga.hu/szamok/tv2009/tv0902/csaszar.html>
4. Measuring the Temperature of the Sky and Clouds; <https://myasadata.larc.nasa.gov/P18.html>
5. Klaus-Dieter Gruner: The Principles of Noncontact Temperature Measurement; http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF
6. Walter Glockmann: Noncontact Temperature Measurement Theory and Application; <http://www.omega.com/pdf/temperature/Z/pdf/z067-069.pdf>
7. Emissivity of Most Common Materials; <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/IREducation/Emissivity.htm>

KÖNYVESPOLC

Kereszturi Ákos: MARS – fehér könyv a vörös bolygóról

Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2012, 189 oldal

Elterjedt nézet, hogy a Föld bolygó körüli sokasodó gondok megoldása a másik bolygóra költözés. Időnként felbukkan a célbolygók között a Mars, aminek felszínén száz éve még csatornákat véltek látni. Ahogy évtizedről évtizedre halasztódik a Mars-expedíció tervezett időpontja, a tömeges kitelepülésről mind kevesebben álmodoznak, a reménységet a marsi vízről érkező hírek tartják életben.

Az utazási reklámok megszokott szintjén képzelünk el egy utazót, aki épp megérkezik a Marsra. Már kiszállt a járműből, áll a jellegzetes marsi tájon, fázósan összehúzza magán köpenyét, amit néha meglobogtat a szél, és aggódva, de férfias elszántsággal vizsgálja a felhőket: lesz-e eső? Ilyen jelenetről nem esik szó *Kereszturi* könyvében, azonban minden benne van, amire az elképzelt helyzetben a marsutazó kíváncsi lehet. Hogy attól függően, hol áll és mikor, a hőmérséklet $+15\text{ }^\circ\text{C}$ vagy $-123\text{ }^\circ\text{C}$ lehet, és egy tengely körüli fordulat alatt akár $100\text{ }^\circ\text{C}$ -ot is változhat. A

túlnyomóan szén-dioxidból álló felszín közeli gáz (a marsi levegő) nyomása a földfelszíni érték századrészt sem éri el. Ami a csapadékot illeti, néha egy kevés jég, gyakrabban szárazjég, azaz szilárd szén-dioxid fordulhat elő.

Az általunk vizsgált könyv nem útikalauz, hanem átfogó elemzés a Marsról. Ezt közérthetően és sokoldalúan megvalósítani nem könnyű feladat. Amennyiben sikerül, akkor érdemes ellátni egy megfelelően figyelemkeltő címmel: *Fehér könyv a vörös bolygóról*. Műfaja tudományos ismeretterjesztő monográfia. Azért nem egyszerűen monográfia, mert közérthető. Annak a közönségnek érthető, aki szereti és tanulmányozza a csillagászatot. Ez feltételezhető, hiszen a könyv a Magyar Csillagászati Egyesület kiadványa.

Először a felszín kialakulásáról van szó, a tektonikáról és a vulkáni erők működéséről. Távoli megfigyelések és közvetlen mintavételek alapján lehetővé vált a földi tapasztalatokkal való összevetés. „A Mar-

son található vulkáni kőzetek össz mennyisége körülbelül $2 \cdot 10^8$ km³, amely másfél kilométer vastag réteggel tudná beborítani az egész égitestet. A vulkáni tevékenység keretében kibocsátott gáz mennyiségét körülbelül 10^{20} kg-ra becsülik, amely a jelenlegi légköri gázmennyiségnek 10–30-szorosa. A kitorések révén sok jég is megolvadhatott, és időszakos vízfolyások és tavak keletkeztek a felszínen, helyenként az Izlandon megfigyelhetőkhöz hasonló alakzatokat létrehozva.” (30. oldal)

A következő vizsgált tartomány a marsfelszín feletti: az ionoszféra és a mágneses tér jellemzése, a légkör és az éghajlat, valamint a H₂O (nem a víz, hiszen a folyadékfázissal lehet a legritkábban találkozni). Itt különösen szembezőkő a marsi viszonyok különbözősége a földtől: „Kis tengelyferdeségnél állandó pólussapkák lehetnek, alul vízjéggel, felette pedig szén-dioxid-jéggel. Az aszimmetrikus évszakok és a két félteke közötti domborzati különbség miatt előfordulhat, hogy csak az egyik póluson van sapka.” (62. oldal) A vízfolyásnyomok észlelése és a folyékony víz hiánya a múlt melegebb klímájára, a vulkánok melegítő hatására és olyan sóoldatok jelenlétére utalnak, amelyek jóval 0 °C alatt is cseppfolyósak maradnak.

A könyv legnagyobb terjedelmű, az elemzést támogató felvételekkel gazdagon illusztrált fejezete a fülbe-mászó *Klimatikus planetomorfológia* címet viseli. „Eltérő klimatikus viszonyok alatt más és más felszínformáló hatások dominálnak. Ennek megfelelően a felszín morfológiája magán viseli az éghajlattól függő nyomokat – és egy ideig őrzi is azokat. Ha pedig az éghajlat változik, és egy adott területen nem pillanatnyi állapotának megfelelő felszínformát látunk, akkor azokból az egykori éghajlat jellemzőire következtethetünk.” (89. oldal)

A pólussapkák felépülésére, a sárfolyások keletkezésére jelenleg különböző modellek próbálnak magyarázatot adni. A tónyomok, lejtősávok, gleccsernyo-

mok, a több milliárd éves csatornák – amelyeknek semmi közük a jó száz éve szenzációként tálalt, vélt épített hálózathoz – a termokarsztos mélyedések fényképes és elemző bemutatása révén lassanként megismerjük a Mars felületét.

A marsi üledékek és keletkezésük bemutatása számít emlékeinkre, netán tudásunkra szervesen kémiai-ból: „...a Marson az epszomit (MgSO₄·xH₂O) és amorf Mg-szulfát lehet stabil fázis, nem pedig a kieserit, noha utóbbiból is sok van. A kieserit kristályos polihidratált magnézium-szulfáttá alakulása 10–38%-os térfogat-növekedéssel járhat, ami feszültséget és deformációt okozhat a kőzetben. Gipszet a kieseritnél és a polihidratált szulfátoknál kevesebb helyen, de már azonosítottak a bolygón.” (125. oldal) Alapos kémiai tudás hiányában is imponáló a marsi üledékekről már eddig összegyűjtött ismeret.

A Marsról szerzett tudásunk mérhető oly módon is, hogy a földtörténeti korok rendszerével párhuzamba állítjuk a marsi korszakát. A három marstörténeti időszak elkülönítése a krátersűrűség alapján történik, de egyéb jellemzők (felszínformák elhelyezkedése, marsmeteoritok radiometrikus koradatai) is lehetővé teszik a történések időbeli leírását.

Ami a marslakókat illeti: a marsi élet lehetőségét egy rövid fejezet vizsgálja, hiszen a szerző részletesen foglalkozik a kérdéssel *Asztrobiológia* című könyvében. A lényeg ebből a fejezetből is világos: az élet esélyei a Mars történetének első 600 millió évében voltak a legjobbak. Manapság legfeljebb a halofilek, a sókedvelő mikrobák jöhetnek szóba.

Útikönyvnek tehát nem tekinthető Kereszturi Ákos munkája. De tekinthető *Kepler* programja folytatásának, aki azt írta az *Astronomia Nova* 2. fejezetében: „Egyedül a Mars teszi ugyanis lehetővé, hogy az asztrológia rejtett titkaiba behatoljunk.”

Füstöss László



METEOR CSILLAGÁSZATI ÉVKÖNYV, 2013

Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2012, 300 oldal

Circumcisio Domini – az úr körülmetélésének ünnepe az év első napja, tehát ezzel kezdődtek még párszáz éve is a verses kalendáriumok, és aki képes volt jól eligazodni bennük, az értette a csíziót.

A *Meteor csillagászati évkönyv* nagyobbik részét kivevő kalendárium nem ezzel indul, de aki gondosan

tanulmányozza a 175 oldalt, az az év csillagászati történéseit tekintve érteni fogja a csíziót.

A kalendárium hónapról hónapra egy táblázattal kezdődik, amely minden napra tartalmazza a Nap és a Hold legfontosabb adatait, valamint a Ladó–Bíró-féle Magyar utónévkönyv alapján a névnapokat. Az

eseménynaplár percnyi pontossággal közli a Nappal, Holddal és a bolygókkal történő eseményeket (például a Hold maximális librációjának időpontját, vagy hogy a Hold mögül mikor lép ki az 55 Leonis kettőscsillag). A bolygók és az üstökösök történéseivel minden hónapnál külön fejezet foglalkozik. Ugyancsak havonta találunk táblázatot a Hold csillagfedéseiről, és grafikonokat, néha táblázatokat a Jupiter-holdak és a Szaturnusz-holdak helyzetének alakulásáról. Külön beszámolókat foglalkoznak a napfogyatkozásokkal és holdfogyatkozásokkal akkor is, ha hazánk területéről nem láthatóak. Ezen kívül számos rövid, átlagosan féloldalsnyi írás szól nevezetes csillagászati helyekről, együttállásokról. Néha terjedelmesebb cikkek is akadnak közöttük, mint a *Csillagseregek-gömbbal-mazok a nyári égen*, vagy az *Őszi galaxisok*. A csillagászat-történet nevezetes évfordulói hónapról hónapra kapnak helyet. Ezek közül a csillagászatban kevésbé járatosak számára is ismerős a 200 éve meghalt *Joseph-Louis Lagrange* munkássága és a 100 éve született *Bernard Lovell*, a rádiócsillagászat angol úttörője. Nem kevésbé érdekes az októberi bejegyzés az első röntgenscsillagászati kép ötvenedik évfordulójáról.

Az amatőr csillagászok mindennapi igényeit szolgáló részt követik a cikkek.

Kálmán Béla *A napkutatás új eredményeiről* számol be. „Előző beszámolómban a Nappal kapcsolatos újdonságokról a 2011-es Meteor csillagászati évkönyvben jelent meg. Annak megírásakor már lát-szott, hogy nem igazolódik be az a pesszimista jóslat, miszerint új Maunder-minimum kezdődik és a napfoltok eltűnnek. A 2008. decemberi minimum után elkezdődött új, 24. napciklus beindulása kissé lassú volt, de megjelentek a nagyobb napfoltcsoportok és a nagyobb flerek is. ... az utolsó négy ciklus (amire a kutatók emlékeznek saját tapasztalatukból) mennyire hasonló, már-már szabályos volt, de a most elmúlt minimum sem volt példátlan. Mindazonáltal az érdeklődés élénk volt a Nap iránt, a Nemzetközi Csillagászati Unió közgyűlésére készített beszámoló szerint a 2008 – 2010-es években 4000 szerző 2000 tudományos közleménye foglalkozott a Nappal.” (185. oldal). Az eddigi ciklusok elemzése, a flerek alakulásának vizsgálata, az űrszondák széles spektrumban végzett megfigyelései számos kérdést tisztáztak a hosszúra nyúlt minimum körülményeivel kapcsolatban és a naptevékenység leírását is pontosították.

„A napmegfigyelő űreszközök mellékesen üstökös-megfigyeléssel is foglalkoznak. A SOHO koronográfjával elképesztő mennyiségű napsúroló üstökösöt sike-

rült felfedezni: 2012 áprilisáig legalább 2290-et.” (194. oldal). „Az ESA Proba2 nevű kis kísérleti holdja felvételein jól látható, amint a C/2011 W3 bebújik a Nap mögé, és háromnegyed óra múlva kibukkan a nyugati oldalon. Kifelé haladáskor szintén erős csóvatorzulások voltak megfigyelhetők, de a legérdekesebb az volt, hogy a perihélium előtti csóvát levette az üstökös, az tovább haladt a pályán mögötte, viszont a perihélium-átmenet után új csóvát növesztett a Nappal ellentétes irányban, ahogy illik.” (196. oldal)



Molnár László *Csillagok a Kepler fényében* című írásában a 2009-ben elsősorban exobolygók kutatása érdekében pályára állított Kepler űrtávcső csillagokat érintő eredményiből szemléz, az exobolygókat csak érintőlegesen említve. A cikkben vizsgált tíz különböző területből, ahol a Kepler nagy pontossága nélkülözhetetlen, két példát idézek: a vörös óriások mélyébe nézést, valamint a Trinity hármása kölcsönös fedéseinek elemzését. Az első esetben olyan vörös óriások összehasonlításáról van szó, amelyekben az energiatermelés a magban, illetve a héjban történik. „A két régióban a rezgések különbözőek: a felszínen hanghullámok, a mélyben pedig nehézségi hullámok jönnek létre, olyanok, mint a vízen a bedobott ka-

vics miatt. Léteznek azonban úgynevezett kevert módusok is, amelyek mindkét típus tulajdonságait mutatják, és képesek kijutni a magból... A Kepler pedig talált vörös óriásokban ilyen kevert módusokat, sőt annyi csillagnál sikerült ilyeneket azonosítani, hogy immár szét tudjuk választani a két populációt, és külön-külön vizsgálhatjuk azokat.” (200. oldal)

A Trinity esetében egy vörös törpe pár kering a főcsillag körül. „A három csillagnak hasonló a felületi fényessége, és látjuk a törpék kölcsönös fedéseit. Amiért ezek a rendszerek jelentősek az az, hogy három égitest már nem egyszerű Kepler-pályákon kering egymás körül, hanem folyamatosan perturbálják egymás mozgását, és ezt már a Kepler élettartama alatt nyomon követhetjük.” (204. oldal) A Trinity analízise magyar kutatók vezetésével jelent meg a *Science*-ben, ami nem mindennapi teljesítmény.

Új típusú szupernóva-robbanások a címe *Vinkó József* írásának, amelyet a szupernóvák osztályozásával indít. Az osztályokba sorolt szupernóvák eredetét, kialakulási mechanizmusát illetően többnyire egyetértés van, megengedve egy-egy alternatív változatot. A szupernóvák felfényesedésének időbeli lefutását jellemző fénygörbe jól érthető kapcsolatban van a ledobott burok tömegével, tágulási sebességével, sűrűségével. Ezt a viszonylag megnyugtató összhangot zavarták meg a 2000-es évek felfedezései. A hagyomá-

nyos szupernóváknál 5-6 magnitúdóval halványabb, jellegzetes spektrumú SN-imposztorok kitörését a csillag túléli, és néhány éven belül hasonló kitörésre lehet számítani. A maig megoldásra váró kihívást a 2005 után sorozatosan megfigyelt, az addigi legfényesebbnél is két magnitúdóval fényesebb szuperfényes szupernóvák (SLSN) jelentik. Magyarozatként számos elméleti modell látott napvilágot, de igazán meggyőző nincs közöttük. „A rejtélyek egyre szaporodnak, ezek megoldásához mindenképpen új ötletekre, innovatív észlelési/mérési megoldásokra van szükség, ami komoly vonzerőt jelenthet a fiatal kutatók, sőt, akár az amatőr csillagászok számára is.” (220. oldal)

Mosoni László a szögfelbontás interferometrikus növeléséről ír *Amíg a 100 méteres távcsövek elkészülnek* címmel. A lényegét az alcím foglalja össze: *Nagy szögfelbontású megfigyelések csillagászati interferométerekkel*. Az interferométerek fontosságának érzékeltetésére a dolgozat végéről idézünk: „Amikor a 30-40 méteres extrém nagy távcsövek megépülnek, még akkor is körülbelül egy nagyságrenddel elmarad a szögfelbontásuk a jelenlegi csillagászati interferométerekétől.” (239. oldal) Érdemes tehát követni az optikában kevésbé járatosak számára nem túl könnyű írás gondolatmenetét. De van választásunk: tudomásul vesszük, hogy egy bonyolult eljárással növelhető a szögfelbontás, majd követhetjük az elmúlt ötven év fejlesztési eredményeinek és alkalmazásainak történetét. Bele is tanulhatunk a szakmába, amelynek körvonalazása megtörténik a cikkben, a részletek megértése viszont ránk van bízva – az internetet használva nemcsak magyarázathoz, de tervrajzokhoz, animációhoz juthatunk az ajánlott linkek segítségével. Valamelyes hullámtani ismeretek birtokában webmentesen is megérthetjük a cikkből az alapfogalmak – a bázisvonal és a vizibilitás – jelentőségét, és így részleteiben

tudjuk követni a szerzőt a VLTI-k (Very Large Telescope Interferometer) világába, amelyek harmadik generációját 2025-re tervezik.

Befejezésül *Wim van Driel* cikkének fordítását olvashatjuk: *Az SKA – úton egy globális óriás rádiótávcső felé*. „Az SKA, Square Kilometre Array, azaz Egy Négyzetkilométeres Teleszkóp. Mint a név is sugallja, a tervek szerint óriási, egészen pontosan egy négyzetkilométernyi felület fogja gyűjteni a rádiósugarakat, amelyekből az Univerzumnak egy teljesen új látképe fog kirajzolódni... Az SKA által lefedett hullámhosszak 4 m-től 3 cm-ig terjednek, ami frekvenciára átváltva 70 MHz-től 10 GHz-ig tart.” (242. oldal) Olvashatunk a cikkben az SKA technológiájáról, néhány alapparaméteréről, az apertúrarácsok felépítéséről és a jeltovábbító rendszerről. És ami a legfontosabb: az SKA öt kulcsfontosságú tudományos projektjéről:

1. Galaxisfejlődés, kozmológia és sötét energia: hogyan fejlődnek a galaxisok és mi a sötét energia?
2. A gravitáció tesztelése pulzárokkal és fekete lyukakkal: igaza volt-e Einsteinnek?
3. Kozmikus mágnesség: honnan ered a kozmosz mágnessége?
4. Az élet bölcsője: az élet és a bolygók keresése
5. Pillantás a sötét korszakba: az első fekete lyukak és csillagok.

Ráadásul, ami tervezhetetlen: ki tudja, mit találunk még.

A csillagászati évkönyv ismeretterjesztő cikkeihez ezúttal is látványos, színes ábrák tartoznak.

A kötetet a Magyar Csillagászati Egyesület, az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet, az ELTE Csillagászati Tanszéke és a Bács-Kiskun Megyei Csillagvizsgáló Intézet beszámolóí zárják.

Füstöss László

HÍREK – ESEMÉNYEK

120 ÉVE SZÜLETETT LÁNCZOS KORNÉL

Lánczos Kornél, a kvantummechanika egyik úttörője, világhírű matematikus 1893. február 2-án Székesfehérváron született [1]. Édesapja *dr. Löwy Károly* – aki 1906-ban kérte gyermekei családi nevének Lánczosra változtatását – neves ügyvéd, 23 éven keresztül az Ügyvédi Kamara elnöke, valamint a Zsidó Hitközség

elnöki tisztét is betöltötte. Édesanyja *Hahn Adél* szintén székesfehérvári lakos volt, kitűnő zongorista, gyakran adott koncerteket jótékony célokra. Az öt testvér közül Kornél volt a legidősebb.

Lánczos Kornél gimnáziumi tanulmányait a székesfehérvári Cisztercita Főgimnáziumban végezte. Iskolas éveiben sokat betegeskedett, de ennek ellenére tanulmányait végig jelesen végezte. 1910. június 20-án érettségizett, ezután a Budapesti Tudományegyetemen tanult tovább, ahol kísérleti fizikát *Eötvös Loránd*-nál, elméleti fizikát *Fröhlich Izidornál*, matema-

A szerzők ezen írásukat *Ronyecz József* volt székesfehérvári fizika-matematika szakos főiskolai tanár, Lánczos-kutató emlékének ajánlják, akinek több mint két évtizedes szorgalmas kutató-gyűjtő munkája nélkül ez a cikk nem jöhetett volna létre.

tikát *Beke Manónál*, *Rados Gusztávnál* és *Fejér Lipótnál* hallgatott. 1916-ban szerezte meg a tanári diplomát. A relativitáselmélet iránti érdeklődését *Zemplén Győző* műegyetemi tanár előadásai keltették fel és vezették életének egyik fő kutatási területéhez.

1916 és 1920 között a Műegyetemen *Tangl Károly* tanársegédjeként a fizikai előadások kísérleteit készítette elő. Érdeklődése már ekkor az elméleti fizika felé irányult, és ebben a témakörben *A Maxwell-féle éter-elmélet függvénytani vonatkozásai* címmel írta meg doktori értekezését 1919-ben. Disszertációjának tervezett szövegét véleményezésre megküldte *Einsteinnek*, *Lauénak*, *Plancknak* és *Sommerfeldnek*. Einstein 1920. január 22-én az alábbi válaszlevéllel méltatta Lánzos Kornél munkáját:

„Munkáját oly részletességgel olvastam, amit a mai túlterheltségem megengedett. Így mondhatom, hogy az derék és eredeti gondolati munka, amelynek alapján Ön méltó a doktorátusra. A nekem szánt megtisztelő ajánláshoz szívesen hozzájárulok.”

Disszertációját 1921-ben védte meg *Ortway Rudolf* szegedi professzornál. Értekezése 50 példányban német nyelven jelent meg, *Németh József* könyvkereskedésének közvetítésével.

1920-ban már többször járt Németországban és tagja lett a Német Fizikai Társaságnak.

Einstein figyelmét *Szilárd Leó* hívta fel Lánzos Kornélra, aki disszertációja megvédése után 1921-ben találkozott Einsteinnel, amelyre később így emlékezett: „Első megbeszélésem Einsteinnel akkor volt, amikor 1921-ben Németországba mentem. Csupán néhány perces beszélgetésre nyílt alkalom két előadás közti szünetben. Borzasztóan csodáltam őt, és valóságos remegés fogott el, szívem hevesen dobogott, amikor a folyosón messziről láttam, hogy közeledik felém.” [2, 40. old.]

Az ő biztatására kezdett intenzíven foglalkozni a relativitáselmélettel, és ettől az időtől fogva Einstein gyakori vendége volt a berlini egyetemen.

Az I. világháború után úgy érezte, hogy hazájában nem tudja kibontakoztatni tudását, így arra kényszerült, hogy elhagyja Magyarországot és Németországba menjen dolgozni. 1921–1924 között Freiburg egyetemén *Franz Himstedt* asszisztense. Az ő irányításával rövid idő alatt nyolc dolgozatot publikált az Einstein féle gravitációelmélet témaköréből. 1924 ősztől *Madelung* asszisztense volt Frankfurt am Main J. W. Goethe Egyetemén. Feladatul kapta Madelung könyve második kiadásának előkészítését. Az itt eltöltött évek

során Lánzos Kornél kiváló matematikai ismeretekre tett szert. Lánzos az integrálegyenleteket a fizika egy akkor új területén, a sugárzási tér struktúrájának értelmezésére alkalmazta. Megmutatta, hogy a fény rejtélyes kvantumstruktúrája és az atomok elektrodinamikai viselkedése az integrálegyenletekkel leírható folytonos mezőelmélettel jól jellemezhető.

Lánzos Kornél ezt a mezőszemléletet alkalmazta a kvantummechanikai problémák megoldásában is. 1925-ben – mindenkit megelőzve – bizonyította, hogy a Heisenberg–Born–Jordan féle mátrixmechanika és az általa kidolgozott, mezőszemléleten alapuló integrálegyenletekre alapozott megfogalmazás között teljes és konzekvens kapcsolat van.

1926-ban a *Zeitschrift für Physik*ben közölt tanulmányában Lánzos ezt írja: „a kvantumelmélet minden eredménye integrálegyenlettel is kifejezhető. Ily módon, annak egy olyan megfogalmazását kapjuk, amely közelebb áll az analitikus módszerekhez szokott fizikushoz, mint a mátrixos ábrázolás. Ezáltal egy kontinuum-felfogáshoz jutunk, amely a diszkrét mátrixleírással egyenrangúan használható. A két módszer matematikailag teljesen egyenértékű. Ami a kvantumok mélyebb értelmét illeti, nincs kizárva, hogy a

mátrixmegfogalmazásnál esetleg értékesebb lesz az integrálos megfogalmazás, hiszen ez utóbbi közvetlenül összeegyeztethető a térelméleti gondolkodással, amitől pedig a mátrixos megfogalmazás teljesen idegen.” [3]

Lánzos ezzel egy hónappal megelőzte *Erwin Schrödinger* differenciálegyenletre alapozott hullámmechanikáját.

Lánzos még két dolgozatában tér vissza a témakör matematikai részének árnyaltabb kifejtésére anélkül, hogy munkáját a szakmai közvélemény megérdemelt figyelemmel kísérte volna. Ezért Lánzos ezen problémák megoldására alkalmas elméletét nem fejlesztette tovább – bár később sem tagadta meg a kvantummechanika mezőszemléletű megközelítését és későbbi cikkeiben gyakran foglalkozott e témával –, hanem visszatért az általános relativitáselmülethez.

A Goethe Egyetemen eltöltött évek életének talán legtermékenyebb időszakát jelentették. 1921–1931 között 30 jelentős dolgozatot publikált. 1927-ben tudományos fokozatot szerzett és egyetemi magántanári kinevezést kapott a frankfurti egyetemen, ahol hallgató volt *Rupp Mária Erzsébet*, aki megnyerő szépségével felkeltette Lánzos Kornél figyelmét és 1928. január 5-én házasságot kötöttek Frankfurtban. Ekkor



Lánzos Kornél – Schmidt Gábor rajza



Lánczos Kornél emléktáblája Székesfehérváron, a Szent István tér 4. számú ház falán.

Lánczos Kornél már világhírű tudósnek számított, és tudományos pályája meredeken emelkedett.

Einstein munkatársa, *David Grommer* orosz matematikus megbetegedett, és a megüresedett tanársági állásnál ismét Szilárd Leó hívta fel Einstein figyelmét Lánczos Kornélra. 1928. szeptember 29-én maga Einstein fordult levélben Madelunghoz, Lánczos frankfurti főnökéhez, járuljon hozzá, hogy Lánczos Frankfurtban egy év szabadságot kapjon, így Berlinben vele dolgozhasson [2, 49. old.]. Lánczos a felkérést örömmel fogadta, az 1928/29-es tanévben már Einstein legközvetlenebb munkatársaként Berlinben dolgozott.

Ezután is, egészen Einstein haláláig, megmaradt közöttük a személyes barátság [1].

Einstein mindenki előtt nagy elismeréssel jellemezte kollégája tudását. Lánczos iránti rokonszenvét gondolkodásuk és jellemük hasonlósága váltotta ki, amit jól bizonyít 1942. március 21-i, Lánczoshoz írt levelének két mondata: „Ön az általam ismert egyetlen olyan ember, akinek ugyanolyan a hozzáállása a fizikához, mint az enyém. Hisz abban, hogy a valóság felfogható, logikailag egyszerű és egységes.” [2, 81. old.].

A berlini év letelte után Einstein az alábbi szavakkal ajánlotta a kiváló tudóst Frankfurtba, hogy katedrát kapjon:

„Lánczos Kornél úr kétségkívül tehetséges és önálló elméleti fizikus, aki alkalmas egyetemi tanárnak. Alaposan ismeri a relativitás elméletét, de a kvantummechanikában is eredményesen dolgozik. Külön kiemelendő, hogy mindig a nehéz kérdések ragadják meg érdeklődését, nem pedig a könnyen elérhető célok.” [2, 55–56. old.]

1931-ben Lánczos Kornél meghívást kap az Egyesült Államokba az Indiana állambeli Lafayette város Purdue egyetemére, mint a matematika-fizika professzora. Bár nagyon vágyakozott vissza Európába, de a Németországban kialakulóban lévő fasizmus maradásra készítette. A második világháború időszakában 1943–44-ben matematikus beosztásban a National Bureau of Standard alkalmazottja. Ezt követően szenior kutató a Boeing repülőgépgyár Airplane Com-

pany székhelyén, a Washington állambeli Seattle-ben 1946 és 1949 között. Ezután 1952-ig a Kaliforniai Egyetem Numerikus Analízis Intézetében kutató professzor. Amerikai munkássága főleg az *alkalmazott matematika* területére esett. Intenzív alkotómunkájára jellemző, hogy ebben az időszakban húsznál több publikációja és három könyve jelent meg, többségében a numerikus matematika területéről. Fő kutatási területe ebben az időben a *variációszámítás*, a *Fourier-sorok*, a *differenciál- és integrálegyenletek megoldási módszerei*, *lineáris algebra*. Ezen a területen számos tételt az ő nevével jegyeznek.

Az intenzív munkával telt amerikai évek után 1952-ben visszatért Európába és Írországból a dublini Institute for Advanced Studies professzora lett. Itt újból a gravitáció, elektrodinamika és a hullámmechanika egységes elméletén dolgozott. Az itteni kutatási eredményeiről számolt be 1973-ban az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi vándorgyűlésén abból az alkalomból, hogy a társulat tiszteletbeli tagjává választották. Elméletét, amelyben sikerült ötvöznie a gravitáció, elektromosság és kvantummechanika törvényeit, *dinamikus relativitásnak* nevezte.

Lánczos Kornél igen művelt ember volt. Három nyelven beszélt anyanyelvi szinten. Kiválóan zongorázott, dublini lakásán gyakran tartott zenei összejöveteleket. Ragyogó előadói képességével, jellegzetes gesztusaival a hallgatóság figyelmét teljesen lekötötte. A matematikában elért eredményeiért – a mátrixok elméletében nyújtott teljesítményéért – 1960-ban az Amerikai Matematikai Társaság legmagasabb kitüntetését, a Chauvenet-díjat ítéltek neki. Négy egyetem választotta díszdoktorává.

Lánczos Kornél kétszer nősült. Első felesége 1938-ban tuberkulózisban meghalt. Édesapja 1939-ben bekövetkezett halála után az ügyvédi irodát *Andor* fia vezette tovább, aki már korábban is édesapja munkatársa volt. 1939-ben Lánczos Kornél megkapta az amerikai állampolgárságot, ekkor hazajött *Elmár* fiáért és magával vitte Amerikába, megmentve őt a fasizmus könyörtelenségétől. Édesanyját, öccsét és annak fiát 1944-ben Auschwitzba deportálták és – egy unokaöccse kivételével – mindnyájan ott lelték halálukat. Elmár 46 éves korában, hosszú betegség után halt meg az Egyesült Államokban. Második felesége *Ilse Hildebrand* 1974-ben Dublinban hunyt el.

1974-ben a Magyar Tudományos Akadémia meghívására ismételen hazlátogatott és budapesti tartózkodása közben váratlanul érte a halál június 24-én. A Farkasréti temető izraelita részében helyezték örök nyugalomra. *Marx György* ezekkel a szavakkal búcsúztatta:

„Oly viharos korban élt, amikor milliók sorsa volt a számkivetettség. Bármilyen messze sodródott is szülőhazájától, lelke mélyén mindig az itthoni élmények és emlékek éltették. A hazájához való kötődés tragikusan szép beteljesedése, hogy földi életútja a fehérvári reményteljes indulás, az egyre távolabbra sodródások után, éppen hazaérkezésekor ért véget immár mindörökre...”

A nagy tudós nem csak hazájába, hanem szülővárosába, Székesfehérvárra is végleg hazaérkezett. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat centenáriumi évében, 1991. május 17-én ünnepi előadónál alkalmával avatták fel Lánzos Kornél fehérvári éveit megörökítő emléktábláját, amelyet volt lakóháza falára helyeztek el. Az emléktáblát a Társulat elnöke, Marx György avatta fel.

Két évvel később, 1993. február 2-án – születésének századik évfordulója alkalmából – az MTESZ Fejér Megyei Szervezete Centenáriumi Emlékülésen méltatta a város nagy tudósa munkásságát. Az emlékülés résztvevői ebből az alkalomból megkoszorúzták a tiszteletére emelt emléktáblát.

Fejér Megye középiskoláiban az évenként megrendezésre kerülő középiskolai fizikaversenyeket Lánzos Kornél nevével jegyzik. Székesfehérvár Megyei Jogú Város Közgyűlése 1993. január 21-én kelt határozatával Lánzos Kornél és a kiváló történettudós *Szekfü Gyula* tiszteletére Lánzos–Szekfü Alapítványt hozott létre a tudomány, irodalom, művészet fiatal művelőinek támogatása céljából.

A Közgyűlés ugyanezen a napon kelt határozatával szülővárosában Lánzos Kornélról utcát neveztek el. Gondolkodására és érzelmi világára talán legjellemzőbb az alábbi mondata:

„A görög kultúra nagy érdeme, hogy a kozmosz és a kozmetika fogalmát azonos szótöbblől eredezteti: szépség.”

Schmidt Gábor, Varga János

Irodalom

1. Györgyi Géza: Lánzos Kornél. *Fizikai Szemle* 24/6 (1974) 166.
2. Marx György, Ronyecz József (szerk.): *Lánzos Kornél 1893 / 1993*. Fejér Megyei Levéltár Közleményei 15., 1993.
3. Marx György: Lánzos Kornél (1893–1974). Előadás a székesfehérvári Lánzos-centenáriumon, 1993. február 2. *Fizikai Szemle* 43/3 (1993) 81.
4. Ronyecz József: *Lánzos Kornél élete és munkássága*. Székesfehérvár Megyei Jogú Város Önkormányzata, Székesfehérvár, 2002.
5. A „Lánzos Kornél – Szekfü Gyula Ösztöndíj” Alapítvány 10. Éve. Székesfehérvár, 2002.
6. Lánzos Kornél: *Einstein évtizede 1905–1915*. Gyorsuló idő sorozat, Magvető kiadó, 1978.
7. Gellai Borbála: A „belső kell” (Lánzos Kornél élete és munkássága). *Magyar Tudomány* 1993/9, 1139–1148.

KITÜNTETÉSEK

Honoris causa Jedlik Ányos-díj

Honoris causa Jedlik Ányos-díjat vehetett át *Gyulai József*, az MTA rendes tagja, az MTA Természettudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének Széchenyi-díjas kutatóprofesszora, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem professzor emeritusa, az Eötvös Loránd Fizikai Társu-

lat volt elnöke és jelenlegi tiszteletbeli elnöke. A honoris causa Jedlik Ányos-díj adományozására két-évente kerül sor. Azon kiemelkedő személyiségek kaphatják meg, akik életművükkel, közéleti tevékenységükkel nagyban hozzájárultak a hazai szellemi tulajdonvédelmi kultúra és tudatosság fejlődéséhez.

Széchenyi-díj

Március 15-én Széchenyi-díjat kapott *Horváth Dezső*, az MTA doktora, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézete Nagyenergiás Fizikai Osztályának vezetője a kísérleti atom-, atommag- és részecskefizika terén végzett, nemzetközi elismerést is kiváltó kutatásaiért, különösen az anti-

hidrogén előállításában és spektroszkópiai vizsgálatában, továbbá a szimmetriaelvek ellenőrzésének pontosításában és a feltételezett Higgs-részecske tömegének behatárolásában elért eredményeiért, kiváló oktatói és ismeretterjesztői tevékenysége elismeréseként.



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!**

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

A Wigner FK RMI-ben készült műszer a Nemzetközi Űrállomáson

2013. február 11-én Bajkonurból magyar idő szerint 15:41-kor a Progressz M-18M orosz teherűrhajó indult a Nemzetközi Űrállomáshoz (ISS), amely nemcsak utánpótlást visz az űrhajósoknak, hanem kísérleti berendezéseket is, köztük a nemzetközi összefogással megépített Obstanovka (magyarul: környezet) műszeregyüttest. Az Obstanovka a magnetoszféra és az ionoszféra kutatására készült műszeregyüttes több ország kutatói és mérnökei több évig tartó fejlesztésének eredménye. A műszeregyüttes orosz, ukrán, svéd, lengyel, bolgár, angol, magyar kutatócsoportok együttműködésében készült, amelynek keretében 11 érzékelő műszer szolgáltat adatokat a fenti jelenségek tanulmányozására. A műszerek az ISS ellentétes oldalának külső felületén, két egységben kerülnek elhelyezésre.

Magyarországról az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont (korábbi nevén KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet), az Eötvös Loránd Tudományegyetem Űrkutató Csoportja, az SGF kft. és a BL Electronic vett részt a fejlesztésben. A Wigner FK feladata volt az elosztott intelligenciájú számítógépes rendszer fejlesztése az Obstanovka kísérlet számára. A három számítógépből álló rendszer vezérli a 11 érzékelő műszert és fogadja a detektorok adatait, valamint átmenetileg tárolja az adatokat azok Földre való juttatásáig. Egy-egy számítógép az űrállomás külső falán kezeli az érzékelő egységeket, míg a harmadik az űrállomás belsejében tárolja az adatokat. A beltéri számítógép feladata még a földi vezérlő parancsok értelmezése és végrehajtása, amelyek egy Ethernet típusú hálózaton

keresztül jutnak a rendszerbe. Az adattárolás cserélhető mágneslemezes egységen történik, amelyet fél-évente teherűrhajóval hoznak vissza a Földre. Erre azért van szükség, mert az űrállomás vezérlése és állapotának ellenőrzése a rövid rádiókapcsolati időtartományban prioritást élvez a tudományos mérési adatokkal szemben és nem garantált a begyűjtött tudományos adatok hiánytalan továbbítása.

A felső légkör vizsgálatának egyik fontos eleme a villámok keltette whistler-szerű jelenségek megfigyelése és kiértékelése. A whistlerek (magyarul: fütty) szélessávú elektromágneses impulzusok, amelyek belépnek az ionoszférába és onnan a magnetoszférában folytatják útjukat, a plazmában továbbterjednek és a villámok keletkezésétől nagy távolságokra is vehetők megfelelő rádiófrekvenciás vevővel. Megfigyelésük az ionoszférában zajló energiaátviteli és hullámterjedési folyamatok kutatását segíti elő. Az ELTE és a BL Electronic kft. fejlesztése az Obstanovka SAS3 érzékelő műszere. A SAS3 feladata, hogy a Föld körüli térségben fellépő whistlerek hatását vizsgálja az ionoszférában mérhető mágneses és elektromos térerő változásainak megfigyelésével. Az SGF kft. fejlesztette az Obstanovka plazmahullámmérő rendszer földi ellenőrző berendezését, amely lehetővé tette a műszerek működési paramétereinek vizsgálatát az űrállomás igénybevétele nélkül. Ez a földi egység biztosítja a detektorok tudományos mérési adatainak grafikus kiértékelését nemcsak a tesztelesek során, de az űrbeli működés közben kapott telemetria adatok feldolgozásával is.

<http://www.rmki.kfki.hu>

A teljes égboltot figyeli majd a hazai fejlesztésű kamerarendszer

Szokatlan koncepción alapul az a 19 egyedi kamerából álló csillagászati műszer, amelyet *Pál András* asztrofizikus és csoportja épít az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontjában.

A csillagászatban elterjedt műszerek jelenleg az égboltnak csak kis területét tudják megfigyelni. A nagyobb távcsövekre ráadásul hatalmas a túljelentkezés, ezért egy-egy érdekes objektumot nem lehetséges hosszabb időn át észlelni. Erre a problémára adhatnak megoldást az olyan programok, mint például a nagy égboltfelmérő projekt, a *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST), amely néhány naponként készít felvételeket a teljes látható égboltról.

Hasonló célt tűztek ki az MTA CSFK CSI kutatói is, akik Pál András, az MTA Lendület programja nyertese vezetésével egy 19 egyedi kamerából álló műszert – úgynevezett légyszemkamerát – fognak építeni. A csoport olyan műszert tervez és készít, amellyel a

teljes égbolton, a gyakorlatban 30 foknál nagyobb horizont feletti magasságnál tudják megfigyelni a 15 magnitúdónál fényesebb égitestek fényváltozásait – a percestől akár több éves időskálán átítelve.

A légyszemkamera mechanikus része nem megszo- kott: a mozgatásról, azaz a Föld forgásából adódó, látszó mozgás kompenzálásáról egy hexapod, más néven Stewart-platform gondoskodik. A hexapod maga sem hétköznapi konstrukció, egyik legismertebb alkalmazása például a repülőgép-szimulátorok mozgatása. Mint arra a neve is utal, ez a mechanikus szerkezet egy hat lábon álló platform, amely hasznos teher – jelen esetben a 19 egyedi kamera – mozgatását a lábak hosszának változtatásával éri el. Ez a megoldás mellett, hogy igen precíz pozicionálást tesz lehetővé, hibatűrő is: ha a hat lábból három be is ragadna, a műszer a megfigyelések igényeinek megfelelően még mindig mozgatható.

„Ez a hibatűrő viselkedés, valamint számos hasonló jellegű elektronikai vagy vezérléstechnikai megoldás is azon alapelv következménye, hogy a műszerrendszerben nem lesznek egyedi vagy kitüntetett alkatrészek – magyarázta Pál András. – Azaz, ha valamelyik komponens leállna vagy meghibásodna, az eszköz továbbra is teljes értékű működésre lenne képes.”

De mire lehet majd használni a műszert? A kutatók szerint szinte bármire, amihez jó időbeli lefedettségű fotometriai mérésekre van szükség. Ez rengeteg új felfedezés lehetőségét rejti magában, hiszen igen kevés olyan égitest van, amelyről széles, mintegy hat nagyságrendet átfogó időskálán készülnek mérések – sok újdonságot hozhat például az aktív csillagok, pulzáló változók, exobolygók és a fiatal csillagok kutatásában is. Tranziens, vagyis átmeneti jelenségek (gamma-kitörések, szupernóvák) gyors és akár visszamenőle-

ges megfigyelése is lehetséges lesz, hiszen a kutatóknak nem kell értékes perceket pazarolniuk azzal, hogy a távcsövet a forrás felé fordítsák. A tranziens jelenségekhez hasonlóan a Föld mellett elhaladó, esetlegesen veszélyes kisbolygók is detektálhatóak lehetnek.

A *Lendületes* kutatók hosszú távú tervei között szerepel egy több légerszemkamerából álló hálózat kiépítése is: mintegy 10 egyforma, de megfelelő földrajzi pontra elhelyezett műszerrel a Nap közvetlen környezetét leszámítva a teljes éggömb időben folytonos módon lefedhető. Az első lehetséges helyszín a Kanári-szigeteken, Tenerifén lenne, az IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias) által üzemeltetett Teide Observatóriumban, ahol a csoport lehetőséget kapott rá, hogy a prototípust tesztelje. Ez a hely később állandó helyszíneként is működhet.

<http://mta.hu>

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Hogyan kell a vízen járni?

Ha elegendő kukoricakeményítőt öntünk az úszómedencébe, átsétálhatunk a víz felszínén. A tudósok most felfedték ezen YouTube-trükk titkát. Amikor láb éri a vízben lebegő részecskéket, összetapadnak, mint amikor a hó felgyülemlik a hókotró előtt. Ez a tömörülés egy kemény foltot hoz létre, ami olyan csonttörő nyomással reagál az érintésre, mint egy magassarkú cipő sarka, állítják a kutatók a *Nature*-ben megjelent cikkükben. „Ha ezt a szuszpenziót megütöd, eltörhet a csuklód is” – mondja *Scott Waitukaitis*, a Chicagói Egyetem fizikusa, akit azok a videók ösztönöztek a kutatásra, amelyeken emberek szaladgáltak a furcsa elegyen.

A kukoricakeményítőhöz egyenlő vagy nagyobb arányban adott víz már hosszú ideje sztárja a látványos kísérleteknek, hála a keverék Jekyll – Hyde tulajdonságú viselkedésének. Egy nem-newtoni folyadék nem úgy viselkedik, mint a szokásos folyadékok. A belenyúló kéz könnyedén mozog benne, de ha az ember megüti a felszínt, az visszaüt!

A működő erők megértéséhez a kutatók a keveréket egy fémrúddal ütögették és figyelték az ellenhatást. A korábbi kísérletekben az anyagot két lemez között dörzsölték – ez egy szokásos technika folyadékok vizsgálatra, de ilyenkor valójában a súrlódást (nyírást) vizsgáljuk a közvetlen visszahatás helyett.

Az átlátszatlan keverék röntgen-vizsgálata felfedte, hogyan mozog az anyag a felszín alatt. Az adatokon alapuló szimuláció szerint a kezdeti behatás kinyomja a vizet a részecskék közti térből. Akcióba lép a részecskék közötti súrlódás. Összesűrűsödnek egy frontba, amely úgy viselkedik, mint a szilárd anyag, és visszaüt a fémrúdra.

„Nem lepott meg túlságosan az eredmény” – mondta *Daniel Bonn*, az Amszterdami Egyetem fizikusa, aki hasonló mechanizmusra gyanakodott, miután lövedékeket lőtt a keverékbe. „A kísérlet érdekesebb volt, mivel belelátni a keverék belsejébe, ahogy az sűrűsödik.”

Bonn és Waitukaitis reméli, hogy a kukoricakeményítő viselkedésének megértése segíti majd a kutatókat, akik azon dolgoznak, hogy „folyékony” testpáncélt hozzanak létre úgy, hogy a kevlart hasonló tulajdonságú szuszpenzióban áztatják. Figyelmeztetnek azonban arra, hogy nem minden szuszpenzió viselkedhet hasonlóan.

Évtizedes vizsgálatok után sem értjük, hogy a kukoricakeményítő külső behatásra miért viselkedik így, míg például a futóhomok és a ketchup éppen-séggel hígul, pedig mind folyadékban szuszpendált részecskékből állnak.

<http://www.sciencenews.org>

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 örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

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

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

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

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

FAKÍRÁGY LÉGGÖMBNEK, PIZZATÁVTARTÓBÓL

Härtlein Károly György

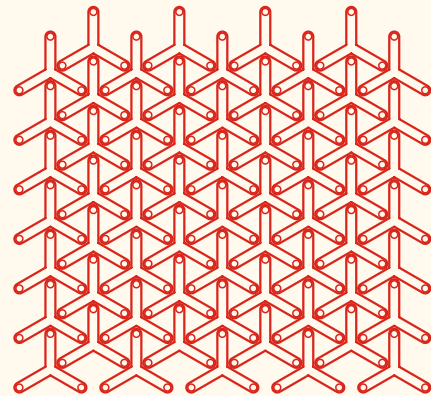
tanuló, Gárdonyi Géza Általános Iskola, Budapest

Mottó:
Romhányi József:
Egy boldogtalan sünnnek panaszai a halovány holdnál

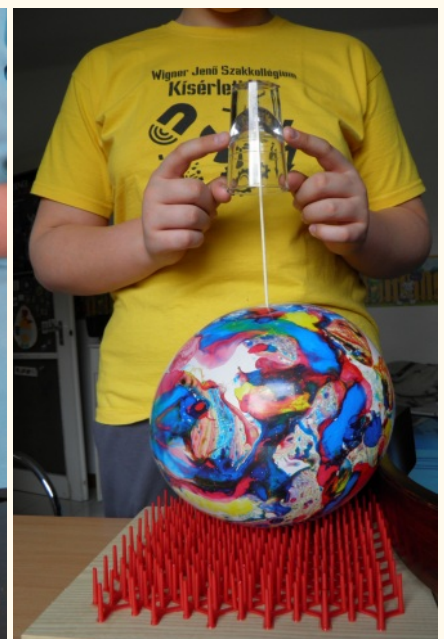
Sanyarú sors, te szabtađ rám gúnyámat,
céltađbláját az emberek gúnyának.
Engem senki sem cirógat, becézget,
mert a bőřöm egy kicsikét recézett.
Hogy irigylem a nercet, a hódotkat!
Nekik kijár elismerés, hódotlat.
Hányszor kértem a bennfentes rókától,
hogy legyen az én ügyemben prókátor.
Könyörögtem: „Szólj a szűcsnek, bátyuska,
protezsálj be prêmesállat státusba!”
Vagy vegyen be legalábbis bélésnek...
De hiába! Nem enged a kérésnek.
Értékemért agyon sose csapnáának,
nem kellek én se muffnak, se sapkáának...
Így kesergett sündörögve, bujkálva,
Míg egy fakír nem került az útjába.
Az felkapta, gyönyörködve vizsgálta:
– Jössz a szégeságyamra, te kispárna!

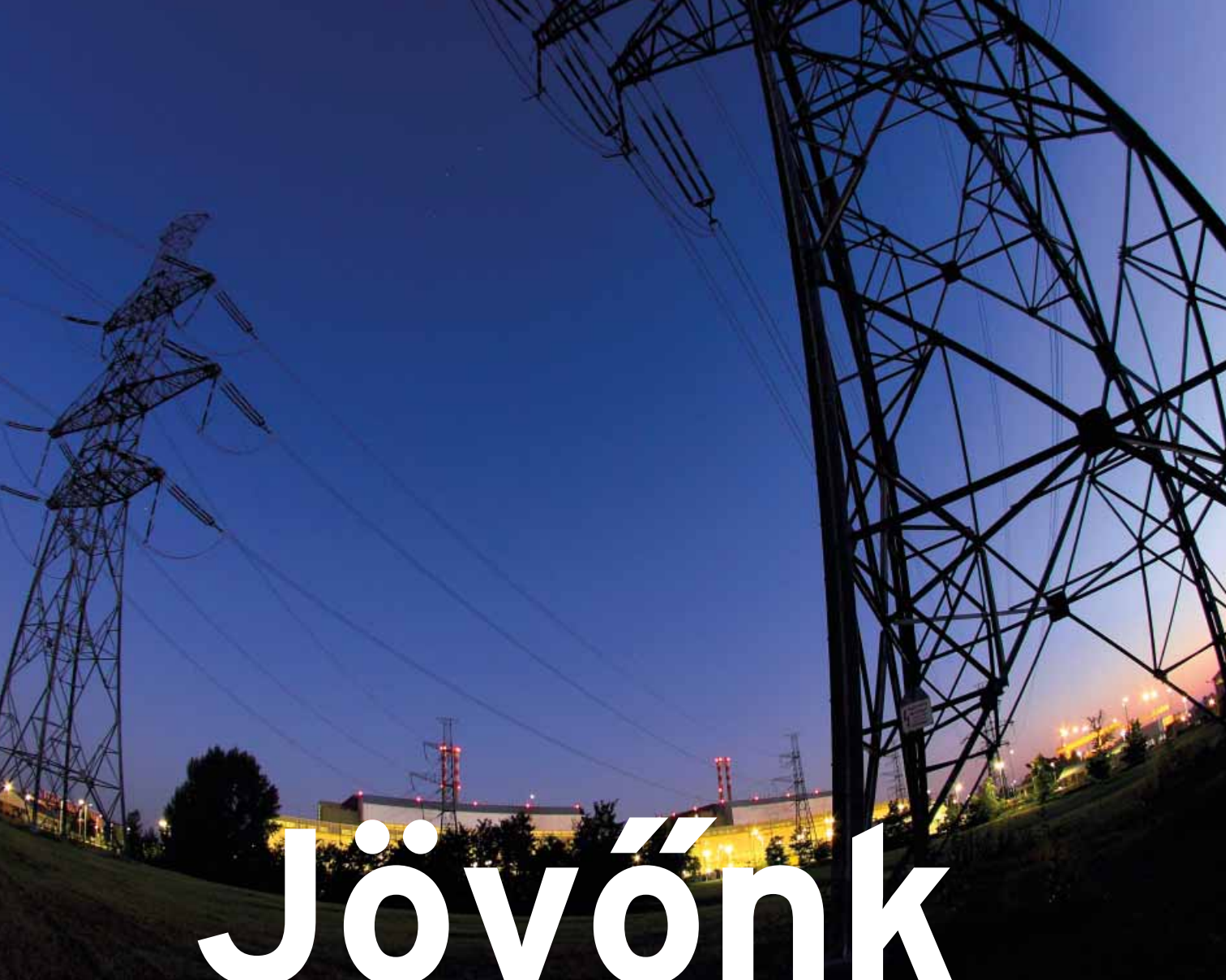
Kísérletemet a fizikaórán a nyomásról tanultak szemléltetésére készítettem. Mindennapi tapasztalat, hogy a léggömb könnyen kiszúrható egy hegyes tárggyal, például tűvel, szöggel vagy fogpiszkálóval, mert kis felületen érintkezik vele. Megpróbáltam a hüvelykujjam ujjbegyével kipukkanasztani egy lufit – rájöttem, hogy esélytelen vagyok. Ekkor eszembe jutott a nyomás képlete: a nyomás egyenlő a nyomóerő és az érintkező felület hányadosával. Összehasonlítottam a szög és az ujjam felületét és érthetővé vált, amit az órán tanultam.

Magát az eszközt minél olcsóbb hozzávalókból szerettem volna elkészíteni, ezért a szögek szóba sem jöhettek. A fogpiszkáló nem elég tartós és nehéz rögzíteni. A pizzatávtartó a szögekkel ellentétben olcsó, könnyű és biztonságos, éppen ezért választottam. Az elhelyezés is fontos, ezért megrajzoltam, kiszereztem, azután falemezből kivágtam egy 30 cm-szer 30 cm-es lapot. A rajznak megfelelően ráragasztottam 105 darab pizzatávtartót.



Összesen 315 darab tűske alkotja a fakírágyat. Felfűjtam egy lufit és rátettem körülbelül 5,5 kg tömegű könyvet. A léggömb benyomódott, de nem lyukadt ki. A tűske átmérőjével megegyező átmérőjű hurkapálcára rátettem egy 200 g tömegű üvegpoharat, alig nyomódott be a lufi. Ebből megérthetjük, hogy ha akár százszor ennyi felületre százszor ennyi tömeg nehezedik, miért nem durran ki a lufi.





Jövönk energiája



paksi atomerőmű