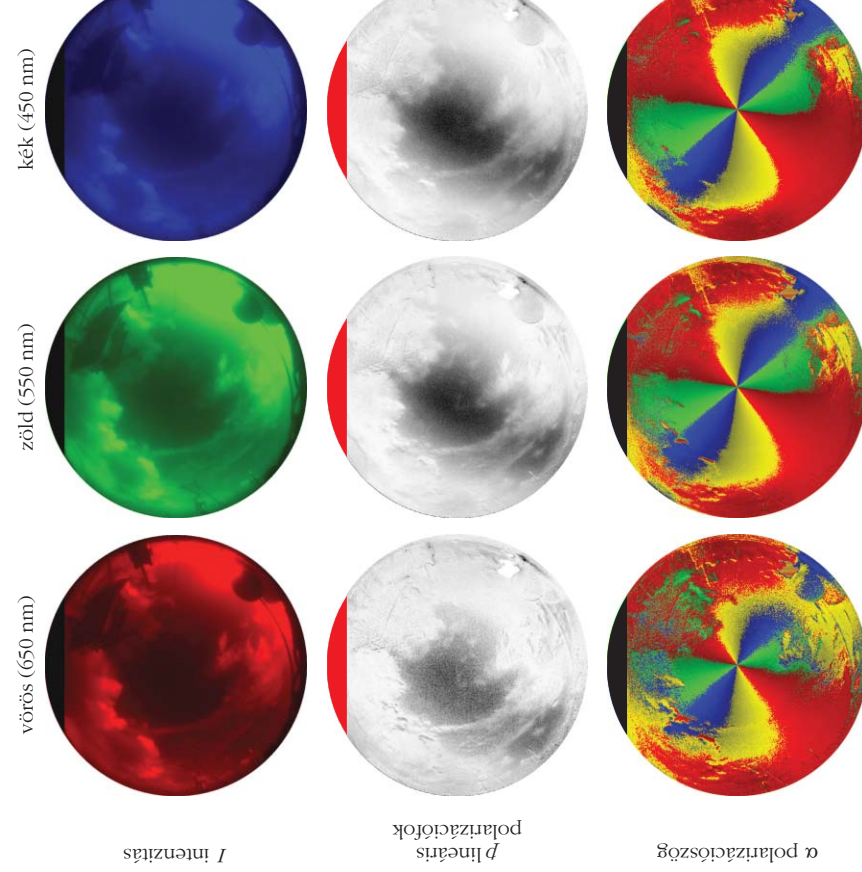
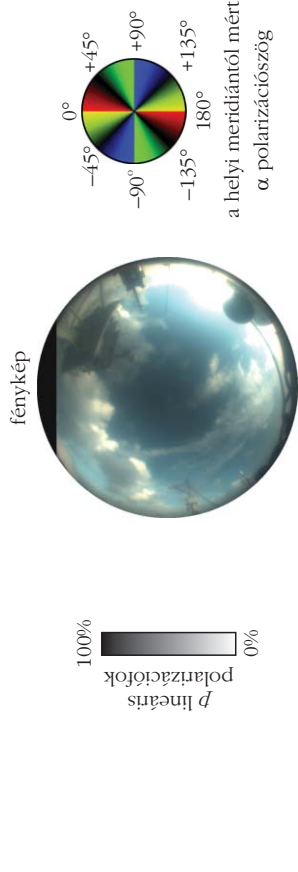
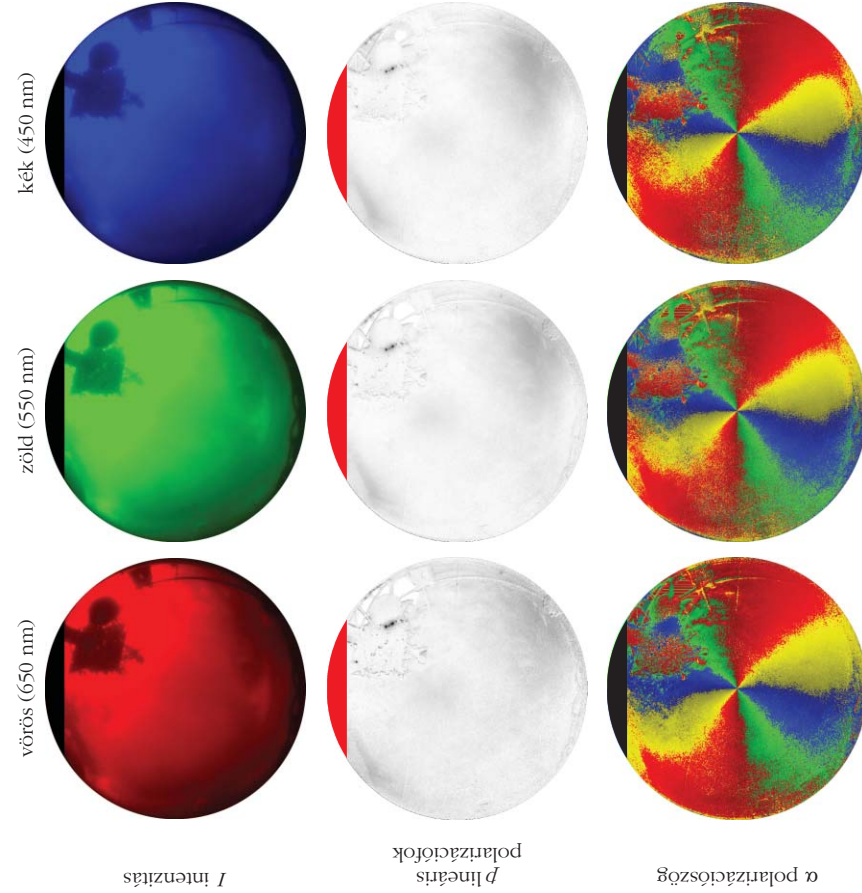


fizikai szemle

2015/9



3. *Ábra.* Az 50 égbolypolarimetriás mérés egyike, amelyeket a felhődetekciós algoritmusok optimalizációjára, tanítására és tesztelésére használtunk. E mérés 10° napeleváció mellett és a konszenzusos felhőmaszk szerint 61%-os felhőzöttségnél készült. A Polarstern kutatóhajó megfigyelőornya, kéménye és egyéb felépítményei kitakarták az égbolt egy részét a horizont közelében.



5. *Ábra.* Ugyanaz, mint a 3. *Ábra.*, de itt egy majdnem teljesen borult égboltra. A napeleváció 16° volt, a felhőzöttség pedig (a konszenzusos felhőmaszk szerint) 90%.

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

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

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

Egy jellemző felhős égbolt az Atlanti-óceán fölött 2010 októberében a német Polarstern expedíció során, amikor egy polarizációs felhődetektort tesztelt egy háromtagú magyar kutatócsoport (az erről szóló cikket lásd e számban).

TARTALOM

<i>Horváth Gábor, Egri Ádám, Blabó Miklós, Barta András, Barta Pál, Horváth Ákos, Karl Bumke, Andreas Macke:</i> Felhőzöttségmérés, optikai felhőfelismerő algoritmusok összehasonlítása – 2. rész	294
<i>Gyürky György, Farkas János:</i> Az első számjegyek Benford-törvénye és a radioaktív izotópok felezési ideje	297
<i>Buzády Andrea, Szegő Dóra:</i> Millikan és az elemi töltés meghatározásának története – 2. rész	301
<i>Regály Zsolt:</i> Több, mint égen a csillag – 2. rész	306
<i>Fábián Margit:</i> Atomerőművi hulladékok kezelése – 2. rész	311

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Fraller Csaba:</i> Mérésekkel a <i>Kozmosz</i> nyomában	314
<i>Hegedüs Tibor, Horváth Zsuzsa, Udvardi Imre:</i> Csillagászati diákolimpia Magyarországon	319

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>G. Horváth, Á. Egri, M. Blabó, A. Barta, P. Barta, Á. Horváth, K. Bumke, A. Macke:</i> The comparison of optical algorithms for measuring cloudiness – Part 2	
<i>G. Gyürky, J. Farkas:</i> Benford's law of the first numbers and the decay times of radioactive isotopes	
<i>A. Buzády, D. Szegő:</i> Millikan and how he determined the elementary charge – Part 2	
<i>Zs. Regály:</i> More than the stars on the sky – Part 2	
<i>M. Fábián:</i> How nuclear power plant waste is processed – Part 2	

TEACHING PHYSICS

<i>C. Fraller:</i> Measurements inspired by <i>Cosmos</i> Film Series	
<i>T. Hegedüs, Zs. Horváth, I. Udvardi:</i> International Olympiad on Astronomy and Astrophysics in Hungary	

EVENTS

<i>G. Horváth, Á. Egri, M. Blabó, A. Barta, P. Barta, Á. Horváth, K. Bumke, A. Macke:</i> Der Vergleich von optischen Algorithmen zur Messung der Bewölkungsgrades – Teil 2.	
<i>G. Gyürky, J. Farkas:</i> Das Benfordsche Gesetz der ersten Zahlen und die Halbzzeiten der radioaktiven Isotope	
<i>A. Buzády, D. Szegő:</i> Millikan und wie er die elementare Ladung bestimmte – Teil 2.	
<i>Zs. Regály:</i> Zahlreicher als die Sterne am Himmel – Teil 2.	
<i>M. Fábián:</i> Wie werden die Abfälle der Kernkraftwerke behandelt – Teil 2.	

PHYSIKUNTERRICHT

<i>C. Fraller:</i> Messungen im Anschluss an die Filmserie <i>Cosmos</i>	
<i>T. Hegedüs, Zs. Horváth, I. Udvardi:</i> Schul-Olympiaden „Astronomie“ in Ungarn	

EREIGNISSE

<i>Г. Хорват, А. Эгри и др.:</i> Сравнение оптических методов измерения степени облачности – часть вторая	
<i>Дь. Дюрки, Й. Фаркас:</i> Закон Бенфорда о первых номерах и времени распада радиоактивных изотопов	
<i>А. Бузади, Д. Сэго:</i> Милликен и его определение элементарного заряда – часть вторая	
<i>Ж. Регал:</i> Больше, чем число звезд на небе – часть вторая	
<i>М. Фабиан:</i> Отработка отходов ядерных электростанций – часть вторая	

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

<i>Ц. Фраллер:</i> Измерения в связи с рядом фильмов <i>Космос</i>	
<i>Т. Хэджелюс, К. Хорват, И. Удварди:</i> Школьные олимпиады «Астрономия» в Венгрии	

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



FELHŐZÖTTSEGMÉRÉS, OPTIKAI FELHŐFELISMERŐ ALGORITMUSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA – 2. RÉSZ

Horváth Gábor, Egri Ádám, Blahó Miklós

Környezetoptika Laboratórium, Biológiai Fizika Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem

Barta András, Barta Pál

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Horváth Ákos

Rutherford Appleton Laboratory, Remote Sensing Group, Oxford

Karl Bumke

GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel

Andreas Macke

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig

Eredmények

Az általunk vizsgált 50 Atlanti-óceáni égbolton a felhőborítottság 20–100% között változott. A 3. *ábra* az első belső borítón egy részben felhős ég I intenzitásának, p polarizációfokának és α polarizációs szögének mintázatait mutatja a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában. Mint látható, 10° -nál alacsonyabb napállás mellett a polarizációfok a zeniten áthúzódó, a szoláris-antiszoláris meridiánra merőleges széles, felhőtlen sávban magas ($p > 50\%$), míg a felhőfény mindenütt csak gyengén poláros ($p < 10\%$). A polarizációs szög mintázata tükröszimmetrikus a szoláris-antiszoláris meridiánra a hullámhossztól függetlenül. Ezek a robusztus α -mintázatok a felhők miatt is csak kissé módosultak.

A 4. *ábra* a felhődetekció egy eredményét mutatja, amelynek alapjául a 3. *ábra* intenzitás- és polarizációs mintázatai szolgáltak. A 4.a *ábrán* az égbolt szín- és intenzitás mintázata (azonos a 3. *ábráéival*) látható, míg a 4.b *ábrán* a konszenzusos felhőmaszk, amit három emberi észlelő együttesen határozott meg. A 4.c *ábra* a vizsgált felhődetekciós algoritmusok legjobbika, a PNN detektor által felismert felhőmaszkot mutatja, míg a 4.d *ábra* az utóbbi eltéréseit a konszenzusos felhőmaszkhoz képest.

Az 5. *ábra* az első belső borítón a felhődetekció egy másik eredményét mutatja egy majdnem teljesen borult égbolt esetén, amikor a napeleváció 16° volt, a felhőzöttség pedig 96% a konszenzusos felhőmaszk szerint.

A vizsgált 13 felhődetekciós algoritmus által hibásan detektált képpontok arányának a 10 véletlenszerűen választott tesztkészletre vett átlagát a 3. *táblázat*

foglalja össze. Az RBD, HTA, RBR, WD, WDAI, WSDS és k NN algoritmusok átlagos hibája hasonló volt: 18,57 és 23,58% közti. A csak a polarizációfokot használó p RG és p DG algoritmusok voltak a legpontatlanabbak 29,94 és 42,88%-os hibával. A polarizációfokot használó neurális hálózaton alapuló Sp NN algoritmus hibája 23,82% volt, ami így nem adott jobb eredményt a nem-neurális hálózaton alapuló algoritmusokhoz képest. A polarizációs információkat nem használó neurális hálózaton alapuló SINN és NNN algoritmusok a 16,05 és 16,32%-os hibájukkal jobb eredményt értek el a nem-neurális hálózaton alapuló algoritmusoknál. A minden lehetséges (polarizációs, globális és nem-optikai) adatot felhasználó PNN algoritmus érte el a legkisebb, 15,32% hibát. A WSDS algoritmus 1,00% szórása volt a legkisebb, míg a p DG és p RG-é a legnagyobb: 2,69 és 2,35%. A többi algoritmus szórása 1,09 és 1,61% közé esett.

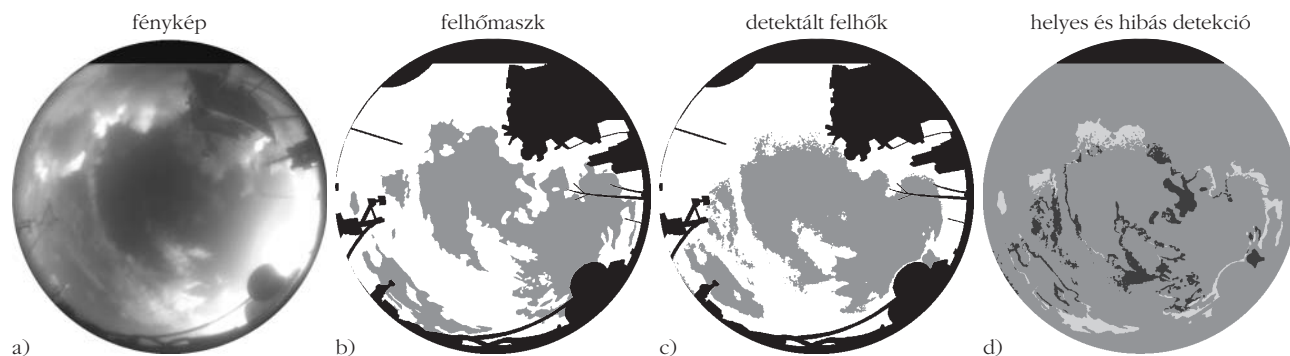
Az egyes emberi megfigyelők által felismert felhőmaszkok hibája a konszenzusos felhőmaszkhoz viszonyítva (vagyis azon képpontok aránya, amelyek esetén a megfigyelő nem értett egyet a csoport konszenzussal) 3,32, 3,31 és 2,74% volt az 50 tesztmérésre átlagolva. Megjegyezzük, hogy az összes képpont 90%-át mindhárom megfigyelő azonos módon detektálta, és legalább 93%-ban egyetértett bármely két megfigyelő.

A hibásan detektált képpontoknak a 10 véletlenszerűen választott tesztkészletre vett arányát külön-külön a 4. *táblázat* foglalja össze. Mint látható, a neurális hálózaton használó algoritmusok jobban teljesítettek a többenél, nemcsak átlagosan, hanem minden egyes tesztkészlet esetén is.

A cikk 1. részének (*Fizikai Szemle*, 2015. július–augusztusi szám) 2. *táblázata* az általunk vizsgált négy neurális hálózat (NN) alapú felhődetekciós algoritmus bemeneti paramétereit tartalmazza, ahol az egyes paraméterek használatát a PNN, NNN, SINN és Sp NN algoritmusokban \times jelzi. Az NNN és PNN algoritmusok globális paramétereket is felhasználnak, amelyek a képek egészére vonatkoznak, míg a WSDS, SINN, Sp NN, NNN és PNN algoritmusok nem-optikai paramétereket is figyelembe vesznek, mint például a napmagasság és a Naptól mért relatív azimutszög. A 3. *táblázat* összehasonlító statisztikái

Köszönjük a német Alfred Wegener Intézetnek a Polarstern kutatóhajó ANT-XXVII/1 expedícióján való részvételünk lehetőségét. Kutatómunkánkat az OTKA K-105054 (*Égbolt-polarimetria a felhők felismerésére és a polarimetrikus viking-navigációnak kedvező meteorológiai viszonyok vizsgálatára*) pályázat támogatta. Horváth Gábor köszöni a német Alexander von Humboldt Alapítvány műszeradományát és egy három hónapos kutatási ösztöndíját (3.3-UNG/1073032 STP, 2013 június 1. – augusztus 31., Regensburgi Egyetem). Köszönjük Farkas Alexandra doktorandusz segítségét az angol cikkünk magyarra fordításában.





4. ábra. Példa egy felhődetekcióra a 3. ábra mérésének használatával. a) Az égbolt fényképe. b) Konszenzusos felhőmaszk (fehér: felhő, szürke: tiszta ég, fekete: tereptárgyak). c) A PNN algoritmus által detektált felhőmaszk (fehér: felhő, szürke: tiszta ég, fekete: tereptárgyak). d) A konszenzusos felhőmaszk és a PNN algoritmus által felismert felhőmaszk közti különbségek. Középszürke: helyesen felhőnek vagy tiszta égnek detektált képpontok. Sötétszürke: hibásan tiszta égnek detektált felhők. Világosszürke: hibásan felhőnek detektált tiszta ég.

alapján megállapítható, hogy a nem-neurális hálózatot használó algoritmusok közül a WDS algoritmus hibája a legkisebb, ami arra utal, hogy a nem-optikai paraméterek javíthatják a felhődetekció pontosságát.

Elemzés

A k NN, SINN, S pNN, NNN és PNN felhődetekciós algoritmusok a mesterséges intelligencia módszerekhez tartoznak, amelyek képesek feldolgozni, figyelembe venni a másként nehezen felfedezhető összefüggéseket. A nem mesterséges intelligencia algoritmusok (RBR, WD, WDAI, WDS) utánozhatnak olyan összefüggéseket, amelyeket egy szakértő felhős mérés-

sek elemzésével fel tud tárni, de rejtett kapcsolatokat nem tudnak felismerni, különösen a polarizációval kapcsolatosakat nem, hiszen a fény polarizációját az emberi szem nem látja.

Ugyanakkor a felügyelt módon tanított felhődetekciós algoritmusok akkor a leghatékonyabbak, ha kellően nagyszámú bemenettel tanítjuk őket. Például a 3. és 4. táblázat jól mutatja, hogy bár a k NN egy mesterséges intelligencia algoritmus, a hibája hasonló a nem mesterséges intelligencia algoritmusok hibájához. Ez a k NN algoritmus általunk használt megvalósításának volt köszönhető, amelyben csupán a három különböző színsatornában (R, G, B) mért I_R , I_G , I_B fényintenzitást használtuk bemenetként. A vizsgált esetben egy $256 \times 256 \times 256$ -os színtömböt használtunk, ami 16 MB

memóriát jelent, ha a tömb minden eleme 1 bájtos. Ugyanakkor a k NN által használt memória mérete gyorsan nő a bemeneti paraméterek számával: n bemeneti paraméter esetén 256^n bájt.

A WDAI és PNN algoritmusok polarizációs információkat használnak, míg a többi csak fotometrikus információkat. Az NNN és PNN algoritmusok globális paramétereket is használnak, amelyek a kép egészére vonatkoznak, míg a többi csak lokális információkat, amelyek csak a vizsgált képpontra vagy annak közvetlen környezetére jellemzőek. A WDS, NNN és PNN algoritmusok figyelembe vesznek nem-optikai jellemzőket is, míg a többi csak optikai jellemzőket használ. Az NNN és PNN algoritmusok rendelkeznek a legkisebb hibával (3. táblázat), mivel ezek mesterséges intelligencia algoritmusok nagyszámú bemenő para-

felhődetekciós algoritmus	átlagos hiba (%)	szórás (%)	polarizációs adatok használata	globális paraméterek használata	nem-optikai paraméterek használata
RBD	23,58	1,40			
WD	21,46	1,45			
RBR	21,64	1,41			
k NN	19,63	1,14			
HTA	20,78	1,61		×	
WDAI	19,80	1,21			
WDS	18,57	1,00			×
p DG	42,88	2,69	×		
p RG	29,94	2,35	×		
S pNN	23,82	1,15	×		×
SINN	16,32	1,12			×
NNN	16,05	1,24		×	×
PNN	15,32	1,09	×	×	×

A 10 tesztkészlet 25 mérését ugyanaból az ANT-XXVII/1 expedíción gyűjtött 50 mérésből választottuk ki véletlenszerűen. Az egyes algoritmusok által használt polarizációs információkat, globális paramétereket, nem-optikai paramétereket × jelöli.

A 13 felhődetekciós algoritmus által hibásan detektált képpontok aránya a 10 véletlenszerűen választott tesztkészletre külön-külön

No.	RBD	WD	RBR	kNN	HTA	WDAI	WDS	pDG	pRG	SpNN	SINN	NNN	PNN
1.	23,01	20,37	20,61	19,37	19,35	19,43	18,24	38,77	27,33	22,93	16,04	16,03	15,71
2.	23,69	24,01	24,24	21,25	23,05	21,73	20,16	47,94	32,84	25,19	17,98	18,46	15,56
3.	21,88	20,06	20,40	18,34	19,06	18,68	17,92	41,51	27,71	22,43	15,21	14,95	13,47
4.	24,05	22,76	22,93	20,76	22,56	21,05	19,39	43,64	32,22	24,61	17,89	16,85	16,52
5.	20,89	21,85	22,02	19,38	20,94	19,65	18,28	44,20	29,48	23,26	15,77	15,40	15,54
6.	24,95	22,36	22,31	21,06	21,94	21,12	19,96	42,14	30,69	25,26	17,51	17,19	16,42
7.	22,29	19,39	19,58	18,46	18,39	18,60	17,95	39,95	28,14	22,79	15,70	14,34	15,01
8.	21,55	20,30	20,58	18,18	20,19	18,68	17,22	41,88	27,79	23,24	15,84	15,05	14,23
9.	20,59	21,11	21,18	19,28	20,08	18,59	17,58	43,09	29,31	23,15	14,79	15,64	14,13
10.	22,92	22,35	22,54	20,16	22,19	20,52	18,95	45,73	33,86	25,38	16,46	16,59	16,59
AV	22,58	21,46	21,64	19,63	20,78	19,80	18,57	42,88	29,94	23,82	16,32	16,05	15,32
SD	1,40	1,45	1,41	1,14	1,61	1,21	1,00	2,69	2,35	1,15	1,12	1,24	1,09

Az átlag (AV) és szórás (SD) az utolsó két sorban a 3. táblázatból származik. Minden tesztkészletre és az átlagos hibára is a legkisebb hibát félkövér betűkkel szedték.

méterrel, köztük nem-optikai és globális paraméterekkel is. A PNN algoritmus ezen kívül polarizációs információkat is használ, ami megmagyarázza, hogy miért ad jobb eredményt az NNN algoritmusnál.

A PNN és NNN algoritmusok eredményei közti különbség kicsi. Ugyanakkor a PNN algoritmus jobb teljesítménye nem meglepő, mivel több információt használ. A kiértékeléshez 50 eltérő égbolt mért polarizációs mintázatait használtuk úgy, hogy 10 különböző módon választottunk ki belőlük 25 algoritmustanító eget és a maradék 25 égen teszteltük az adott algoritmust. Ezzel csökkentettük annak esélyét, hogy egy gyengébb algoritmus egy adott mérési készlethez jobban alkalmazkodjon, mint egy egyébként jobban teljesítő algoritmus, és ezzel tévesen kisebb hibát érjen el. Mivel az NNN és PNN detektorok ugyanazon méréseket használták, a képminőség nem magyarázhatja a PNN algoritmus jobb eredményeit.

A 13 bemutatott felhődetekciós algoritmus eléggé szerteágazó volt. Hangsúlyozzuk, hogy a vizsgáltaknál összetettebb algoritmusok, például azok valamilyen kombinációja, jobb eredményeket érhet el. Például azt vizsgálva, hogy az egyes algoritmusok pontossága miként függ a Nap relatív pozíciójától vagy a horizont fölötti magasságtól, összeállítható egy olyan kombinált algoritmus, amely az egyes rész-algoritmusok eredményeit különböző súlyokkal veszi figyelembe az égbolt különböző tartományaiban. Célunk az volt, hogy összevegyünk számos nem-neurális hálózat alapú algoritmust, amely az emberi megfigyelő felhődetektáló módszerét utánozza a égbolton vagy a mért polarizációs mintázatokon. Továbbá megvalósítottuk a PNN neurális hálózatot, amely sok bemeneti paramétert használ úgy, hogy a kimenet bemenettől való függése nincs előre meghatározva.

Az Atlanti-óceáni expedíció során a Nap ritkán közelítette meg a zenitet, még az Egyenlítő környékén is csak délben és rövid időre. Ugyanakkor a zenitet közelítő napmagasságok mellett az ég általában tiszta volt, így e méréseket nem tudtuk használni felhődetekciós algoritmusok tanítására és tesztelésére. Nagy napmagasságok esetén a polarizációfok és polarizációs szög mintázatai nagymértékben különböznek az alacsonyabb napmagasság mellettiekétől, így ekkor külön algoritmusokra lehet szükség. Mivel a felhasznált méréseknél a napmagasság 4° és 40° közé esett, ezt a különleges esetet nem tudtuk vizsgálni, e probléma körüljárása külön kutatást igényel. Korábbi tapasztalataink alapján a napkitakaró tárcsa és a Polarstern felépítményei által kitakart területek nagysága meghaladja a hibásan felhősnek detektált területek nagyságát. Emiatt a tesztkészletből kihagytuk a tiszta égboltokat tartalmazó méréseket, ami nem befolyásolta a felhődetekciós algoritmusok fejlesztését.

Az égboltfény α polarizációs szöge nem használható felhődetekcióra, mert annak mintázata nagyon robusztus, még felhős viszonyok között is. Létezik azonban olyan felhődetekciós algoritmus, ami figyelembe veszi az égbolt α -mintázatát is [2]. Ugyanakkor kizárólag az α változásait figyelembe véve rossz felhődetekciós pontosságot lehet csak elérni, ezért az algoritmusainkban nem használtuk ezt a paramétert.

A Polarstern hajónak mint mozgó platformnak megvolt az a hátránya, hogy a polarimetriához szükséges három polarizációs felvételt a forgóanalizátoros képalkotó műszerünkkel egymásután elkészítve, a hajó billegéséből adódóan mozgási műtermékekhez vezethetett. Néhány mérésünk minősége valóban csökkent e jelenség miatt. Ugyanakkor az 50 tesztmé-

rés kiválasztásakor különös figyelmet fordítottunk arra, hogy kihagyjuk azon méréseket, amelyeken a kiértékelés után ilyen mozgási műtermékek adódtak. Elméletben ez a jelenség elkerülhető, ha a polarimetriához szükséges három felvételt azonos időben készítjük el. A valóságban egy ilyen megközelítés a következő nem-triviális problémákat veti fel: (i) A legfontosabb a három kamera optikai tengelye tökéletes párhuzamosságának biztosítása. (ii) Egy másik nehézség, hogy a három kamera érzékelője kissé eltérő választ ad azonos fényintenzitásokra még akkor is, ha azonos típusúak, ami keresztkalibrációt igényel. Felhasználhatók lettek volna a hajó belső szenzorainak adatai, amelyek megadják a hajó pontos állás-szögét, hogy ezzel korrigáljuk az egyes képek irányítotttságát. Ugyanakkor ez nagyon pontos szinkronizációt igényelt volna a hajó belső rendszerével. Ehelyett egyszerűen kihagytuk azon méréseket, amelyeken a kiértékeléskor hiba keletkezett a hajó elmozdulása miatt.

Következtetések

Azt találtuk, hogy a neurális hálózaton alapuló felhődetekciós algoritmusok voltak a legjobbak a 13 vizsgált közül, és hogy a globális paraméterek (például a fényintenzitás átlaga és varianciája), a nem-optikai információk (például a relatív nappozíció) és a polarimetrikus információk (különösen a polarizációfok) növelhetik a felhőfelismerés pontosságát. Ugyanakkor, mint azt az NNN és PNN algoritmusok hibái közti kis különbség mutatja, a polarizáció csak kismértékben növeli a pontosságot. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a polarizációs információkból más mennyiségekre is következtethetünk, mint például a felhőalap magasságára vagy az aeroszol koncentrációjára, amely mennyiségek mérése fotometrikus úton nem lehetséges. A polarizáció segíthet a felhőtípusok osztályozásában is, például elkülöníteni a jégfelhőket a vízfelhőktől, vagy akár a jégfelhők mikrofizikai jellemzőinek (részecskeméret és -alak) meghatározásában.

AZ ELSŐ SZÁMJEGYEK BENFORD-TÖRVÉNYE ÉS A RADIOAKTÍV IZOTÓPOK FELEZÉSI IDEJE

Gyürky György, Farkas János
MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

Mindennapi életünkben körülvesznek minket a számok és e számoknak olykor érdekes és meglepő tulajdonságaik vannak. Az egyik ilyen meglepő tulajdonságot Benford-törvénynek nevezzük. Bármilyen furcsa és szinte hihetetlen is a törvény által leírt jelenség, annak igazságáról bárki könnyedén meggyőződhet. Mégis kevésbé ismert még a tudomány művelői körében is. Pedig a törvénynek már különböző gyakorlati felhasználásai is vannak. E cikk apropóját egy olyan alkalmazás adja, amely – mint megmutatjuk – teljesen hibásan használja a törvényt.

Egy kis történelem

A 19. század végén *Simon Newcomb*, egy kanadai-amerikai matematikus és csillagász érdekes felfedezést tett logaritmustáblázatok tanulmányozása közben. A *Fizikai Szemle* olvasóinak jó része talán már nem is tudja, mi az, hogy logaritmustáblázat. Az elektronikus számológépek elterjedése előtt ilyen táblázatok könnyítették meg különböző matematikai műveletek elvégzését, tehát például a tudósok gyakran forgatták a könyvekbe rendezett táblázatokot. Newcomb azt találta, hogy a könyvek első oldalai sokkal inkább kopottak voltak, mint a hátrébb található oldalak. Mivel a könyvekben a listák az egyes számtól kezdődnek és a kilences számmal kezdődő számokkal végződnek, így a

könyvek kopása alapján úgy tűnt, a felhasználók gyakrabban keresnek alacsony számmal kezdődő számokat, mint magas kezdőszámjegyűeket.

Newcomb meglepő felfedezése hosszú időre feledésbe merült, mígnem 1938-ban a General Electric fizikusa, *Frank Benford* újra rábukkant a jelenségre. Az ebből a felfedezésből születő „törvény” ezért az ő nevét viseli: az első számjegyek Benford-törvénye, vagy egyszerűen csak Benford-törvény [1]. A táblázatok kopását úgy értelmezte, hogy a természetben vagy a mindennapi életünkben gyakrabban fordulnak elő kis számmal kezdődő számok.

Ezt a meglepő lehetőséget Benford igen alapos ellenőrzésnek vetette alá. A tudomány és a mindennapok számos különböző területéről vett adatokat, számsorokat, és az első számjegyek eloszlását vizsgálta bennük. Adatbázisában megtalálhatók voltak fizikai és matematikai állandók, molekulatömegek, földrajzi adatok, mint például folyók hossza és tavak területe, amerikai települések lélekszáma, híres emberek utcaházszáma, vagy akár halálozási statisztikák is. Azt találta, hogy az adatsorok nagy többségére valóban igaz, hogy az első számjegyek eloszlása nem egyenletes, hanem a kis számok irányába torzult. Például az egyessel kezdődő számok több mint hatszor gyakoribbak, mint a kilencessel kezdődőek.

Aki hitetlenkedve fogadja ezeket az eredményeket, annak javasolunk egy próbát. Listázza ki az összes szá-

mot a *Fizikai Szemle* azon példányából, amit éppen a kezében tart és vizsgálja meg az első számjegyek eloszlását! Álljuk a fogadást, hogy az adatok hibahatáron belül követni fogják a Benford-törvény alább ismertett matematikai alakját.

A Benford-törvény matematikai jellegzetességei és alkalmazási lehetőségei

A Benford által vizsgált adatok eloszlása jól leírható egy egyszerű képlettel. Annak a valószínűsége, hogy egy szám első számjegye d a következőképpen adható meg:

$$P(d) = \log_{10} \left(1 + \frac{1}{d} \right), \quad d = 1, 2, \dots, 9. \quad (1)$$

Ezen valószínűségeket mutatja az *1. ábra*. Például annak a valószínűsége, hogy egy szám eggyessel kezdődik, 30,1% (majdnem minden harmadik szám eggyessel kezdődik!), míg annak, hogy kilencessel, 4,6%. Vegyük észre, hogy a valószínűségek megegyeznek annak esélyével, hogy egy logaritmikus skálán ábrázolt számegyenesen az 1 és 10 között véletlenszerűen kiválasztott pontnak mi az első számjegye. Ennek illusztrálása szintén szerepel az *1. ábrán*.

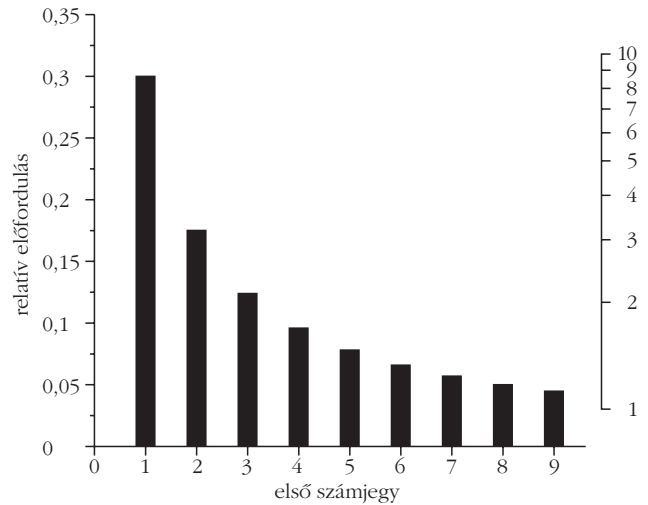
Cikkünk további mondanivalója szempontjából lényegtelen, de a teljesség kedvéért megemlítjük, hogy a nem egyenletes eloszlás nemcsak a számok első, hanem későbbi számjegyeire is érvényes. Ám ez már messze nem olyan szembeszökő, mint az első számjegyek esetén. A második számjegyben például a nulla gyakorisága 12%, a kilencesé pedig 8,5%. Ez már csak elegendően nagy adathalmaz esetén mutatható ki.

Természetesen a tízes számrendszer kiválasztásának nincs kitüntetett szerepe. Ha a Benford-törvénynek eleget tevő adatsort átszámítjuk egy tetszőleges (nem túl nagy) alapú számrendszerbe, akkor az így nyert új adatsor szintén teljesíti a törvényt az adott számrendszerben kifejezve. Az (1) képlettel adott valószínűség általános alakja n alapú számrendszerben adott számok esetén tehát:

$$P(d) = \log_n \left(1 + \frac{1}{d} \right), \quad d = 1, 2, \dots, n-1. \quad (2)$$

A Benford-törvény első látásra meglepő tulajdonsága a skálafüggetlenség. Nem számított, hogy Frank Benford például a vizsgált folyók hosszát kilométerben, mérföldben vagy akár lábban adta meg, az adatok minden esetben követték a törvényt. Ha tehát egy adatsorunk követi a törvényt, akkor ha minden adatot megszorozunk egy tetszőleges nemnulla állandóval, akkor az így előállt adatsor is követni fogja a törvényt. Ez a jellegzetesség jó lehetőséget teremt annak ellenőrzésére, hogy egy adatsor ténylegesen követi-e a törvényt, mint ezt a későbbiekben láthatjuk.

A Benford-törvény gyakorlati felhasználása is létezik, méghozzá meglepő területeken. Az alkalmazás



1. ábra Az első számjegyek eloszlása a Benford-törvény szerint.

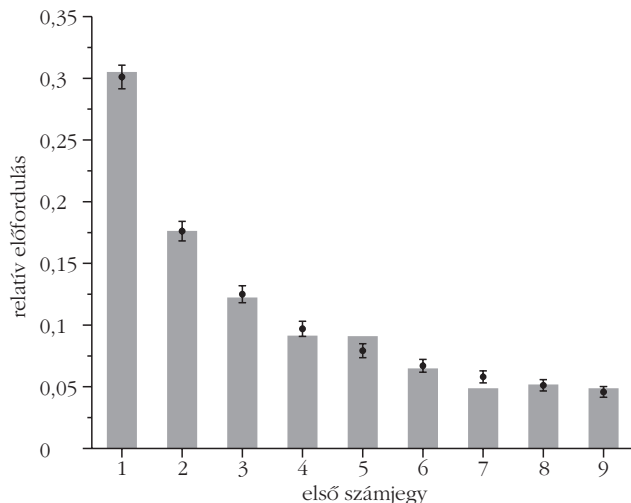
főképpen azon alapul, hogy az emberek nem ismerik a törvényt. Ha egy adatsornak valamilyen okból követnie kell a törvényt, de ezt mégsem teszi, az gyanús. Tehát könnyen leleplezhetővé válik az adatsort létrehozó olyan ember, aki nem ismeri a törvényt. Ezért leggyakrabban csalások leleplezésére használják a Benford-törvényt. Az első számjegyek eloszlását vizsgálva derítettek már fel adócsalásokat, választási visszaéléseket, lepleztek le hamisított adatsort használó egyetemi szakdolgozót. Sőt, a Benford-törvény alapján végzett ellenőrzés még azt is megmutatta, hogy Görögország „kozmetikázta” államháztartási adatait [2].

Csalások leleplezésén kívül is van példa a törvény használatára. Megvizsgálták például földrengés-érzékelő szeizmométerek adatait és más eloszlást találtak az első számjegyekben egy adott földrengést megelőző adatokban és a rengés során [3]. Szintén próbálták alkalmazni radioaktív izotópok felezési idejét szolgáltató elméletek tesztelésére. Mint megmutatjuk, hibásan. Erről szól cikkünk hátralévő része.

Radioaktív izotópok bomlásának felezési ideje

A 21. század elejére – főként a radioaktív ionnyalábokkal végzett kutatásoknak köszönhetően – több mint 3500 különböző (eltérő proton- vagy neutronszámú) izotópot ismerünk. Ezen izotópok döntő többsége radioaktív és általában ismerjük bomlásuk felezési idejét is. Mit mutat az ismert izotópok felezési időiből képzett adatsor, ha megvizsgáljuk a Benford-törvény szempontjából?

2008-ban *Dongdong Ni* és *Zhongzhou Ren* egy rangos folyóiratban publikálták cikküket, amelyben megvizsgálták mintegy 3000 radioaktív izotópot és azt találták, hogy felezési idejük jól követik a Benford-törvényt [4]. A tapasztalaton felbuzdulva a szerzők a háttérben rejlő fizikai okokat boncolgatták, és odáig jutottak, hogy a Benford-törvénnyel való összevetés alkalmas lehet olyan elméleti modellek ellenőrzésére, amelyekből bomlások felezési ideje



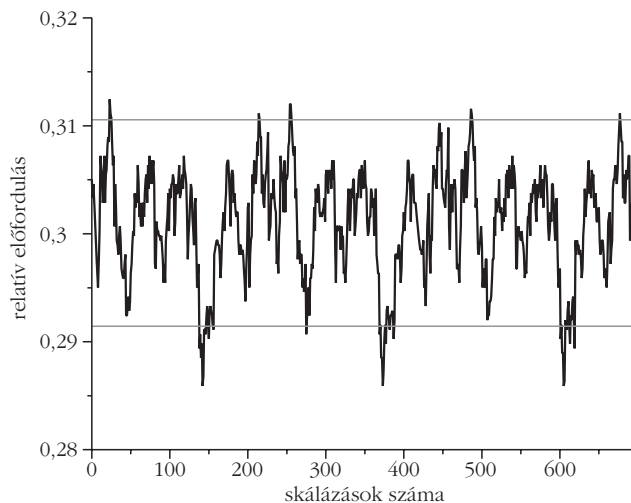
2. ábra. A NUBASE2003 adatbázisban található felezési idők első számjegyeinek eloszlása.

származtatható. Mint alább megmutatjuk, ez az elképzelés a törvény teljesen hibás értelmezéséből fakad és a leírt formában nem alkalmas elméleti modellek tesztelésére.

Előtte azonban végezzük el saját vizsgálatunkat a felezési idők adatbázisán! Ehhez a vizsgálathoz az adatokat a NUBASE2003 adatbázisból vettük [5]. Nem vettük figyelembe azokat az izotópokat, ahol nem konkrét érték, hanem csak alsó vagy felső határ volt megadva. Így összesen 2298 adatból indultunk ki. Az analízis eredménye látható a 2. ábrán, illetve a számszerű értékeket az 1. táblázat tartalmazza. Mint láthatjuk, a felezési időkben az első számjegyek eloszlása valóban jól követi a Benford-törvény által diktált elvárásokat az adott mintanagyságra jellemző hibahatáron belül. A Benford-törvény várható hibáját a binomiális eloszlás standard bizonytalansága alapján adtuk meg.

A Benford-törvény skálainvarianciáját kihasználva adatsorunkat még alaposabb tesztnek vethetjük alá, hogy a törvénynek való engedelmisséget még erő-

3. ábra. Skálázási teszt: az egyesek első számjegyként való relatív előfordulása a felezési idők többszöri, 1,01-dal való megszorozása után.



1. táblázat

A felezési idők adatbázisában az adott első számjegyek előfordulásának száma, illetve a Benford-törvény által jósolt értékek

első számjegy	előfordulások tapasztalt száma az adatbázisban	Benford-törvény alapján várt előfordulásszám
1	701	692 ± 22
2	405	405 ± 18
3	281	287 ± 16
4	210	223 ± 14
5	209	182 ± 13
6	149	154 ± 12
7	112	133 ± 11
8	119	118 ± 11
9	112	105 ± 10

sebben bizonyíthatjuk. Az adatbázisban található minden egyes értéket egy tetszőleges állandóval szorozva megvizsgálhatjuk, hogy például az adatok hány százaléka kezdődik egyes számjeggyel. Ennek a százaléknak mindig az elvárt 30,1% közelében kell lennie, akárhányszor végzünk is új skálázást. Tesztünkhöz az 1,01 értéket választottuk skálázási tényezőként. Ezzel a számmal szoroztuk meg a teljes adatbázist egymás után több száz alkalommal és minden lépésben vizsgáltuk az egyes, mint első számjegy gyakoriságát. E skálázási teszt eredménye található a 3. ábrán. Jól látható, a gyakoriság a Benford-törvény várhatóértéke, 30,1% körül ingadozik, nagyjából a hibatarományon belül. Tehát a skálázási teszt is egyértelműen bizonyítja, hogy a felezési idők valóban követik a Benford-törvényt.

Ha a felezési idők ilyen kiválóan követik a törvényt, miért állítjuk azt, hogy mégsem alkalmas a törvény elméleti modellek tesztelésére? Az indokoláshoz először lássuk, hogy mi van a törvény mögött! Ez azért fontos, mert bár nem túlságosan bonyolult dologról van szó, mégis érdekes és olykor hajmeresztő magyarázatok láttak napvilágot arra, hogy a törvény miért ír le jól oly sok, mindennapi életünkben felbukkanó adatsort. Például még maga Benford is olyan magyarázattal próbált szolgálni, hogy míg mi emberek úgy számolunk, hogy 1, 2, 3, ..., addig a természet úgy számol, hogy e^1, e^2, e^3, \dots . Ilyen misztikus magyarázatokra természetesen nincs szükség. Olyannyira nincs, hogy megmutatható, ha egy adatsorban az első számjegyek eloszlása skálainvariáns, akkor az adatoknak szükségképpen követniük kell a Benford-törvényt.

Mikor teljesül egy adatsorra a Benford-törvény?

Az a feltétel, hogy egy szám egy adott számjeggyel kezdődik, könnyebben kifejezhető a szám logaritmusának használatával. Valóban, egy x szám akkor és

csak akkor kezdődik például egyes számjeggyel, ha logaritmusára igaz, hogy

$$n \leq \log(x) < n + 0,301,$$

ahol n egy tetszőleges egész szám. Hasonló összefüggés írható fel bármely más kezdőszámjegy esetén is. Mit jelent a skálainvariancia a logaritmus használata esetén? Az adatok konstanssal való szorzása a logaritmusnál egy konstans hozzáadását jelenti:

$$\log(a \cdot x) = \log(x) + d',$$

ahol $d' = \log(a)$. Egy a konstanssal való szorzás után tehát annak valószínűsége, hogy az első számjegy egyes újra a következő:

$$n \leq \log(a \cdot x) < n + 0,301,$$

tehát

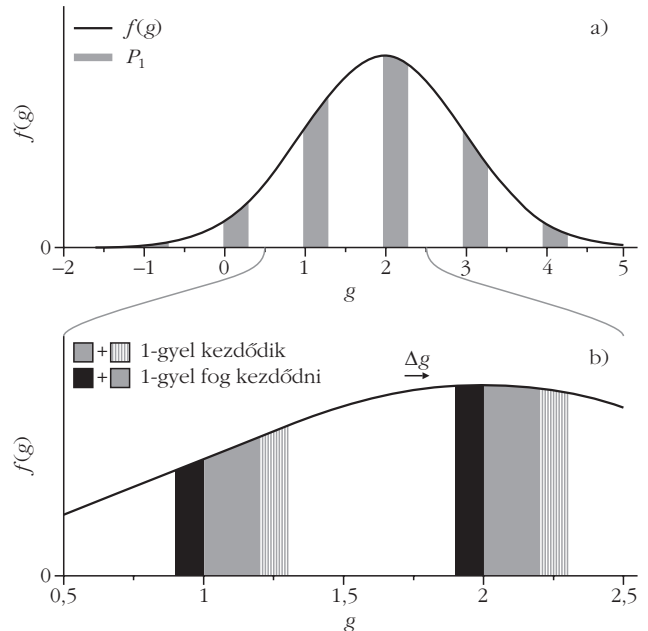
$$n - \log(a) \leq \log(x) < n - \log(a) + 0,301.$$

Ez mindössze egy $\log(a)$ konstanssal való eltolást jelent. A skálainvariancia megköveteli, hogy a két valószínűség megegyezzen. Ez csak akkor teljesülhet, ha a számsor számainak logaritmusai (pontosabban annak tizedesvessző utáni része) egyenletes eloszlást követ a $[0,1)$ intervallumon!

A fenti okfejtést igyekszik szemléltetni a 4. ábra, ahol egy vizsgálandó adatsorban lévő számok eloszlásfüggvénye látható logaritmikuskálán. A szürkével fedett terület mutatja azokat a számokat, amelyek első számjegye egyes. A fekete terület pedig azt mutatja, melyek azok a számok, amelyek a szürke területre kerülnek egy bizonyos skálázás során, tehát az egész adatsor adott konstanssal való megszorozása után. A szürke csíkos területre eső értékek a skálázás előtt eggyel kezdődnek, de a skálázás után már nem. Az adatsorunkban akkor teljesül a skálainvariancia, azaz akkor nem változik az adott számjeggyel való kezdődés valószínűsége, ha a fekete és a szürke csíkos terület egymással egyenlő, tehát a skálázás során annyit veszítünk az egyik oldalon, amennyit nyerünk a másikon.

Ezek alapján kvalitatív kritériumot adhatunk arra nézve, hogy milyen eloszlást kell követnie egy adathalmaznak, hogy a Benford-törvény igaz legyen rá. Triviálisan igaz lenne a törvény, ha az adatok például szigorúan 1 és 10 közé esnének és a logaritmusuk ezen az intervallumon egyenletes eloszlású lenne. Ilyen eloszlás a természetben vagy a mindennapi életben azonban ritkán fordul elő. Sokkal fontosabb a másik eset (4. ábra) amikor az eloszlás olyan, hogy sok nagyságrendet átívelően nagyjából egyenletes a logaritmikuskálán. Ekkor a szürke területek eltolása összességében nem változtatja meg az összterületüket, mert az esetleges kis eltérések kiátlagolódnak. Kimondható tehát, hogy amennyiben egy adatsorban sok nagyságrendet átfogóan található értékek, mégpedig – logaritmikusan – nagyjából egyenletes eloszlásban, akkor az adatsor jól fogja követni a Benford-törvényt.

A fent elmondottak persze nem tekinthetők matematikai igényességű bizonyításnak, az túlmutatna

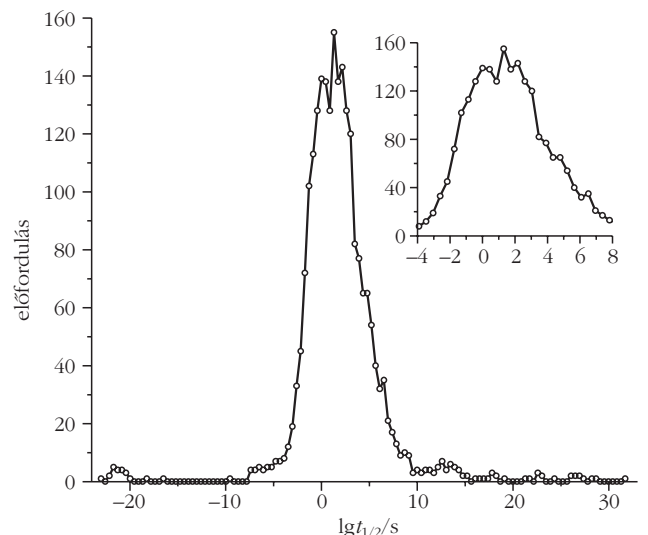


4. ábra. A skálázás hatása az 1-ek eloszlására. A szürke csíkos részre eső számok a skálázás után már nem fognak 1-gyel kezdődni, míg a fekete részek a skálázás előtt nem kezdődtek 1-gyel, de utána már igen. A szürke részre eső számok a skálázás előtt és után is 1-gyel kezdődnek.

cikkünk keretein. Bizonyítás nélkül közöljük csak az egzakt kritériumot, az érdeklődők megtalálhatják a részleteket a [6] vagy [7] dokumentumban. Tehát egy adatsor akkor és csak akkor teljesíti a Benford-törvényt, ha az adatok eloszlásfüggvényének Fouriertranszformáltja eltűnik minden egész értéknél (frekvenciánál). Gyakorlatban elegendő a törvény jó közelítéssel való teljesüléséhez, ha az említett Fouriertranszformáltak elég kis értéket vesznek fel egész frekvenciáknál.

Mit mondhatunk el a felezési időkről? Az 5. ábra a felezési idők eloszlását mutatja logaritmikuskálán. A teljes adatbázis mintegy 50 nagyságrendet ölel fel, tehát igen széles eloszlásról van szó. Ugyan messze

5. ábra. Felezési idők előfordulása.



nem logaritmikusan egyenletes, de a középső kiemelkedő része (lásd a kis ábrán) még mindig sok nagyságrendet fog át meglehetősen sima eloszlással. Így nem meglepő, hogy az adatsorra teljesül a Benford-törvény.

Konklúzió

Miért állítjuk tehát, hogy a Benford-törvény nem alkalmas felezési időt számító elméleti modellek tesztelésére? A válasz az, hogy a Benford-törvénnyel való szembeállítás csak az adathalmaz eloszlásfüggvényének alakját vizsgálja. Ha az adatok sok nagyságrendet átívelően megfelelően egyenletes eloszlásúak, akkor a Benford-törvény teljesülni fog. Tehát, ha egy elméleti modell ilyen felezési időket szolgáltat, akkor ki fogja állni a törvény próbáját. De ez a próba önmagában nem mond semmit arról, hogy a modell fizikailag mennyire helyes. A tapasztalattal teljesen összeegyeztethetetlen eredményt adó modellek is teljesíthetik a törvényt, mégsem fogadjuk el őket helyesnek. Ez fordítva is igaz: ha egy modell nagyságrendileg helyesen írja le atommagok széles körének felezési idejét a mikroszekundumtól a milliárd évig, akkor ez egy kiváló modell lehet. Ám esetleg a modell megalkotói az elméletük korlátait felismerve minden felezési időt

csak nagyságrendi pontossággal, $1 \cdot 10^n$ s alakban adnak meg, akkor az adathalmaz triviálisan nem fogja teljesíteni a Benford-törvényt, pedig fizikailag igen értékes az elmélet.

A Benford-törvény a világunkban előforduló számok egy – első pillantásra meglepő, igen érdekes – tulajdonságát írja le. A körülötte kialakult kultusznak köszönhetően az érdeklődő olvasók bőséges (főként angol nyelvű) irodalmat találhatnak a témával foglalkozó gyűjtő-weboldalon [8]. Már ma is szép számmal akadnak a törvénynek gyakorlati alkalmazásai, és várhatóan ez a jövőben még inkább így lesz. Körültekintően kell azonban bánnunk a törvény alkalmazhatóságával, nehogy olyan hibát kövessünk el, mint az írásunkban idézett szerzők a felezési idők esetén.

Irodalom, hasznos weboldalak

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Benford's_law
2. http://index.hu/tudomany/brittudosok/2011/10/25/matematikusok_jottek_ra_a_gorog_csaladra/, <http://www.cesruc.org/uploads/soft/130301/1-1303011Z221.pdf>
3. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010GL044830/pdf>
4. D. Ni, Z. Ren, *Eur. Phys. J. A* 38 (2008) 251.
5. G. Audi et al., *Nucl. Phys. A* 729 (2003) 3.
6. <http://goo.gl/Pv509w>
7. S. W. Smith: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, 1997, 2008, Ch. 34, pp. 701–722.
8. <http://www.benfordonline.net>

MILLIKAN ÉS AZ ELEMI TÖLTÉS MEGHATÁROZÁSÁNAK TÖRTÉNETE – 2. RÉSZ

Buzády Andrea, Szegő Dóra¹
Pécsi Tudományegyetem TTK Fizikai Intézet

Cikkünk – a korábbi számban megjelenő – első részében a híres olajcseppes kísérlet előzményeiről volt szó. Írtunk a mérések közös elvéről; megismertük, hogy miként törekedett Millikan a kortársak ötletein elindulva a kísérlet gondos kivitelezésére; a felhőszerű közeg, illetve később a csepp mozgását befolyásoló viszkozitás és hőmérséklet minél pontosabb meghatározására.

Az elemi töltés értékének meghatározása olajcseppек porlasztásával

Millikan tanítványától, *Harvey Fletchertől* származó ötlet [5] vezetett a – korábban sehogy sem kiküszöbölhető – párolgásból fakadó problémák megoldásához. A további kísérletekben a víz, illetve alkohol helyett nagy finomságú óraolajat használtak [4].

Millikan ezen felül számos módosítást vezetett be, ezek közül néhány:

- újra meghatározta a levegő viszkozitását;
- új, minden addiginál jobb optikai megfigyelő berendezést alkalmazott;
- a kísérleti elrendezést alkalmassá tette arra, hogy tetszőleges nyomáson vizsgálhassa a cseppek sebességét;
- a légáramlásból származó hibaforrásokat még precízebben védte ki;
- kísérletileg igazolta az alábbi három előfeltevést:
 - a töltés nagysága nem befolyásolja a cseppek-re ható közegellenállást,
 - az olajcseppek szilárd gömbökként viselkednek,
 - a cseppek sűrűsége megegyezik magával az olaj sűrűségével.

Az olajcsepp-porlasztós kísérleti elrendezést a 4. ábra mutatja.

A légköri nyomás akár tizenötszörösét is elbíró D rézkádat egy 40 l gázolajat tartalmazó G kádba merítették. Az *e* csapon és az *A* porlasztón keresztül beáramló, gondosan szárított levegőt használva porlasztással állították elő a rézkádban összegyűlő olajcseppeket. Az ebben uralkodó nyomást az *m* higanyma-

Jelen tudományos közleményt a szerzők a Pécsi Tudományegyetem alapításának 650. évfordulója emlékének szentelik.

¹ Egyetemi hallgató.

nométerrel mérték. A kísérletek során ennek értéke a cikkben közölt mértékegységben, azaz higanycentiméterben mérve 4,46-76,42 cm között volt.

A B feszültségforrást az S , C kapcsolórendszeren keresztül kapcsolták az M kondenzátorlemezre, az N jelű másikat, illetve a rézkádat leföldelték. A kondenzátorlemezek távolsága 0,01 mm-es pontosságon belül 16 mm, a kísérletek során rájuk adott feszültség 1699 és 5174 V közötti volt.

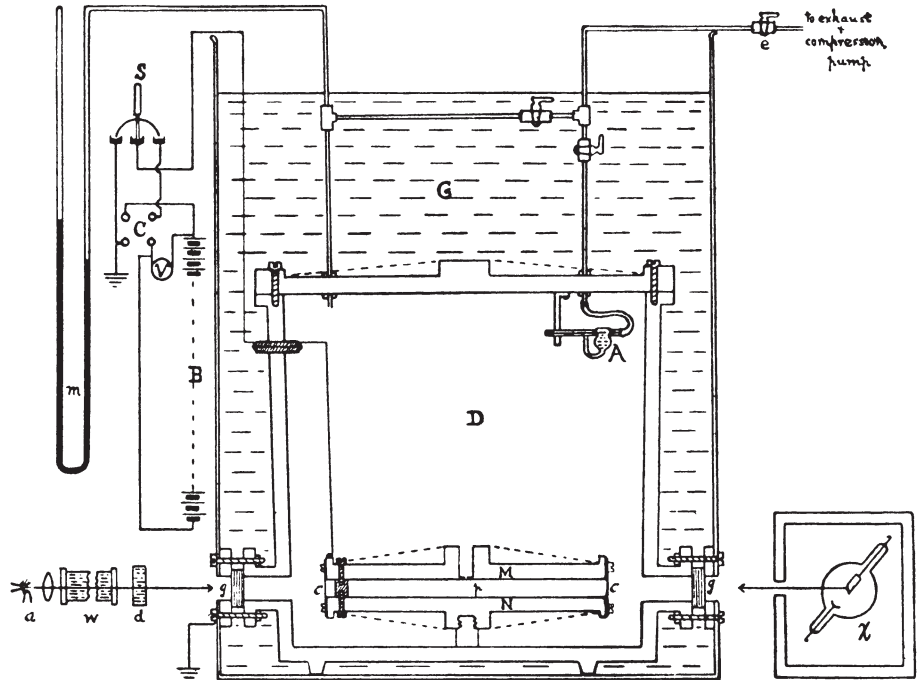
A rézkádban elhelyezett kondenzátorlemezek közötti térrészt a c ablakokkal zárták le, csak a felső lemez egy kis nyílásán keresztül juthattak olajcseppek a vizsgált térrészbe. Az ábrán két ilyen ablak látható, a megfigyelésre szolgáló harmadik a megfigyelt p olajcseppet tartalmazó vízszintes síkban, az Xa egyenessel 18° -os szöget bezárva helyezkedett el.

A kondenzátorlemezek közötti térrészben lévő levegőt a rézkád falán lévő g ablakon belépő X röntgensugárforrás nyalábjába ionizálta. Az ábrán nem látható új optikai megfigyelőegység egy 28 mm-es apertúrájú, 12,5 cm-es fókusztávolságú akromatikus lencséből és egy 12 mm fókusztávolságú okulárból állt. A megfigyelőtér megvilágítására az a ívlámpa szolgált. A gázolaj hőmérsékletének $0,02^\circ\text{C}$ -on belüli ingadozása biztosította a kísérleti eredmények szempontjából létfontosságú állandó hőmérsékletet. Ez a mérések során $22,81$ – $23,83^\circ\text{C}$ tartományban volt.

Ugyanakkor az is nagyon fontos volt, hogy a cseppek mozgását ne befolyásolja a levegő áramlása. Ezért a vizsgált térrész lezárásán kívül arról is gondoskodtak, hogy az ívlámpa melegítő hatását kiküszöböljék, a lámpa fényét két cellán vezették keresztül. A w vizet tartalmazó cella hosszúsága 80 cm volt, a d cella réz-kloridot tartalmazott, így kiszűrték az infravörös komponenseket.

A kísérlet menete, az eredmények kiértékelése

A porlasztással előállított olajcseppek közül a kondenzátorlemezek közé bejutott cseppekből egyet kiválasztva figyelték meg annak mozgását. Távolság- és időtartammérésből határozták meg a v_g sebességet elektromos tér nélküli esetben. Ezt követően ionizálták a lemezek közötti térrészben lévő levegőt, így a cseppekre adott nagyságú töltés került. Ezután a kondenzátorlemezre feszültséget kapcsolva a cseppek



4. ábra. Az olajcseppkísérletben használt berendezés sematikus rajza [4].

elektromos tér jelenlétében mozgatták, és az így mért út, idő adatokból is számoltak sebességet (v_e).

A levegőből gyűjthető ionok mennyiségének változtatásával ugyanarra a cseppekre más-más töltésmennyiség került. A töltés sebességekkel való kapcsolatát leíró összefüggést az első részben már levezettük, itt most más alakra rendezve közöljük. A töltésmennyiség a mért adatokból tehát a következő szerint számolható:

$$Q = \frac{4}{3} \pi^3 \sqrt{\frac{9\eta}{2}} \sqrt{\frac{1}{g(\rho - \rho_k)}} \frac{(v_g + v_e) \sqrt{v_g}}{E}, \quad (3)$$

ahol η , ρ_k a levegő viszkozitása, illetve sűrűsége, ρ az olaj sűrűsége, E pedig az elektromos tér erőssége.

Millikan a mérési sorozatokban az elemi töltésmennyiség meghatározásához egy – a mérési hibán belüli – multiplikatív jellegű kapcsolatot keresett. A korábbi elrendezésekkel kapott, különböző cseppekre vonatkozó mérési sorozatokból származó eredmények azonban nem mutattak meggyőzően ilyen kapcsolatot, ami ellentmondott az eredeti feltevéseknek. Ezért Millikan újra részletesen megvizsgálta, és megpróbálta kiküszöbölni a lehetséges hibaforrásokat. A kísérleti hibák csökkentésének módját alább még ismertetjük.

A kísérleti megvalósítás finomítása után már csak az az elméleti hibaforrás maradt, hogy a Stokes-törvény nem érvényes. Ezt az elgondolást látszott alátámasztani az a tény, hogy az eltérés az eredményekben akkor jelentkezett legmarkánsabban, ha az olajcseppek átmérője a levegőmolekulák átlagos szabad úthosszának nagyságrendjébe esett. Millikan arra jutott, hogy a közeg mozgást akadályozó hatásának modellezésére Stokes törvénye eredeti formájában nem alkalmazható.

A cikkben közöltek alapján ezt úgy vette figyelembe, hogy az e elemi töltést a mérési adatokból a következő korrekcióval számolta:

$$e = \frac{Q^*}{\left(1 + A \frac{l}{r}\right)^{3/2}}, \quad (4)$$

ahol Q^* az ugyanazon – de más és más töltésmennyiségekkel bíró – cseppel végzett megfigyelésekben mért adatsorokból nyerhető olyan legkisebb töltésegység, aminek minden mért töltésmennyiség – a mérési hibán belül – egész számú többszöröse, l az átlagos szabad úthossz, r a csepp sugara, A pedig egy tapasztalati úton meghatározott (többször módosított) állandó.

Millikan külön kiemelte, hogy a nevezőben lévő tagot elsősorban l/r pontosítására vezette be, továbbá, hogy a különböző cseppek megfigyelésével kapott töltésadatsorokat elemezve A értékét grafikus módszerrel, empirikus úton állapította meg.

Ábrázolta az átlagos szabad úthossz és a csepp sugara arányának függvényében a Q^* hatványait. Új változókat bevezetve:

$$x := \frac{l}{r}, \quad y := (Q^*)^{2/3} \quad \text{és} \quad y_0 := e^{2/3},$$

a (4) egyenlet a következő alakra írható át:

$$y_0 (1 + Ax) = y \quad (5)$$

Ebből átrendezéssel kapható az A korrekciós konstans:

$$A = \frac{\frac{dy}{dx}}{y_0} = \frac{\text{meredekség}}{\text{tengelymetszet}}. \quad (6)$$

A különböző cseppekkel kapott mérési adatokból elkészítve az (5) grafikont a módszer közvetlenül alkalmas az elemi töltés értékének a meghatározására is, hiszen a tengelymetszet $e^{2/3}$ -nal egyenlő.

A lehetséges kísérleti hibaforrások elemzéséből Millikan arra jutott, hogy az elemi töltés nagyságának meghatározásánál a pontosságot a (3) alapján kiszámolható töltésmennyiségek pontossága, tehát az alábbi hat – mérésből származó – fizikai mennyiség meghatározásának pontossága befolyásolja:

- a $\rho - \rho_k$ sűrűségi tényező,
- az E elektromos térerősség nagysága,
- a levegő η viszkozitása,
- a v_e emelkedési és v_g süllyedési sebességek,
- az olajcseppek r sugara és
- az A állandó, mint korrekciós tényező.

A sűrűségi tényezőtől fakadó bizonytalanság minimálisra csökkent a nagyfinomságú óraolaj használatával, mert annak 23 °C-on mért sűrűsége a vizsgálódás négy hónapja alatt 0,0001%-on belül állandó volt. Az olaj sűrűségére a mértékegység nélkül közölt 0,9199-et használták.

4. táblázat

Millikan kortársainak a levegő viszkozitására kapott eredményei	
szerző és a publikálás ideje	η
I. M. Rapp (1913)	0,00018227
L. Gilchrist (1913)	0,00018257
J. L. Hogg (1905)	0,00018227
H. B. A. Tomlinson (1886)	0,00018258
J. H. Grindley és A. H. Gibson (1908)	0,00018232
átlag	0,00018240

A kondenzátorlemezek között mérhető feszültséget kétféle hitelesített feszültségmérővel ellenőrizték, amelyeknek mérési bizonytalansága 0,05%, illetve 0,1% volt, és a megfigyelés két éve alatt a két készülék mért adatai közötti eltérés legfeljebb 0,04% volt.

A levegő viszkozitásának (újra) meghatározását Millikan hat kortársa – 4. táblázatban látható – eredményeinek összevetésével végezte. Az η értékének ismerete kiemelt jelentőségű, hiszen ennek 0,5%-os pontatlansága e értékében már 0,75% eltérésként jelenik meg.

Mivel az átlag egy esetben sem tért el 0,1%-nál jobban bármelyik értéktől, ezért Millikan arra a következtetésre jutott, hogy η ezen értéke felhasználható a számításokban.

A sebességek méréséhez szükséges távolságméréshez alkalmazott megfigyelőegység 0,5 mm-es lépésekben volt mozgatható, az objektív 25 cm-re volt az olajcsepptől. Ennek fókuszát minden esetben élesre állították, hiszen 0,5 mm eltérés már elhomályosította a képet.

Az időmérésnél az addigiakhoz képest újdonság volt, hogy kronográf helyett egy hitelesített Hipp-kronoszkópot használtak, amely 0,002 másodperces időintervallumok mérésére is képes volt. Ezt a Ryerson-laboratórium legfeljebb 0,2% eltéréssel működő órájával kalibrálták. A sebességek meghatározásához egy adott távolság felének, harmadának a megtételéhez szükséges időket is megmérték, így kontrollálva a sebesség egyenletességét. A tapasztalat szerint az áthaladások időtartamát 10 és 40 másodperc között tartva, a kronográf hibája és a Brown-mozgásból adódó pontatlanságok is kiküszöbölhetőek voltak.

Millikan felvetette, hogy az elektromos tér bekapcsolásával a cseppek torzulhatnak és a hőmozgás hatására a cseppek az azonos tömegű és átmérőjű szilárd részecskéktől eltérően viselkedhetnek – a kísérlet kivitelezése során azonban ilyen jelenségek nem jelentkeztek.

A csepp sugara csupán a korrekciós tényezőben jelenik meg, meghatározása az elektromos tér nélküli mérésekből lehetséges, értéke 0,0001183–0,0005856 cm közötti volt. Millikan számításai – lásd (4) – szerint az e nagyságában megjelenő pontatlanság a részecske sugarának 5-6%-os eltéréséig elhanyagolható.

A mért adatokból – a fentebb ismertetett grafikus módszerrel – meghatározott A korrekciós tényező értékéről Millikan maga is elismerte, hogy csak nagy bizonytalansággal adható meg.

A fenti alapos meggondolások, precíz kísérleti megvalósítás ellenére is a pontatlanságok további csökkentése érdekében kellően nagyszámú mérésből, adatból kell e értékét meghatározni.

Millikan 58 olajcsepp adatait közölte, amelyeket részletesen és kimerítően elemzett. Véggkövetkeztetése az volt, hogy a kísérletsorozat alapján az elemi elektromos töltés értéke:

$$e = (4,774 \pm 0,009) \cdot 10^{-10} \text{ esu} = \\ = (1,592 \pm 0,003) \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Mivel a Faraday-állandó meghatározható az elemi elektromos töltés és az Avogadro-szám szorzataként, így Millikan az utóbbi értékét $6,062 \cdot 10^{23}$ -ban állapította meg.

Az eredmények fogadtatása

Millikan publikációi nagy vitákat váltottak ki a tudományos életben, de a legkitartóbban és legszenvedélyesebben az az osztrák *Felix Ehrenhaft* bírálta azokat, aki 1909-ben még maga is jelentetett meg az elemi töltés meghatározására irányuló kísérleti eredményeket.

A vitát nem Ehrenhaft, hanem maga Millikan indította 1910-es cikkével [3], amiben a kortársak eredményeivel vetette össze sajátját, és külön szövegezte Ehrenhaft 1909-es eredményéről. Bár az elemi töltés nagyságát tekintve az eltérés csak 1,096% volt – négy elvi hibát is felfedezett Ehrenhaft eljárásában, ezért nem fogadta el érvényesnek:

- Ehrenhaft a Stokes-törvényt módosítás nélkül, eredeti formájában alkalmazta igen kisméretű részecskékre, amelyeknek szférikussága is kétséghatározható volt.

- Nem egyazon részecskén mérte a sebességeket, hanem a megfigyelések átlagát használta.

- Nem egyértelműen állapította meg a részecskék sugarát.

- Semmi nem utalt arra, hogy egy-egy részecske több töltésegységet is hordozhat.

Ehrenhaft nem fogadta jól a kritikát, igazának megkérdőjelezését a tudományos kihíváson kívül személyes provokációnak is tekintette, és a következő években – egészen 1925-ig – egy tucat publikációja jelent meg a témában. Tanítványaival azt a célt tűzték ki maguk elé, hogy érdemben megkérdőjelezhessék az elektromosság kvantált természetét – az osztrák fizikus ugyanis elvetette az atomista szemléletet.

Első ilyen munkájában, az 1910. április 21-én kiadott, *Über die Kleinsten Messbaren Elektrizitätsmengen* [6] című publikációjában Ehrenhaft háromszáznál is több cseppen végzett mérések eredményét közölte. A figyelemre méltó műben ezek közül 22 adatait közölte részletesen: ezen cseppek között nem csak egy-

vagy kétszeresen töltött ionizált részecskéket talált, hanem az egység alatti, illetve a többszörösök közötti értékeket is, $4,600 \cdot 10^{-20}$ C-től $2,512 \cdot 10^{-19}$ C-ig ($1,38 \cdot 10^{-10}$ esu és $7,53 \cdot 10^{-10}$ esu) tartó terjedelemben. Következtetése szerint a nagy tartományt felölelő értékek nem a mérési eljárás hibájából származtak, hanem – egyszerűen fogalmazva – így léteznek a természetben.

Ehrenhaft 1910-es cikkeiben [6, 7] alaposan elemzte Millikan munkáját. Minden egyes csepp esetén újraszámolta az arra eső töltést az adott mérési adatok felhasználásával (Millikan maga az emelkedési és süllyedési idők átlagát használta saját publikációjában); így Ehrenhaft eredményei igen nagy szórást mutattak, $2,869 \cdot 10^{-19}$ C-től $9,948 \cdot 10^{-19}$ C-ig.² Ehrenhaft olyan következtetésre jutott, hogy Millikan eljárása paradox helyzetet teremt: egy $5,200 \cdot 10^{-19}$ C töltésű csepp a mérések szerint három elektront hordozott, míg az $5,114 \cdot 10^{-19}$ C töltésű³ négyet.

A vita folytatásaként Millikan több új munkát is megjelentetett, amelyek az ő elméletét támasztották alá. Fletcherrel új, kevésbé párolgó anyagokon kísérletezett, például higanyon, olajon és glicerinen, és nagyszámú méréseik konklúziója az volt, hogy a cseppeken minden esetben az e egész számú többszörösével – a mérési hibán belül – egyenlő mennyiségű töltést találtak. Az új cseppalkotó közegekkel végzett, száznál is több mérés eredménye egyre inkább Millikan igazát támasztotta alá és az 1913-as cikk után az osztrák tudós neve lassan kikopott a köztudatból.

Millikan az 1923-as Nobel-díj átadó ünnepségén elmondott beszédében visszatekintett addigi munkásságára, és a maga részéről lezárta a vitát. 1926-ban Ehrenhaft is elismerte, hogy az elemi töltés létének további támadása felesleges.

A Millikan-kísérlet későbbi megítélése

A Millikan munkásságáról szóló vita azonban akkor még nem ért véget. Néhány évtizeddel ezelőtt, 1978-ban *Gerald Holton* a Caltech levéltárában rábukkant Millikan két eredeti jegyzetfüzetére, amelyek az 1913-as cikkhez tartozó nyers adatokat tartalmazzák.

Holton a *Subelectrons, Presuppositions and the Millikan–Ehrenhaft Dispute* című cikkében [8] részletesen elemzi Millikan és Ehrenhaft munkásságát, a közöttük létrejött konfliktust, és az eredeti jegyzetfüzetekben találtakat is feldolgozta. Már az 1910-es Millikan-cikk után vádolták a szerzőt azzal, hogy szelektált az adatai között, és csak azokat az eredményeket hozta nyilvánosságra, amelyek jól illeszkedtek a korábban felállított modelljébe.

A maitól eltérően az akkori szokásoknak megfelelően a tudományos közleményekben közvetlen mérési adatokat – mérési jegyzőkönyv szintű információkat – is olvashatunk. Millikan tehát részletesen beszámolt

² $8,6 \cdot 10^{-10}$ esu és $29,82 \cdot 10^{-10}$ esu.

³ $15,59 \cdot 10^{-10}$ esu és $15,33 \cdot 10^{-10}$ esu.

a mérésekről és közölte, hogy bizonyos cseppekről nem szolgáltat adatot. Millikan 1910-es cikkében például három, általa nagyon jónak tartott cseppet a feszültség- és távolságtérképek bizonytalansága miatt zárt ki, másik három részecske nem volt megfelelően kiegyensúlyozva és egy további mérés eredménye, amelyben 30%-kal alacsonyabb töltéstartékot kapott, mint e , szintén nem került kiadásra. Millikan osztályozta a kapott értékeket: három csillagot kaptak a „legjobb”, kettőt a „nagyon jó”, egyet a „jó” cseppek; a többi, csillagozás nélküli részecskét az író a „túrhető” kategóriába sorolta. A jegyzetfüzetek nyilvánosságra kerülése még további részletekre világított rá.

Az első füzet egy 1911. október 28-i bejegyzéssel kezdődik az óraolaj sűrűségének meghatározásával, és 110 oldallal később egy 1912. március 11-i méréssel ér véget. A második 1912. március 13-án kezdődik és ugyanezen év április 16-án ér véget, és csak méréseket tartalmaz. Általában egy oldalon egy mérési adatai találhatóak, összesen mintegy 140 olajcseppek kísérlet leírása szerepel a körülbelül félvényi időtartam alatt.

A füzetekből tudhatjuk, hogy a tanítványokkal sora végzett mérések egyenként körülbelül fél órán át tartottak és közöttük általában negyed óra szünet volt. Az ezalatt elvégzett előzetes számításokból kiderült, hogy mennyire volt „jó” a kísérlet. Millikan gyakran látta el személyes megjegyzésekkel az adatokat: az 1912. március 15-i első mérés például „szép” volt, és a „mindenképpen kiadni, ez gyönyörű” gondolatot keltette a fizikusban. A második viszont már kevésbé volt sikeres: e mellett olyan olvasható, hogy „[a] hiba magas, nem [fogom] használni”, majd később azt, hogy „rendbe lehet hozni és valószínűleg oké, de [a pont] nem érdekes”. Több esetben a kísérlet egyéb körülményeiről, például a feszültségforrással vagy a nyomással kapcsolatos problémákról ír. Az 1912. március 15-i mérések közül nem az első volt a legjobb és nem a második a legrosszabb. Nyilvánvaló, hogy amennyiben Ehrenhaft hozzáfért volna ezekhez a füzetekhez, új támadási felületet talált volna Millikannal szemben, és megállapítható, hogy Millikan valóban „szelektálta” az adatokat.

Összegzésül

Millikan munkásságának részletesebb megismerése után megállapíthatjuk, hogy bár nem ő próbálta meg először megmérni az elemi töltés értékét, de ő volt a legeredményesebb. A mások megelőző ötletein alapuló, vízpárát tartalmazó felhőkkel való vizsgálódásai után porlasztással állított elő cseppeket, végül az olaj-

cseppek – mint nem párolgó közeggel végzett – kísérletek vezettek jó eredményre. Míg mások és Millikan kezdeti kísérleteiből származó értékek körülbelül 3-4%-ban, addig az 1913-as eredmény csak 0,62%-ban tér el az elemi töltés ma is elfogadott értékétől. Sikerének többek között az lehetett a titka, hogy a kísérleteket, a használt mérőeszközöket gondosan megtervezte és különös figyelmet fordított a kivitelezésre, a kiértékelésre is. Hiszen az iskolában is tanított – a csepp mozgását befolyásoló erőhatásokat figyelembe vevő – egyszerű modell a nagyon gondosan tervezett berendezésen elvégzett kísérleti kivitelezés mellett is csak „közelítőleg” érvényes. Millikan az adatok értékelését – a mérés körülményeinek, nehézségeinek, problémáinak ismeretében – tapasztalt kísérletező tudósként végezte. A döntésben, hogy melyik kísérletben, melyik csepp mozgásának megfigyeléséből származó adatokat használja fel, szerepet kapott a cseppek mérete, töltése, párolgása és sebessége is; tekintettel az alkalmazott modell elfogadható érvényességére.

Ma már természetesen nem kérdőjelezzük meg az elemi töltés létezését. Értéke a CODATA 2010-es ajánlása alapján $2,2 \cdot 10^{-8}$ relatív standard hibával:

$$1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

A 2018-ban újra definiált mértékegységrendszerben viszont várhatóan rögzített (hiba nélküli) természeti állandónak választjuk, és az áramerősség mértékegységének a definíciójában lesz szerepe [1].

Irodalom

1. Bureau International des Poids et Mesures: Resolution 1 of the 25th CGPM (2014). <http://www.bipm.org/en/news/full-stories/si-roadmap.html>
2. R. A. Millikan, L. Begeman: On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas. *Physical Review* 26/2 (1908) 197–198.
3. R. A. Millikan: A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of that Charge. *Philosophical Magazine and Journal of Science* 6/110 (1910) 209–228.
4. R. A. Millikan: On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant. *The Physical Review* 2/2 (1913) 109–143.
5. H. Fletcher: My work with Millikan on the oil-drop experiment. *Physics Today* 35 (1982) 43–47.
6. F. Ehrenhaft: Über die kleinsten messbaren Elektrizitätsmengen. Zweite vorläufige Mitteilung der Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 4 (1910) 118–119.
7. F. Ehrenhaft: Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons zu untersuchen scheinen. Zweite vorläufige Mitteilung seiner Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 5 (1910) 215.
8. G. Holton: Subelectrons, Presuppositions, and the Millikan–Ehrenhaft Dispute. *Historical Studies in the Physical Sciences* 9 (1978) 161–224.

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

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

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

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

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

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

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

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

Ebben a részben a kozmogónia rövid tudománytörténeti bevezetését követően a bolygók keletkezésének elméletét, azok sikereit és egyelőre nyitott kérdéseit mutatjuk be. Kitérünk a bolygók és protoplanetáris korongjuk között létrejövő kölcsönhatásokra, amelyek befolyásolják a bolygórendszerek végleges szerkezetét.

A ködhipotézis születése

A kozmogónia – a Világegyetem kialakulását kutató tudományág – gyökerei a reneszánsz, sőt az ókori görög filozófusok munkásságáig nyúlnak vissza. *Anaxagórasz* (i. e. 5. sz.) feltevése szerint az égitestek a teret kitöltő ősi ködben születtek, mozgásukat egy alapvető erő okozza. A római költő és filozófus, *Lucrétius* (i. e. 1. sz.) szerint a Föld a nehezebb elemek központban történő kondenzációjából született, az éter a perifériára szorult legkönnyebb elemből, míg a Nap, a Hold és a csillagok a kettő között elterülő tér részben keletkeztek.

René Descartes (17. sz.) a görög filozófusok elképzelését követve azt feltételezte, hogy a csillagok egy örvény középpontjában keletkeznek, és később bolygókká vagy üstökösökké válhatnak. Az isteni erő által rájuk kényszerített mozgás következtében a nehezebb testek spirális pályán az örvény középpontja felé vándorolnak.

Emanuel Swedenborg (18. sz.) svéd természetkutató Descartes örvényhipotézisét továbbfejlesztve felismerte, hogy a Naprendszer égitestjeinek közös eredete kell, hogy legyen, magyarázva azok fizikai tulajdonságait, illetve mozgásuk okát. Hipotézise szerint a bolygók a Napból dobódtak ki, és az örvénnyel történő kölcsönhatásuk következtében egyre távolabb, jelenlegi pályáikra sodródtak.

Immanuel Kant (18. sz.) *Newton* tömegvonzási törvényét alapul véve olyan hipotézist dolgozott ki, amelyben a Világegyetem és a Naprendszer születését összekapcsolta. Feltevése szerint a galaxisok csillagai a Világot kitöltő végtelen ősi ködből kondenzálódtak. Kant azt gondolta, hogy a Naprendszer keletkezésében is hasonló erők játszottak szerepet. A Nap, az akkor ismert hat bolygó és holdjai, valamint az üstökösök, csakúgy, mint a csillagok, ugyanabból az ősi ködből jöttek létre.

A 18. század végén *Pierre Simon de Laplace* Kant munkásságát nem ismerve alkotta meg a ma ködhipotézisnek nevezett elképzelést. Eszerint a forró, fiatal Napot a jelenlegi bolygópályákon is túlnyúló atmoszféra vette körül, amelyből a Naprendszer bolygói kondenzáció

révén alakultak ki. A bolygók holdjai pedig az éppen kondenzálódó bolygó körül, azonos módon keletkeztek. A 20. század közepén megszületett modern bolygókeletkezési elméletek lényegében Laplace és Kant ködhipotézisét fogalmazzák meg kvantitatív módon.

Modern bolygókeletkezési elméletek

Ma azt gondoljuk, hogy a csillagok a csillagközi térben levő molekulafelhők összeomlásakor, azok középpontjában jönnek létre. A protocsillagot körülvevő felhő tovább zsugorodik és az impulzusmomentum megmaradása következtében egy vékony koronggá lapul, amelyet *protoplanetáris korongnak* nevezünk. A protoplanetáris korongot 99% gáz (túlnyomórészt hidrogén) és csupán 1%-nyi por (jellemzően mikrométeres nagyságú, a csillagszéllel kifújtt, főleg szilíciumkristályokból álló szilárd szemcsék) alkotja. A korongbeli gáz vertikális sűrűségeloszlása Gauss-profil követ (a korong síkjában sűrűbb, arra merőlegesen egy ritka korongatmoszféra alakul ki), míg radiális irányban sűrűségeloszlása

$$\Sigma \sim R^{-n}$$

alakú, ahol $-1,5 < n < -0,5$.

A bolygókeletkezés *gravitációs instabilitási* elmélete szerint a csillag keletkezésében szerepet játszó gravitációs kontrakció ismétlődik meg a protoplanetáris korongban. Mindössze százezer év alatt létrejönnek az óriás gázbolygók, amelyek gravitációs vonzásuk miatt nagy mennyiségű port gyűjtenek, létrehozva azok szilárd magját. A Föld-szerű bolygók keletkezése talán azzal magyarázható, hogy a kezdetben hatalmas gázköppennyel burkolt óriásbolygók a csillaghoz közel kerülve elvesztik légkörük jelentős részét.

Ahhoz, hogy egy anyagcsomó gravitációsan instabilá váljon és elkezdjen összeomlani, az kell, hogy saját gravitációs vonzása nagyobb legyen, mint a központi csillagé. Kvalitatíve azt mondhatjuk, hogy a protoplanetáris korong akkor válik gravitációsan instabilá, ha

$$Q = \frac{c_s}{\pi G \Sigma} < 1$$

(*Alar Toomre* 1964-es munkája alapján Toomre-kritérium), ahol c_s a hangsebesség, Σ pedig a gáz felületi sűrűsége.

A sűrűsödő gáz felmelegedése meggátolja annak további összehúzódását. Ahhoz, hogy egy bolygó kialakulhasson, a gáznak gyorsan kell hűlnie, viszont a korong gravitációs instabilitását okozó nagy sűrűség ez ellen dolgozik. Az az elegendően nagy tömegű protoplanetáris korong, amelyik már gravitációsan instabil,

A szerző köszönetét fejezi ki *Szabados Lászlónak* a kézirat gondozásáért és *Ublár Karolának* a cikk szövegének tökéletesítéséért.

túl nagy tömegű ahhoz, hogy hatékonyan tudjon hűlni. Az elmélet kvantitatív vizsgálata során arra a következtetésre jutunk, hogy a bolygók ily módon csak a csillagtól elképesztően nagy távolságra (> 40 CSE) tudnak kialakulni, kérdésessé téve a folyamat létrejöttét az olyan bolygórendszerekben, mint a Naprendszer.

Viktor Szafronov 1969-ben publikált könyvében a Naprendszer keletkezését a protoplanetáris korongban keringő 1%-nyi apró porszemcsék ütközése és összetapadása során bekövetkező, közel 12 nagyságrendet átfogó méretnövekedés segítségével magyarázza. Bár Szafronov munkássága könyvének megjelenése után csak fél évtizeddel vált ismertté, a ma széles körben elfogadott bolygókeletkezési elmélet, az úgynevezett *bolygómag-akkréciós* elmélet alapjait ez teremtette meg. Az elmélet szerint a Föld-szerű kőzetbolygók és az óriásbolygók meglehetősen összetett folyamat során keletkeznek, amelynek főbb fázisai a következők:

1. A por növekedése során a mikrométeres szemcsék összetapadnak és milli- vagy centiméteres méretű agglomerátumokat alkotnak.

2. Az agglomerátumok ütközése során a méretnövekedés tovább folytatódik, és kialakulnak a kilométeres planetezimálok.

3. A planetezimálok, gravitációs vonzásuknak köszönhetően egybeolvadnak és kialakulnak a bolygócsírák, amelyek további ütközéseik révén Föld-szerű kőzetbolygókká növekednek.

4. Az elegendően nagy tömegű kőzetbolygók hatalmas gázköpenyt gyűjtenek, és kialakulnak az óriásbolygók.

A porszemcsék növekedése

A protoplanetáris korongbeli por szemcséi kezdetben a Kepler-törvény szerinti körsebességgel, míg a gáz ennél lassabban kering a csillag körül. Az utóbbi jelenség oka az, hogy a gáz sűrűsége a csillagtól mért távolsággal csökken, és ez kifelé mutató nyomásgradienst okoz. Így a gázra nemcsak a csillag vonzóereje hat, hanem a csillagtól kifelé mutató nyomóerő is. Ezért a gáz keringési sebessége

$$v_g = v_K \sqrt{1 - n \left(\frac{c_s}{v_K} \right)^2}$$

lesz, ahol $\Sigma \sim R^{-1.5}$ a gáz felületi sűrűsége, v_K a Kepler-körsebesség. A gáz keringési sebessége közelítőleg 0,2%-kal lesz kisebb, mint a körpálya sebessége, tehát a porszemcsék és a gáz közötti sebességkülönbség hatására a porra áramlásával ellentétes irányú fékezőerő hat. Ennek két fontos következménye van: a porszemcsék vertikális ülepedése és csillag felé áramlása.

A porszemcsék süllyedni kezdenek a korong síkja felé, mivel a csillag gravitációs vonzása következtében vertikális irányú erő hat rájuk. Az ülepedés állandó sebességű, mert a por süllyedését fékezni igyekszik a gázzal történő kölcsönhatás. Részletes számítá-

sok szerint a mikrométeres méretű porszemcsék néhány százezer év alatt teljes egészében lesüllyednek a korong síkjába. A gáz fékezőereje azonban annál nagyobb, minél nagyobb a porszemcse, így az eltérő méretű porszemcsék más-más sebességgel ülepednek. Ennek következtében a porszemcsék kis ütközési sebesség esetén összetapadnak, míg nagy ütközési sebesség esetén szétaprózódnak. Az azonos méretű porszemcsék jellemzően kis sebességgel, míg az eltérő méretű szemcsék nagy sebességgel ütköznek. Így a mikrométeres porszemcsék mellett milliméteres vagy centiméteres porszemcsék is megjelennek, amelyek méretükkel arányosan, egyre gyorsabban süllyednek a korong fősíkja felé.

A porszemcsék csillag felé történő áramlása azért következik be, mert a gáz által okozott – a légellenállási erőhöz hasonló – súrlódási erő következtében a porszemcsék veszítenek energiájukból, és egyre kisebb sugarú pályára kényszerülnek. A mikrométeres porszemcsék mozgása még szorosan csatolódik a protoplanetáris korongbeli gáz csillagkörtüli áramlásához, de a mm-es, illetve cm-es szemcsék azimutális sebessége kisebb lesz a gázénál. A szemcseméret növekedésével a gáz és a por relatív sebessége egy bizonyos mérettartományig növekszik, felette újra csökken. Ez a sebességkülönbség egy átlagos protoplanetáris korong 1–10 CSE tartományában a deciméteres és méteres nagyságú porképződményekre (planetezimálok) lesz maximális. A rájuk ható fékezőerő olyan nagy, hogy a csillag néhány ezer év alatt 10 CSE távolságból elnyelné őket. A deciméteres és méteres planetezimálok gyors eltűnése komoly problémát jelenthet a bolygókeletkezés szempontjából, hiszen ha a méretnövekedés nem elegendően gyors folyamat, akkor nem marad elegendő mennyiségű szilárd anyag a bolygók képződéséhez.

További probléma, hogy a növekvő szemcseméret egyre nagyobb ütközési sebességet okoz. A maximális radiális sebességgel befelé áramló szemcsék átlagos ütközési sebessége elérheti a 30 m/s-ot. Ilyen ütközési sebesség esetén azonban nehéz elképzelni, hogy a szemcsék összetapadjanak, ellenkezőleg, inkább szétaprózódnak. A szemcsék koagulációját leíró integrodifferenciál-egyenletek (Marian Smoluchowski lengyel fizikus 1916-os publikációjában jelenik meg először) megoldásai arra az eredményre vezettek, hogy egészen 100 m/s ütközési sebességig van némi esély arra, hogy a protoplanetáris korong szemcséi elérjék a néhány milliméteres átmérőt. Nagyobb méretű szemcsék ütközésénél azonban már a 10 m/s-os sebesség is azok széteséséhez vezet. Ha a szemcsék szerkezete porózus, vagy jég borítja a felszínüket, abban az esetben hatékonyan tudják adszorbeálni az ütközési energiát 10–20 m/s sebességig.

Planetezimálok kialakulása

Szafronov már 1964-ben, tőle függetlenül pedig Goldreich és Ward 1973-ban felvetették annak lehetőségét, hogy a korong síkjában felhalmozódó nagy mennyiségű

gű por gravitációsan instabillá válhat. Lineáris stabilitásanalízis szerint, ha a por Σ_d felületi sűrűségére felírt Toomre-kritériumnak megfelelően

$$\frac{c_s}{\pi G \Sigma_d} \leq 1$$

teljesül, akkor nagyjából $3 \cdot 10^{18}$ g tömegű, 10-20 km-es méretű planetézimálok jöhetnek létre. Mivel a korongban csak 1%-nyi por van, a gravitációs instabilitáshoz rendkívül vékony porkorongra, a korong eredeti vastagságának tízezrednyi részére van szükség. Viszont a gáz Kelvin–Helmholtz-instabilitása miatt a gázban turbulenciák jelennek meg, ami megakadályozza a kellően vékony porréteg kialakulását.

Újabb numerikus vizsgálatok megmutatták, hogy a porszemcsék csomósodásai a gázzal kölcsönhatva olyan turbulenciákat keltenek, amelyekben a szemcseméret növekedése felgyorsul, és rövid idő alatt akár 100-1000 km átmérőjű planetézimálok keletkezhetnek. A planetézimálok effajta növekedését gravoturbulens planetézimálokagulációnak nevezzük, amelyben a deciméteres és méteres szemcsék csillag által történő elnyelődése elkerülhető az igen gyors szemcsenövekedés révén.

A Naprendszerben felfedezett kis égitestek, az aszteroidák vagy a Földre hulló meteoritok az egykori planetézimálok ütközése során keletkezettek. Ezért, bár sok még a kérdőjel a planetézimálok keletkezésével kapcsolatban, a Naprendszer kis égitesteinek létezése alátámasztja azt a hipotézist, hogy a planetézimáloknak százezer évnél rövidebb idő alatt kellett létrejönniük.

Föld-szerű kőzetbolygók kialakulása

A planetézimálok kölcsönös ütközéseik révén egyre nagyobb testekké, bolygócsírákká állnak össze. Ezt az teszi lehetővé, hogy a planetézimálok olyan pályán keletkeznek, amelyek excentricitása és inklinációja (pályahajlás a korong fősíkjához képest) nullától eltérő. Minél nagyobb a planetézimálok átlagos excentricitása és pályahajlása, annál gyakrabban keresztezik egymás pályáját keringésük során. Szoros megközelítések esetén a kölcsönös gravitációs vonzás hatására megnő az ütközési gyakoriság. Ennek következtében minél nagyobb egy planetézimál tömege, annál gyakrabban ütközik más planetézimálokkal, és tömege annál gyorsabban nő. Ez azt eredményezi, hogy a tömegnövekedés

$$M(t) = \frac{1}{(M_0^{-1/3} - kt)^3},$$

ami nem exponenciális, de egyre gyorsuló ütemű.

A néhány száz kilométeres planetézimálok saját gravitációs összetartó ereje elegendően nagy ahhoz, hogy két ekkora test ütközése során a keletkező kisebb darabok ne távolodjanak el egymástól, hanem gravitációsan kötött égitestet alkossanak. Ésszerű te-

hát azt feltételeznünk, hogy a planetézimálok ütközésekor tömegük nagy része egyesül. Növekedésüket lényegében csak a gravitációs erő befolyásolja, ugyanis a korongban jelen levő gáz fékezőereje az ekkora méretű testekre már elhanyagolható. Ennek ellenére a kőzetbolygók kialakulásának modellezése komoly kihívás, mivel elképesztően nagyszámú, közel 10^9 , átlagosan 5 km nagyságú planetézimál kölcsönös gravitációjának hatását (ami $3 \cdot 10^{18}$ erőkomponens kiszámítását jelenti) kell szimultán meghatározni.

A tömegnövekedés nem korlátlan, mert előbb-utóbb kiürül a bolygócsíra környezete, és nem tud újabb planetézimálokat elnyelni. Az a tartomány, ahonnan egy bolygócsíra képes egyáltalán planetézimálokat elnyelni, nagyjából megegyezik a pályája mentén elhelyezkedő

$$R_H = a_{pl} \left(\frac{m_{pl}}{M_*} \right)^{1/3}$$

Hill-sugár vastagságú gyűrűvel, ahol a_{pl} és m_{pl} a bolygócsíra pályasugara és tömege. A gyűrű mérete nem lineárisan növekszik a tömeggel, így a benne lévő, még elnyelhető planetézimálok össztömege sem. Azaz létezik egy maximális tömeg, az izolációs tömeg, legfeljebb ekkorára nőhet meg egy bolygócsíra. Ennek nagysága

$$M_{izo} = C M_*^{-1/2} \Sigma_{pl}^{3/2} a_{pl}^3,$$

ahol $C \approx 165$, Σ_{pl} a planetézimálok kezdeti sűrűsége a bolygócsíra keringési távolságán. A Naprendszer kezdeti állapotának megfelelő protoplanetáris korongban, a Föld távolságában ez csupán 0,07 Föld-tömeg (M_\oplus), míg a Jupiter távolságában már 9 M_\oplus lenne.

A kőzetbolygók keletkezése tehát gyors növekedéssel indul, ehhez az anyagot a 100-1000 km-es planetézimálok szolgáltatják. A bolygócsírák méretnövekedése megáll, amint elemésztették a pályáik közelében keringő planetézimálokat, így 10^5 - 10^6 év elteltével nagyjából 0,01-0,1 M_\oplus tömegű, közel 10 Hill-sugár átlagos szeparációjú testek keletkeznek (6. ábra színesben a hátsó belső borítón).

Ezt követően a bolygócsírák már nem izoláltan fejlődnek, hanem perturbálják egymás pályáját, aminek eredményeként összeütköznek és egybeolvadnak, vagy kiszórják egymást a korongból. Ez egy több tízmillió évig tartó kaotikus folyamat, azaz közel azonos kezdőfeltételek esetén a bolygórendszer végső szerkezete lényegesen eltérő lehet. Így ahhoz, hogy az elméletet összevessük a Naprendszer vagy a távoli csillagok körül megfigyelt bolygórendszerek szerkezetével, számos N-test-szimulációban kialakuló (a 6. ábrán bemutatott modellekhez hasonló) bolygók konfiguráció statisztikus átlagát kell vennünk.

Az utóbbi évtizedben végzett elméleti kutatások feltárták, hogy a kőzetbolygók kialakulása erőteljesen függ a planetézimálok kezdeti Σ_{pl} sűrűségétől: nagyobb planetézimálsűrűség általában kevesebb és

nagyobb tömegű kőzetbolygó kialakulását eredményezi. A Naprendszer kialakulását szimuláló numerikus modell (Nice-modell) csak abban az esetben adja vissza a megfigyelt szerkezetet, ha a bolygócsírák keletkezését követően már jelen vannak a Naprendszer óriásbolygói. Ez érthető, hiszen az óriásbolygók erősen perturbálhatták a kaotikus bolygórendszert, kialakítva a kőzetbolygók ma megfigyelhető alacsony excentricitású és inklinációjú pályáit. Újabb vizsgálatok szerint a Jupiter és Szaturnusz együttes, először a csillag felé történő, majd a Mars pályájánál megforduló, kifelé történő migrációja (Grand Tack-modell) szükséges ahhoz, hogy a Mars a ma megfigyelhető helyen és $0,1 M_{\oplus}$ tömeggel keletkezzen. A modell segítségével azt is meg tudjuk magyarázni, hogy a Naprendszer távolabbi régióiból az óriásbolygók perturbációi révén miként jutott el az életet adó víz a protoplanetáris korongnak a Föld keringési távolságán elhelyezkedő, vízben szegény tartományába.

Óriásbolygók kialakulása

Naprendszerünkben az óriásbolygók tömege $0,05-1 M_{Jup}$ Jupiter-tömegnyi (M_{Jup}), míg a távoli csillagok körül akár $10 M_{Jup}$ óriásbolygók is keringenek. A Naprendszer óriásbolygóinak tömegéből azonban csak elenyésző rész a szilárd mag, ami a mérések szerint (az óriásbolygók közelében elhaladó szondák pályájának perturbációjából) a Jupiter és a Szaturnusz esetében <10 és $15 M_{\oplus}$. Mivel a fennmaradó tömeg (például a Jupiter esetében közel $290 M_{\oplus}$) a bolygó gázköpenyében van, az óriásbolygókat gázóriásoknak is nevezzük.

Egy bolygó akkor tud számottevő atmoszférát létrehozni, ha elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy tömegvonzása következtében a gáz ne szökjön el. Ahhoz, hogy egy Nap-tömegű csillag körül keringő bolygó szilárd magjának tömegével összemérhető (legalább 10% -nyi) atmoszférát legyen képes fenntartani, legalább $0,2 M_{\oplus}$ -nek kell lennie.

Az óriásbolygó szilárd magja a korábban bemutatott módon, a planetézimálok akkréciója során növekszik. Mint láttuk, a szilárd mag növekedése az izolációs tömegnél megáll. A Naprendszert létrehozó protoplanetáris korongban a Jupiter jelenlegi keringési távolságában ($5,2$ CSE) az izolációs tömeg $10-15 M_{\oplus}$. Egy ekkora tömegű bolygómag már számottevő nagyságú gázköpenyt gyűjt. A bolygó atmoszférájának növekedése a kezdeti szakaszban még hidrosztatikai egyensúlyban van. Ennek fenntartásához az kell, hogy a planetézimálok becsapódásakor keletkező energiát és az atmoszféra zsugorodásakor felszabaduló gravitációs potenciális energiát az atmoszféra ki tudja sugározni radiatív diffúzió, vagy az atmoszférában zajló konvekció útján.

Amint az atmoszféra tömege eléri a szilárd mag tömegét, nem tud hidrosztatikai egyensúlyban maradni, és összeomlik. Ekkor a bolygó Hill-szférájába hirtelen friss gáz áramlik a korongból, ami növeli a Hill-szféra sugarát, és a gázköpeny növekedése időben

exponenciálissá válik. A tömegnövekedést így már nem az atmoszféra sugárzási képessége, hanem a protoplanetáris korongban lévő gáz mennyisége határozza meg.

Elsőként *James B. Pollack* számította ki 1986-ban egy, a Naprendszer kezdeti protoplanetáris korongjában található Jupiter-tömegű óriásbolygó kialakulását. Számításai szerint a $10 M_{\oplus}$ izolációs tömeget elérő bolygómag mindössze félmillió év alatt alakul ki. Az atmoszféra hidrosztatikus növekedési fázisa – amíg tömege eléri a bolygómag tömegét – majd 7 millió évig tart. Az ezt követő exponenciális tömegnövekedés során a bolygó Jupiter-tömegnyi gázköpenyt gyűjt, mindössze néhány százezer év alatt.

Az óriásbolygók növekedési időskáláját tehát lényegében az atmoszféra hidrosztatikai növekedési fázisa határozza meg, ami

$$\tau \approx 10^8 \frac{\kappa_g}{M_{mag}^{2.5}} \text{ év},$$

ahol M_{mag} a bolygómag M_{\oplus} egységekben, míg κ_g az atmoszféra (lényegében az abban található por) opacitása cm^2/g egységekben. Tehát, ha a gázköpeny opacitása vagy az izolációs tömeg kisebb, akkor az óriásbolygók kialakulása felgyorsulhat.

A Pollack számításain alapuló újabb modellek szerint az óriásbolygók akár 3 millió év alatt is kialakulhatnak, ha a por opacitását a csillagközi anyagban megfigyelt érték 2% -ára csökkentjük. Ha a kezdeti korong tömege jelentősen nagyobb lenne, akkor az izolációs tömeg növekedne, ami ezzel arányosan növelné a kritikus tömeget. Nagyobb planetézimálsűrűség esetén a hidrosztatikai növekedés fázisa felgyorsul, a megnövekedett kritikus tömeget rövidebb idő alatt érné el a bolygómag. Így a nagyobb planetézimálsűrűségű korongban szintén gyorsabban tud kialakulni az óriásbolygó.

A bolygók migrációja

A protoplanetáris korong magas Reynolds-száma miatt a gáz turbulens. A csillag röntgensugárzása, illetve a kozmikus térből érkező gammasugárzás gyengén ionizálja a gázt. A részlegesen ionizált gáz a turbulens áramlás és a csillag mágneses terével történő kölcsönhatás következtében folyamatosan impulzuszórást veszít, ami a gáz lassú áramlását eredményezi a csillag felé. Ez olyan, mintha a protoplanetáris korongbeli gáznak viszkozitása lenne, annak ellenére, hogy a molekuláris viszkozitás elenyésző. Ezért a protoplanetáris korongok a keletkezésüket követő nagyjából 5 millió év alatt eltűnnek, még akkor is, ha anyagukat nem emésztik fel a keletkező bolygók. Ezt mérési eredmények is igazolják, amelyek szerint az észlelhető protoplanetáris korongok száma drasztikusan csökken, ha a központi csillag életkora meghaladja az 5 millió évet. Ezért a még születőben levő bolygók a protoplane-

táris korongjuk gázába ágyazódva keringenek. A korongbeli gáz és a bolygó között történő impulzusmomentum-cserének fontos következményei vannak a bolygók keringési távolsága, excentricitása és pályahajlása tekintetében.

A relatíve kis tömegű bolygók (jellemzően $<10 M_{\oplus}$) és a protoplanetáris korongbeli gáz között létrejövő gravitációs kölcsönhatás miatt spirális alakú, a bolygóval együtt mozgó sűrűség hullám keletkezik (7. *ábra* színesben a hátsó belső borítón). A sűrűség hullámban felgyülemlett gáz gravitációs hatása viszont visszahat a bolygó mozgására. A bolygónak a pályáján belül, illetve azon kívül keringő spirális anyag-többség impulzusmomentumot ad vagy vesz el. A pályasugár az impulzusmomentum változásának előjelétől függően nő vagy csökken. Részletes vizsgálatok szerint jellemzően a bolygópálya mérete csökken. Ha azonban a gáz elegendően lassan hűl, akkor a korábitól kissé eltérő szerkezetű spirálhullámok alakulnak ki. Ez esetben a bolygók kifelé is migrálhatnak, de csak a korong belső (<5 CSE) tartományában.

A kis tömegű bolygók I. típusú migrációját leíró elmélet szerint a pályasugár csökkenése,

$$\frac{da}{dt} \sim \frac{a^{3/2}}{b^2} \frac{M_p}{M_{\star}} \Sigma_g.$$

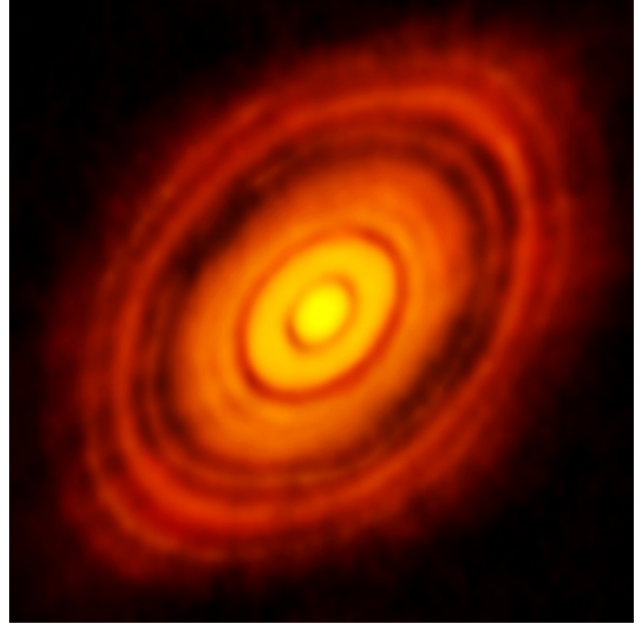
A bolygómigráció annál gyorsabb, minél nagyobb a bolygó és/vagy a korong tömege, a korong vastagsága, vagy minél távolabb kering a bolygó a csillagtól. A pályasugár változását megadó differenciálegyenlet numerikus megoldása szerint a kezdetben 5 CSE távolságban keringő 1-15 M_{\oplus} bolygót kevesebb, mint 1 millió év alatt óhatatlanul elnyeli a központi csillag.

Míg a kisebb tömegű bolygó gravitációs perturbációi lényegesen nem változtatják meg a protoplanetáris korong szerkezetét, az óriásbolygók átfomálják azt. Egy Jupiter-tömegű óriásbolygó és a korong közötti impulzusmomentum-csere következtében a bolygón belül keringő gáz impulzusmomentumot veszít, míg a külső tartományokban lévő nyer. Ennek következtében mind a bolygón belül, mind a kívül keringő gáz eltávolodik a bolygópályától, azaz rést nyit a bolygó pályája mentén (8. *ábra* színesben a hátsó belső borítón). A rés azonban nem növekedhet minden határon túl, mert a gáz viszkozitása ezt megakadályozza. A rés annál szélesebb lesz, minél nagyobb a bolygó tömege, illetve minél kisebb a gáz effektív viszkozitása. A spirálhullámok nem képesek lényeges mértékben megváltoztatni a nagy tömegű bolygó impulzusmomentumát. Viszont a korong viszkozitása jóval nagyobb, mint azt a molekuláris viszkozitás eredményezné, így a gáz folyamatosan áramlik a csillag felé, magával sodorva az óriásbolygót.

Az óriásbolygók II. típusú migrációját leíró elmélet szerint a keringési sugár változása

$$\frac{da}{dt} \sim \frac{\alpha}{a},$$

ahol α a korong effektív viszkozitására jellemző szám.



9. *ábra*. Az ESO ALMA rádió-interferometriás távcsőrendszerével készült kép a HL Tauri csillag protoplanetáris korongjáról.

Mint látható, bármilyen tömegű óriásbolygó ugyanolyan sebességgel migrál, mert pályasugarának változása független a tömegétől. Viszont minél nagyobb a korong viszkozitása, annál gyorsabban migrál az óriásbolygó. A pályasugár változását megadó differenciálegyenlet numerikus megoldása szerint (feltételezve, hogy a korongbeli gáz effektív viszkozitása $0,001 \leq \alpha \leq 0,01$) a kezdetben 5 CSE távolságban keringő óriásbolygót 1 millió éven belül elnyeli a központi csillag.

A bolygókeletkezés nyitott kérdései

A modern bolygómag-akkréciós elmélet segítségével le tudjuk írni, hogy a protoplanetáris korongok anyagának csupán 1%-át kitevő porszemcsék növekedése következtében hogyan alakulnak ki a Föld-szerű kőzetbolygók és a Naprendszer, illetve a távoli bolygórendszerek óriásbolygói.

De az ördög a részletekben rejlik.

Nem értjük egészen, hogy a bolygók alapvető építőelemei, a méteres nagyságú planetézimálok csillagba történő gyors behullását mi akadályozza meg.

Nem világos, hogyan jöhetnek létre az óriásbolygók olyan rövid idő alatt, amennyi rendelkezésükre áll a korong mindössze 5 millió éves élettartama alatt. A ma ismert elméletek szerint a kis és nagy tömegű bolygókat migrációjuk következtében szülőcsillaguk óhatatlanul elnyelné. Vajon mi menti meg őket?

Egyelőre megválaszolatlan kérdés az is, hogy a kettős csillagrendszerekben megfigyelt bolygók hogyan tudtak létrejönni. A kísérőcsillag ugyanis oly mértékben perturbálja a porszemcsék pályáit, hogy ütközésük (a megnövekedett pályaeccentricitás miatt) túl nagy sebességgel történik ahhoz, hogy összetá-

padjanak, megakadályozva a nagyobb méretű plane-
tezimálok kialakulását.

Cikkünk végére hagyunk egy kakukktójást. Az Európai Déli Obszervatórium (ESO) 2014. novemberében tette közzé a HL Tauri csillag körül kialakult, pusztán 1 millió éves protoplanetáris korongról a miliméteres hullámhossztartományban rögzített fényképet¹ (9. ábra). A korongban számos rés látható, de bolygót – se kicsit, se nagyot – egyet sem találtak. Egyáltalán bolygók hozták létre a képen látható réseket? Ha igen, akkor hogyan jöhettek létre ilyen rövid idő alatt?

¹ Folyóiratunk tavaly decemberi címlapján is megtekinthető.

A csillagászati észlelési technikák gyors fejlődésének köszönhetően egyre többet tudunk meg a távoli bolygórendszerekről, de még bőven akad megválaszolandó kérdés. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetének több kutatócsoportja – a jelen cikksorozat szerzője által vezetett Numerikus Asztrofizika Kutatócsoport munkatársai is – ezen a fiatal tudományterületen végez kutatásokat.

Ajánlott irodalom

Abruzzo, A. J.: The Origins of the Nebular Hypothesis – Or, the Genesis of a Theoretical Cul-de-sac. *The General Science Journal*, 2009. június 15.

Armitage, P.: *Astrophysics of Planet Formation*. Cambridge University Press, 2010.

ATOMERŐMŰVI HULLADÉKOK KEZELÉSE – 2. RÉSZ

Fábián Margit

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Radioaktív hulladékok kezelése

Nemzetközi ajánlásnak megfelelően a radioaktív hulladék mennyiségét a gyakorlatilag elérhető legalacsonyabb szinten kell tartani, amelynek egyik feltétele, hogy már a hulladék keletkezését minimalizálni kell. A radioaktív hulladék-kezelés célja a hulladék mennyiségének, valamint a radioaktív szennyezők mobilitásának a csökkentése.

A radioaktív hulladékok kondicionálása

A kondicionálás célja a hulladék stabilizálása, valamint a hulladékban található szennyezők immobilizálása. Szerepe, hogy szállításra, végleges elhelyezésre alkalmasá tegye a hulladékot. A hulladékot a kondicionálás során aktivitáskoncentrációjuknak megfelelően különböző kötőanyagba ágyazzák, stabil hulladékmátrixot képezve.

Többféle kondicionálási eljárás ismert:

- a cementezés:
 - kis aktivitású hulladék (LLW) esetén betonba öntés,
 - kis és közepes aktivitású hulladék (szerves LLW, ILW) esetén a bitumenbe ágyazás;
- hosszú élettartamú, nagy aktivitású hulladék (HLW) esetén az üvegesítés;
- vagy a kerámiába foglalás.

Cementezés (LLW)

A kis és közepes aktivitású, főleg folyadékállapotú és szilárd radioaktív hulladékok kondicionálására egyik leggyakoribb, jól bevált eljárás az acélhordókba történő cementezés, betonozás. Költséghatékony, alacsony hőmérsékleten való egyszerű előállítási eljárás. A jól ismert technológia olyan mátrixanyagot eredményez,

amely nem éghető, jó termikus stabilitással rendelkezik, kémiai és biokémiai stabil [5].

A beton legegyszerűbben a cement, kavics, víz (folyadék) és adalékok keverékeként definiálható. A technológia lényegi eleme a cement (szervesetlen kristályos anyagkeverék), amely legtöbb esetben klasszikus portlandcement. A gyártás során 75-80% mészkő (kalcium-karbonát) és 20-25% agyag (vizes kalcium-alumínium-szilikát) keverékét zsugorodásig égetik. Ennek a több mint 1400 °C-on végzett kalcinálásnak a terméke a darabos *klinker*, amihez ezután néhány százalékban kötőanyagot adnak. A cement fő kémiai alkotórészei: SiO₂, CaO, Al₂O₃ + H₂O, FeO stb. A teljes tömegre nézve a 20% radioaktív hulladék – 80% cement arány tekintetében átlagosnak. A kondicionált hulladékban lévő cement az immobilizáláson kívül árnyékoló hatást is jelent a radioaktivitás által okozható külső sugárterheléssel szemben. A cement a megkötés során kikristályosodik és közben vizet vesz fel, ami kiváló vízállóságot biztosít, ezt nevezzük szilárdulásnak. A cementezett hulladékot 200/400 literes acélhordókba töltik. A hordó további védelmet jelent, amelyet bentonittal vesznek körbe (a *bentonit* 60-90%-ban montmorillonitot tartalmazó, ásványi eredetű anyag). További összetevők lehetnek: kvarc, krisztobalit, földpátok, muszkovit, biotit, illit, kaolinit, klorit, karbonátok, zeolitok, alumínium-hidroxid, apatit, hematit, limonit, nehézasványok, illetve amorf komponensek – mindez a víz hatására megduzzad, ezzel kitöltve a hordó körüli űrt. Az így kialakult védőréteg kettős funkcióval bír: csillapítja a földmozgások kártékony hatását és megakadályozza, hogy sérülés esetén radioaktív víz kerüljön a talajba. Nagy aktivitású hulladék befogadására kevésbé alkalmas, mert a tartós, nagy hőterheléstől vízvesztés miatt idővel degradálódik.

Bitumenezés (LLW és ILW)

A bitumen általánosan a nagy molekulatömegű szénhidrogének széles skáláját foglalja magába. Kőolajból lepárlás útján nyert mesterséges anyag, kis mennyiségben a természetben is megtalálható. A bitumen minőségét és tulajdonságait az alapanyagot képező ásványolaj (paraffinok, aszfaltgyanták, olajok, aszfaltének) összetétele határozza meg. A vízben való oldhatatlanság, a víz diffúziójával szembeni jó ellenállás és a képlékenység teszik alkalmassá, hogy hulladékmátrix-anyagként viselkedjék. A bitumen jó reológiai tulajdonságokkal rendelkezik, jó öregedési görbével jellemezhető, nagy befogadóképessége van, valamint gazdaságosan előállítható. A bitumenezés során a kis aktivitású folyékony és/vagy szilárd halmazállapotú hulladékot bitumenbe keverik. Vízzel nem oldható anyag, kioldhatósága nagyságrendekkel kisebb, mint a cementé. Rossz mechanikai szilárdsággal, de kiváló víztaszító tulajdonsággal rendelkezik, ami a szennyezők megkötése szempontjából fontos. Kiváló sugár- és időállósága jelentős mértékű befogadóképességgel társul, alkalmazásával – a cementezéshez képest – sok esetben térfogatcsökkenést érünk el. Igen fontos a folyamat hőmérsékleti szabályozása, homogenitása, amely nagymértékben függ az elegyítés időtartamától, a víz elpárolgásának mértékétől, de mindezek a bitumen és a hulladék típusának függvényei. Bitumenbe történő beépüléssel 43-55 tömeg% hulladék köthető meg [6].

Üvegesítés (HLW)

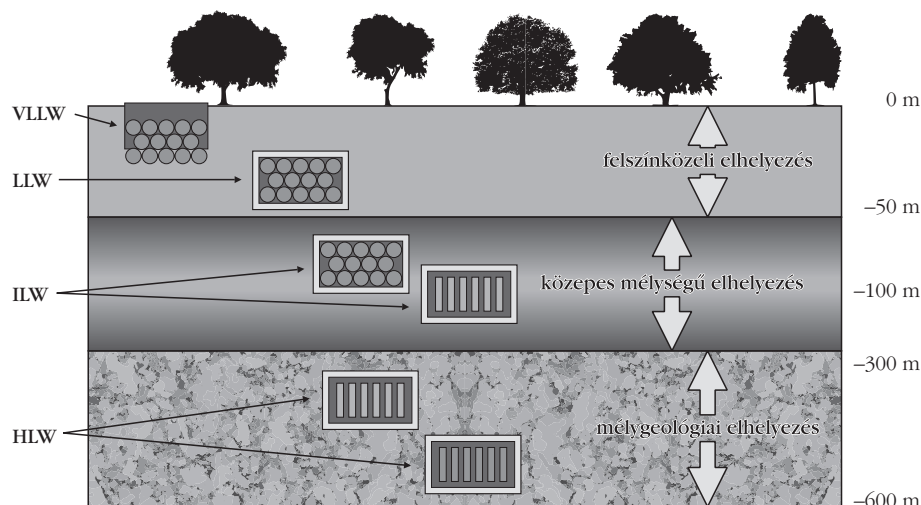
A nagy aktivitású hulladékok legfontosabb tárolási követelménye az oldhatatlanság és a szilárd formában történő megkötés, amely (akár) több ezer évig is stabil marad. Az üvegesítés (vitrifikáció) folyamata a hulladék olvadt üvegbe ágyazását jelenti. A gazdasági szempontok megkövetelik a radioaktív hulladékot burkoló anyag energiatakarékos előállítását, ezért ipari mennyiségű hulladék tárolására elfogadott megoldás az alacsonyabb olvasztási hőmérsékleten előállítható boroszilikát-üvegek használata. A boroszilikát-üvegek képesek megfelelő rugalmassággal a különböző típusú sugárzó hulladékokat befogadni (a beágyazott hulladék nem képez zárványokat), jó kémiai ellenállóképességgel rendelkeznek, nagy a hőstabilitásuk, radioaktív sugárzásnak kitéve nem módosul a szerkezetük, savval szemben ellenállóak, nem higroszkóposak, tulajdonságaik is csekély mértékben változnak [7, 8].

Üvegnek a szilikát alapanyagú, amorf állapottal rendelkező anyagot nevezzük. Az üveg két fő és nélkülözhetetlen alkotóeleme az üvegeképzők és az adalékok. Az *üvegeképzőknek* az üvegháló-szerkezet kialakításában van szerepük. Három vagy több oxidációs számú, kis méretű fémes vagy félfémes elemek, amelyek oxidjaikkal vesznek részt az üvegeképzésben például B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 . Az *adalékok* köztes és módosító oxidok (például PbO , Al_2O_3 és Na_2O , BaO , CaO) szerepük az olvasztási hőmérséklet csökkentése, az amorf szerkezet stabilizálása, egyes fizi-

kai tulajdonságok optimalizálása. Önmagukban nem képeznek üveget, az üvegeképzők által létrehozott hálózatba épülnek be. Az oxidok mennyisége az üvegállapot eléréséhez csak egy meghatározott százalékgig növelhető, ha ezt meghaladják, akkor előnytelenül megváltozhat az üvegszerűség. A vitrifikációval 10-35 tömegszázalék nagy aktivitású hulladék köthető meg.

Az MTA EK Környezetfizikai Laboratóriumában vizsgáljuk az optimális üvegösszetételt és optimalizáljuk a vitrifikációs eljárást, eredményeinket számos tudományos cikk mutatja be. Előállítottunk olyan több komponensű mátrixüveget, amely a fenti követelményeknek megfelelően alkalmas lehet a radioaktív magok stabil befogadására. Meghatároztuk a mátrixüveg szerkezetét jellemző legfontosabb atomi első- és másodszomszéd-távolságokat, a koordinációs számeloszlásokat, a kötésszögeloszlásokkal a szerkezeti egységek kialakulását írtuk le. Megállapítottuk, hogy a mátrixüveg szerkezeti felépítésében tetraédes koordinátságú (SiO_4)⁴⁻ egységek játszanak fontos szerepet, míg a bór 3-as és 4-es koordinátságú oxigénkörnyezetekben helyezkedik el. A bór egy része beépül a Si-alapú hálószerkezetbe és ¹³B-O-¹⁴Si, illetve ¹⁴B-O-¹⁴Si vegyes láncok, illetve gyűrűk alakulnak ki. Sikerült előállítani azt a hatkomponensű urántartalmú üvegsorozatot, amely az eddig ismert legnagyobb mennyiségben, 35 t%-ban képes UO_3 -ot befogadni. A neutrondiffrakciós és szinkrotronforrásnál mért röntgendiffrakciós mérések kiértékelése alapján egy stabil, amorf rendszert sikerült előállítani. Az urántartalmú minták alapszerkezetének felépítése nagy mértékben hasonló a mátrixüveg szerkezetéhez, tetraédes SiO_4 egységek és vegyes trigonális BO_3 és tetraédes BO_4 egységek kapcsolódása alkotja a vegyes láncszerű vázszerkezetet, amely biztosítja az U-atom beépülését.

Az üveg alapszerkezete nem változik az U-atom bevitelével. Az U-O atomi parciális korrelációs függvény két elsőszomszéd-távolságnál ad éles eloszlást. A másodszomszéd-távolságok karakterisztikus kialakulása nagyfokú szerkezeti stabilitásra utal, ahol az U-atom O-atomon keresztül kapcsolódik közvetlenül az üvegeképző, módosító és stabilizáló Si-, B-, Na-, Zr-atomokhoz. Az U-atom átlagosan 5,6 O-atomot koordinál. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a beépülő U-atom részt vesz az alapszerkezet kialakításában, a szerkezetfelépítésben, így stabilizálva a rendszert. Eddigi vizsgálataink alapján feltételezhető, hogy az általunk meghatározott boroszilikátüvegösszetétel alkalmas lehet a radioaktív hulladékok potenciális tárolóanyagaként [9, 10]. Irodalmi adatokra támaszkodva újabb üvegösszetételt állítottam elő és vizsgáltam. Az előző munkák során kapott stabil összetételhez hasonlóan az új, 5-komponensű alapüveg hasonlóan jó szerkezeti paraméterekkel rendelkezik. Ehhez a mátrixüveghez 10 t%-ban az aktinoidák kiváltására szolgáló lantanoida-oxidokat, CeO_2 és Nd_2O_3 adtam. A Ce- és Nd-atomok kémiai tulajdonságaik, koordinációs állapotaiknak köszönhetően



2. ábra. Geológiai tárolás.

kőzet tulajdonságainak figyelembevételével kell megépíteni. A gátrendszer elemei egymás kiegészítői, de a mélységi védelem elve alapján kell működjenek. Biztonsági rendszert alkotnak, amely megvédi a környezetet a bármilyen sérülés folytán kikerülő radio nuklid-szennyezéstől. A mélységi védelem elve, hogy a gátrendszer különböző elemei egymástól függetlenül is benntartják a radioaktivitást, az egyik gát esetleges sérülése nincs hatással a többi védelmi elem hatékonyságára. A gátrendszernek több egymás-

hasonlítanak a Pu- és Am-atomok kémiai jellegére. A Ce- és Nd-atomokkal modellezhetjük a Pu- és Am-atomok beépülését az üvegszerkezetbe. A két új üveg szerkezetvizsgálata során kapott atomi paraméterek azt támasztják alá, hogy nemcsak az U-atom, de a komplementer atomokkal szimulált Pu- és Am-atomok is stabilizálódnak a boroszilikátüveg-szerkezetben (OTKA-109384).

A radioaktív hulladékok tárolása

Radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére elfogadott megoldás a geológiai tárolás. A hulladékok besorolásának függvényében a kis és közepes aktivitású hulladékok felszíni, felszín közeli tárolókba kerülnek (Magyarországon a püspökszilágyi Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló telep tartozik ebbe a kategóriába). A közepes aktivitású hulladékok felszín alatti, közepes mélységű tárolókban kerülnek elhelyezésre (Magyarországon a bátaapáti Nemzeti Radioaktív-hulladék-tároló tartozik ebbe a működési körbe). A nagy aktivitású hulladékok mélygeológiai tárolóhelyre (2. ábra) kerülnek végleges lerakásra (Magyarországon a Nyugat-Mecsekben terveznek nagyaktivitásúhulladék-lerakót a Bodai Agyagkő Formáció optimális tulajdonságainak kihasználásával).

A tárolás célja a teljes elszigetelés a tárolt radioaktív hulladék becsült bomlási idejére, valamint hogy a tárolt hulladék ne jelentsen veszélyt az emberi életformára és a környezetre. A radioaktív hulladék kezelést és tárolását úgy kell megoldani, hogy az összhangban legyen a társadalmi értékekkel, az etikai elvárásoknak megfelelően.

A radioaktív hulladék-tárolók szerepe, hogy megakadályozzák a radioaktív anyagok környezetbe való kikerülését. A hosszú távú biztonságot a jól megválasztott többszörös mérnöki gátrendszer és a természetes gát együttes alkalmazása biztosítja (színes ábra a hátsó fedlapon [11, 12]). A mérnöki gát belső elemeit elsősorban a kondicionált hulladék stabilizálására kell optimalizálni, a külső gátrendszert pedig a

ra épülő eleme van: a mérnöki gát az, amelyet mesterségesen hozunk létre. Az első mérnöki gát a radioaktív hulladék kondicionálása, stabil hulladékmátrixot állítanak elő például vitrifikációval. Második mérnöki gátként szolgál a kondicionált hulladékot tartalmazó, hermetikus, korrózióálló és mechanikailag szilárd, acélból, rézből vagy vasból készült konténer. A mérnöki gátrendszer harmadik eleme a betonfalú épület (tároló vágat/kamra) és a konténer közötti rés tömmedékelése bentonittal vagy öntöttbetonnal. A beton az acélhoz köt, így csökkenti vagy megakadályozza annak korrózióját. A hulladéktároló épített betonfal képezi a következő mérnöki gátat. A hulladéktároló kamrát és a tároló lezárásakor a kamrához vezető vágatokat cementtel és/vagy bentonittal kevert, eredetileg kitermelt kötőrmelékkel töltik vissza. A vágatjárat lezárása képezi az mérnöki gátrendszer utolsó elemét. A befogadó kőzet természetes geológiai gátként szolgál. A megfelelő kőzet kiválasztásához alapos geológiai, kémiai, hidrológiai elemzések szükségesek. Legalkalmasabb az agyagos, üledékes, kristályos (például bazalt, gránit, tufa), só és anhidrides kőzetek.

Hazai helyzet

A nem atomerőművi eredetű kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére helyezték üzembe 1976-ban a püspökszilágyi Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló létesítményt. Az atomerőművi szilárd és folyékony, kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére létesült Bábaapátiban a Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló, amely 2012 decembere óta fogad hulladékot.

Magyarországon a nagy aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló kutatási program 1993 végén a Nemzeti Projekt keretében – a Nyugat-mecseki Bodai Agyagkő Formáció (BAF) vizsgálatával – kezdődött, amelyet 1995 márciusában történő befejezése után egy önálló kutatási program keretében folytattak. Ennek középpontjában (1996–98 kö-

zött) a BAF-nek az akkor még üzemelő pécsi uránbányával határos részén létrehozott föld alatti laboratóriumban végzett vizsgálatok álltak. Az uránbánya bezárására vonatkozó kormányzati döntés következtében a bányából megközelíthető, 1100 m mélyen létesített föld alatti laboratóriumot 1998 végén bezárták. A zárójelentésben levő kutatások eredményeit illetően nem merült fel olyan körülmény, amely a nagy aktivitású radioaktív hulladékok BAF-ben történő végleges elhelyezése ellen szólna. A Radioaktív Hulladékkezelő Kft. 2000-ben az ország teljes területére kiterjedő földtani pásztázó kutatást végzett, újabb lehetséges lerakó potenciális feltérképezése érdekében. A vizsgálati eredmények továbbra is a BAF-et találta a nagy aktivitású hulladéktároló legígéretesebb befogadó kőzetének. Jelenleg a terület hidrogeológiai vizsgálata zajlik, valamint újabb furatok vizsgálata a terület kijelölése céljából. A kutatások eredményének függvényében kerül kijelölésére a föld alatti laboratórium és a hulladéktároló helye. A jelenlegi tervek szerint az első konténerek 2060-ban kerülnek lerakásra [13].

Irodalom

5. *Cementation of radioactive waste*. http://www.nukemgroup.com/fileadmin/pdf/Brochure_Cementation_Juni_2007.pdf NUKEM Technologies GmbH
6. L. Monte, V. Barreto, M. F. R. Guzella: Incorporation of radioactive waste in bitumen 10 years of R&D and cooperation between CDTN and Electronuclear. In *Proc. of Int. Nuclear Atlantic Conference*, Santos, 2007.
7. W. Ramsey, N. Bilber, T. K. Meaker: Composition and durabilities of glasses for immobilization of plutonium and uranium. *Conf. Waste Management '95*, Tucson, 1995.
8. L. R. Bunnell, G. D. Maupin, K. H. Oma: High-Temperature Glasses for Nuclear Waste Isolation. *Advances in Ceramics 20* "Nuclear waste management II" (1986) 167.
9. Fábíán M., Sváb E.: Boroszilikát üvegek szerkezetvizsgálata neutrondiffrakcióval. *Nukleon V*(2012) 119
10. M. Fábíán, Th. Proffen, U. Ruett, E. Veress, E. Sváb: Uranium surrounding in borosilicate glass from neutron- and X-ray diffraction and RMC modelling. *J. Phys.: Condens. Matter 22* (2010) 404206.
11. *Engineering Barrier Systems in the Safety Case: Design Confirmation and Demonstration*. Workshop Proceedings, Tokyo, OECD NEA 6257, 2007.
12. *SKB's mission*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2014.
13. OECD/NEA, Nuclear Energy Data, 2006.

A FIZIKA TANÍTÁSA

MÉRÉSEKKEL A KOZMOSZ NYOMÁBAN

Fraller Csaba
Hévízi Bibó István Gimnázium,
Szakközépiskola és Kollégium

A számítógépes adatfeldolgozáson alapuló mérési eljárások az oktatásban

Nem lehet vitás, hogy napjainkban mind a hétköznapi tanítás-tanulás, mind pedig a közép- és emelt szintű fizikaérettségi folyamatában helyet kell szorítani a számítógépes adatfeldolgozásra épülő méréseknek, demonstrációknak. Erre az elmúlt években már történtek kísérletek (például évek óta szerepel az emelt szintű tételek között egy-egy ilyen mérés), de egységes hardver-, illetve szoftverkeret híján ezek a módszerek nem váltak általánossá. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a National Instruments Hungary Kft. a 2014/2015-ös tanév végén közösen írt ki pályázatot fizikatanároknak. A pályázat a LabVIEW rendszertervező szoftverrel támogatott, kifejezetten oktatási célokra kifejlesztett myDAQ mérésadatgyűjtő eszközzel szabott mérési eljárások kidolgozását követelte meg.

A pályázat motivációját az alábbi közismert, szinte már közhelyszámba menő tény szolgáltatta: *világszer- te felismerték, hogy a fiatalok érdeklődése a műszaki- természettudományi tárgyak iránt csökken*. Ennek tükrében tudomásul kell vennünk, hogy versenyt kell futnunk diákjaink érdeklődéséért egy olyan világban, amelyet a digitális technika teljes egészében átszö. A pályázat kiírói szerint van rá esély, hogy a számítógé-

pes mérési eljárások bevezetése az iskolai kísérletezésbe a tanulók számára modernné és ez által érdekesebbé is teszi azt a tárgyat, amelyben alkalmazzák.

Jómagam ezen pályázat keretében kerültem kapcsolatba a digitális mérés technikával, különösebb programozói vagy elektronikai előképzettség nélkül. Az alábbiakban néhány általam fontosnak ítélt alapelv és konkrét mérési eljárás ismertetésén keresztül szeretném bemutatni a fent említett keretrendszer előnyeit és saját tapasztalataimat. Nem titkolt célom, hogy rámutassak: az elsősorban a modern fizika körébe tartozó mérések kidolgozása és alkalmazása erős eszközt ad a kezünkbe, hogy segítsük diákjaink természettudományos világképének fejlődését. Végezetül érvelni kívánok amellet, hogy előnyökkel járna, ha a fizikaoktatásban egységes digitális mérőrendszer kerülne bevezetésre.

Bevezető gondolatok

Szomorúan tapasztalom a klasszikus (ebben az értelemben 20. század előtti) fizika nyomasztó túlsúlyát az általam ismert közép- és emelt szintű kísérletlistákban. Csak elvétve lehet találkozni az elmúlt száz év eredményeire utaló kísérlettel, méréssel, demonstrációval. Általános gyakorlat, hogy a középszintű tétel-



1. ábra. A myDAQ mérésadatgyűjtő eszköz.

sorokban modern fizikai tételek mellett például hullámtani kísérletek, mérések szerepelnek, igaz, nem minden elvi alap nélkül, és sokszor a helyi szertár gyenge felszereltségének eredményeként. Még elkerülhetőbb a kép, ha a mindennapok tanórai gyakorlataira gondolok. Gyakran a kényszerű mellőzés sorsára jutnak az atomfizika, magfizika vagy csillagászat újabb, de érdeklődésre számot tartó eredményei is. Pedig a gyerekeket érdeklik ezek a kérdések. Odafigyelnek, ha a Föld korának mérési módszeréről, vagy éppen a csillagok távolságának meghatározásáról beszélünk. Előbb-utóbb minden fizikatanár választásra kényszerül. Mi fontosabb? Életet lehelni a száraz ismeretekbe, vagy felkészíteni diákjainkat a továbbtanulásra? Szomorú dilemma és szomorú, hogy ez a kérdés egyáltalán felmerülhet. A jelenlegi óraszámok, tantervi előírások és érettségi követelmények mellett csak kivételes helyzetben képzelhető el akár csak megnyugtató kompromisszum is. Ennek azonban ára van.

Sajnos tanulóinknak nincs kialakult képük a Világegyetemről, a Világegyetem megismerésének módszeréről még kevesebbet tudnak. Azt állítom, hogy a természettudományos megismerés *folyamatáról* nem beszélünk eleget. Állandóan panaszkodunk: tanítványaink nem képesek elsajátítani a természettudományos gondolkodás alapjait. Vajon megadjuk nekik az esélyt? Mondunk a tudománytörténetből elég és főként érdeklődésüknek megfelelő modern példát? Végre tudunk hajtani velük *tanórai keretek között* a tudományos módszertant is feltárni képes kísérleteket, méréseket a modellalkotás nehézkes folyamatától a tervezési fázison és a végrehajtáson át a mérés elemzéséig? A segítség, legalább átmeneti megoldásként szolgáló ötlet és motiváció formájában, néha onnan érkezik, ahonnan a legkevésbé számítunk rá. Például egy pályázati felhívásból vagy a televízióból.

Először gyermekként láttam *Carl Sagan* legendás tv-sorozatát, a *Kozmoszt*.¹ Hallgattam a Világegyetem titkait és néztem a fekete-fehér képernyőn is feleme-

lőnek bizonyuló képeket a Naprendszer bolygóiról. 2014-ben *Neil deGrasse Tyson* vállalkozott a majdnem lehetetlenre: Sagan nyomdokain 13 részben bemutatta saját, *Kozmosz: történetek a Világegyetemről* sorozatát. Ezek a filmek immár felnőttként szögeztek a képernyő elé. Tyson a legfrissebb tudományos eredmények bemutatásán túl lenyűgöző példákon keresztül tárja fel a természet vizsgálatának sokszor rögös útját, fejet hajtva a történelmi korok mesterei előtt, de velük egyenlőként bemutatva a modern kor hőseit és munkájukat. Fizikatanárként is van mit tanulni ebből a sorozatból. Legalább annyit, hogy napjaink tudományos eredményeit érdemes a letűnt korok ismereteire építve, azokat *egységes egészként* kezelve, a felismeréséhez vezető *módszert* hangsúlyozva ismertetni.

A modern kor eredményeire a klasszikus diszciplínák tárgyalása során is sort lehet keríteni. Ha a gyerekeket érdeklik, mondjuk a távoli csillagok, akár a mechanika tárgyalásánál is le lehet azokat hozni a tantermekbe. A *Kepler űrtávcső* csillagok fénygörbéjét vizsgálva keres exobolygókat, és állapítja meg azok keringési adatait – egy jelenség, aminek vizsgálata a periódusidő mérésén alapul. Ha számítógépes adatfeldolgozással akarjuk vizsgálni ezt a jelenséget, akkor ennek előkészítése nem sokkal bonyolultabb, mint a rugóra akasztott test rezgésidejének mérése esetén lenne, csak sokkal érdekesebb és inspirálóbb.

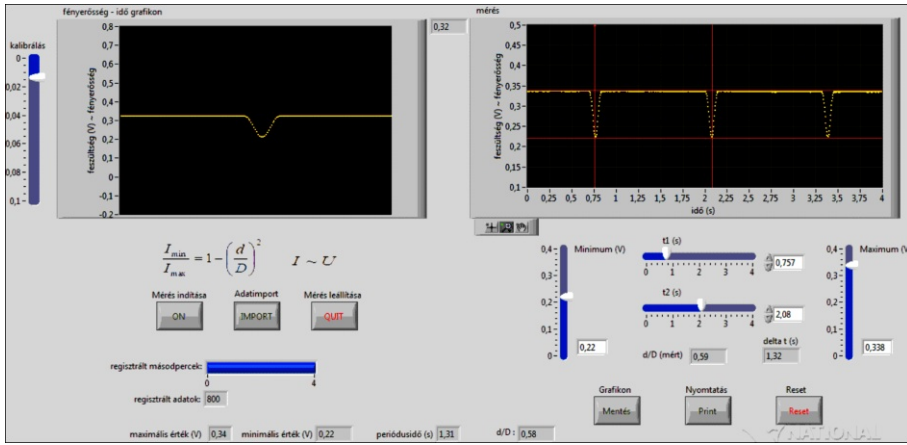
A modern természettudomány számos módszere használható a közoktatás szintjén is. Ennek nyilván nem kizárólagos módja a digitális mérés technika. Amennyiben mégis ezt választjuk, akkor egy kicsit programozóvá kell válnunk, elő kell ásni érte egyetemi elektronika-jegyzeteinket – ez nem nagy ár célunk eléréseért. Meggyőződésem szerint érdemes belevágni, felidézve a Kozmosz-sorozatok szellemiségét.

Röviden a myDAQ – LabVIEW rendszerről

Ideje szót ejteni a jel- és adatfeldolgozást lehetővé tevő rendszerről. Maga a mérőeszköz egy tenyérnyi, lapos, téglatest alakú, különböző kimeneti és bemeneti analóg és digitális csatornákkal ellátott jelátalakító (1. ábra). A számítógéppel USB porton át kommunikál, működéséhez szükséges tápfeszültséget is azon keresztül kapja. Kompakt eszköz, egyfajta hordozható digitális laboratórium.

A LabVIEW a National Instruments által fejlesztett, grafikus felületű, rendszertervező szoftver, egyebek között a myDAQ-kal tervezett mérések támogatására (2. ábra). A kiválasztott mérés megvalósításához az eszközhöz csatlakoztatható szenzorra, magára a jelátalakítóra és speciálisan az adott méréshez megírt programra, egy virtuális mérőeszközre (*virtual instrument*, azaz VI) van szükség (3. ábra). Nincsenek előre megírt sablonok: a program struktúrája és a hozzá tartozó kezelőfelület kialakítása kizárólag a mérést tervező akaratán és fantáziáján múlik. Leegyszerűsítve: ahány mérés, annyi VI.

¹ A sorozat magyarul fent van a YouTube-on, illetve az Individeón.



2. ábra. Példa a kezelőfelületre – a front panel.

Megítélésem szerint éppen ebben rejlik a rendszer legnagyobb előnye, egyúttal a legnagyobb hátránya is. A programnyelv kifinomult, óriási rugalmasságot biztosít. A legegyszerűbb mérési feladat programozása – némi gyakorlattal – legfeljebb pár percet vesz igénybe; ez a mindennapi tanórai alkalmazáshoz bőségesen elegendő. Az igényesebb felületű, például záróvizsgákra szánt „okosabb” programok fejlesztése a programozást szakmájában nem gyakorló fizikatanárnak igazi kihívást jelenthet.

Nem kisebb kihívás a szükséges szenzorok megépítése, ezek ugyanis nem részei a csomagnak, róluk külön kell gondoskodni. A szóba jöhető érzékelők zöme analóg feszültséjelet ad, ezek feldolgozása a myDAQ számára megoldott. A szükséges alkatrészek beszerzése, a szenzor kivitelezése, a helyes konfiguráció kikísérletezése, a VI megírása (szabad) idő- és esetleg költségigényes. Ezek egyenként is alkalmasak lehetnek, hogy még az érdeklődő kollégákat is eltántorítsák a továbblépéstől. Az ellentmondás megszűnik, amint a módszer és a rendszer széles körben elterjed, és a motivált, kreatív kollégák tudáskincse mások számára is hozzáférhetővé válik.

Alapelvek

A pályázat kidolgozása közben, az eszköz és a szoftver képességeit nagyjából megismerve az alábbi általános célokat, elveket fogalmaztam meg magamnak. Ezek természetesen nincsenek kőbe vésve, de tapasztalatom szerint jól szolgálták a kitűzött célokat.

Olyan mérést kell kidolgozni, amelynek már a vizsgálati tárgya is segíti a modern természettudományos világkép kialakítását.

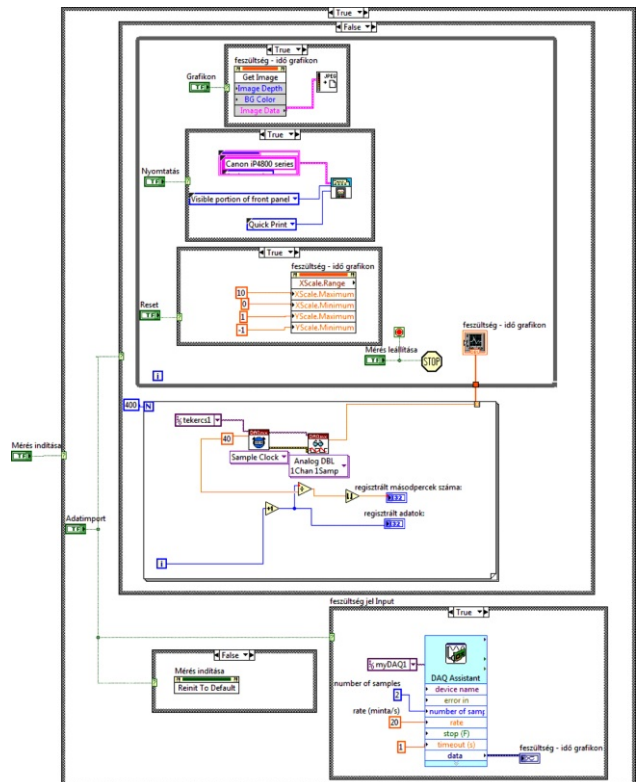
Ha ezt elfogadjuk, értelemszerűen adódik, hogy a mérések egy része kényszerűen csak modellezés, esetleg szimuláció lehet. A modellezés vagy szimuláció csak egyik oldalról szorító kompromisszum – a másik oldalról a lehetőségek tárházát nyitja meg előttünk. Modern, akár csak egy-két évtizedes kutatási eredmények módszertanával ismertethetjük meg diákjainkat. Gyakorlati oldalról megközelítve ez sok esetben nem

csak fogadott jelek feldolgozását jelenti; esetenként gondoskodnunk kell kimenő jelek generálásáról is. Ehhez a myDAQ és a LabVIEW lehetőségeit jobban ki kell aknázni.

A méréseknek ötvözniük kell a számítógépes adatfeldolgozás jelentette előnyököt a pedagógiai szempontból fontos, a diákok által kedvelt (tőlük elvárt) manuális aktivitással. A mérést végző személy aktív résztvevője kell, hogy legyen a mérésnek.

Elismerem, hogy egy egyetemi műhely vagy egy kutatólaboratórium számára a pontosság a legfontosabb szempont, és emiatt minimálisra kell csökkenteni az emberihiba-tényezőket. A megfelelően beállított mérőeszköz és a jól megírt szoftver együtt elvégzik a munka nehezét, sokszor elég megnyomni egyetlen gombot, és az eredmény pillanatok alatt nyomtatható és elemezhető. A közoktatásban erre nem törekedhetünk, még akkor sem, ha adott esetben a mérés pontosságát kockáztatjuk. Például a gyerekeknek nem unalmas felvenni a Mikola-csőben haladó buborék mozgását jellemző út-idő grafikon, sőt motivációs erővel bír. Ez kiváltható például a mérési adatokra illeszthető görbék paramétereinek beállításával – a milliméterpapírra rajzolt, szabadkézzel illesztett görbék korszerű megfelelőjével.

3. ábra. Példa a grafikus kódra – a block diagram.



Célszerű olyan mérést kidolgozni, ami két szempontnak is megfelel: minden iskola számára legyen elérhető, azaz olcsón és kevés szerelési, elektronikai gyakorlattal is megépíthetők legyenek a mérés végrehajtásához szükséges segédeszközök, valamint – lehetőség szerint – több célra is alkalmasak legyenek.

Utóbbi az esetek többségében szinte automatikusan teljesül. Egy fényérzékelő szenzor nem csak egyetlen fényforrás jeleinek feldolgozására alkalmas. Ezt a célkitűzést a programok fejlesztése közben kiegészítettem egy újabbal is. Nem árt, ha az adatfeldolgozást lehetővé tevő VI-k könnyen módosíthatók és kezelőfelületeik azonos felépítésűek. Első hallásra ez furcsának tűnhet, hiszen látszólag a sokszínűség, egyediség ellen dolgozik. Ugyanakkor egy átlagos fizikatanár munkaideje nagy részében tanít, a myDAQ programozása valószínűleg nem lesz rutinszerű feladata. Könnyen kezelhető, egyszerűen módosítható, gyorsan áttekinthető alkalmazásokra van szükség. Másrészről az egységes megjelenésű kezelőfelületek megkönnyítik diákjaink feladatát is. Újabb mérési eljárások során figyelmüket a lényeges tartalmi elemek felé fordíthatják; a már ismerős panelek között könnyedén eligazodnak.

A méréseknek alkalmasnak kell lenniük arra, hogy kis módosítással több szinten is alkalmazhatók legyenek.

Ha csak az érettségi vizsgákra gondolunk, belátható, hogy a két vizsgaszint közötti különbség leegyszerűbben nem a programkód szintjén szabályozható. Ennek elsődleges eszköze a konkrét mérési leírás, a mérési utasítás. Ha emellett szükség lenne arra, hogy az emelt szintre előkészített kezelőfelületen megjelenő adatok, kijelzők közül néhányat elrejtünk, vagy egyik-másik szabályozó értékét a könnyebb végrehajtás érdekében rögzítsük, az a programnyelv mélyebb ismerete nélkül is könnyen megtehető.

A kidolgozott mérések

A fenti gondolatok, elvek használhatóságát illusztrálandó, röviden ismertetem azoknak a méréseknek a tárgyát, amelyek a pályázatomban is szerepeltek – és amelyeket nem elhanyagolható mértékben éppen az új Kozmosz-sorozat inspirált.²

Exobolygó átvonulása okozta fedési változócsillagok fénygörbéjének modellszerű vizsgálata, keringési idő mérése, relatív átmérő becslése.

1999 óta a csillag előtt átvonuló bolygó fedése okozta fényességsökkenés alapján ezernél is több exobolygó létezését igazolták ezzel (ma már nem egyedüli) módszerrel. Földi és világűrbe telepített távcsőrendszerek napjainkban is kutatnak Naprendszeren kívüli bolygók után. Ma már nem lehetetlen Föld-méretű bolygók felfedezése sem, akár az úgyne-

² A mérések részletes ismertetésére jelen keretek között nincs lehetőség. A mérések kezelőfelületeiről készített felvételekre mutató link az irodalomjegyzékben elérhető.

vezett lakhatási zónán belül. A 2011. májusi rendes érettségi vizsgaidőszakban a középszintű fizika érettségi feladatsor 3/A feladata is feldolgozta a jelenséget. E példa kitűzése erős érv volt amellett, hogy kidolgozzak egy mérési eljárást. A tervezésen túl a mérés gyakorlati kivitelezése kihívást jelentett, elsősorban az alkalmas fényérzékelő szenzor megépítése miatt.

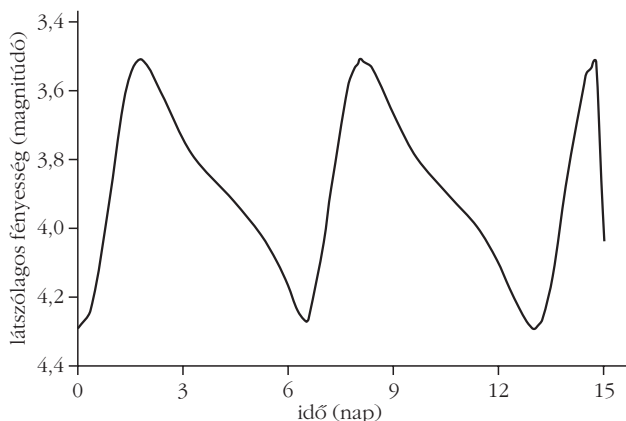
Ellenálláson keresztül kisütött kondenzátor tranziens feszültségének vizsgálata, felezési idő mérése – a radioaktív bomlási törvény modellezése. Ugyanezzel az eszközzel: LED nyitóirányú karakterisztikájának vizsgálata, küszöbfeszültség mérése.

Keves olyan gimnáziumi szertár létezik, amelyik fel van szerelve számlálócsővel, még kevesebb rendelkezhet radioaktív mintával. A 2007. májusi rendes érettségi vizsgaidőszak emelt szintű szóbeli mérései között egymás utáni sorszámmal szerepelt két mérés, amelyeket pályázatomban össze tudtam kapcsolni. A 16. sörhab „bomlása” felezési idejének mérését írta elő – ezt kissé átalakítva azóta is nagy sikerrel alkalmazom középszinten. A 17. mérés LED nyitó karakterisztikájának vizsgálatát tűzte ki célul egy nagy kapacitású elektrolit kondenzátor, k Ω -os nagyságrendű ellenállás és LED alkalmazásával. Eredeti formájában mindkét mérés nagyon nagy odafigyelést és jelentős figyelemmegosztást igényel, egyiket sem könnyű jól végrehajtani. Az annak idején a 17. méréshez épített dobozt átalakítva alkalmassá tettem arra, hogy a myDAQ eszköz segítségével felezési időt és LED-jellemzőket egyformán vizsgáljni lehessen vele.

A pulzáló változócsillagok egyik alaptípusát képező klasszikus cefeidák fénygörbéjének vizsgálata, periódusidő mérése, a csillag távolságának meghatározása.

Henrietta Swan Leavitt, a Harvard College csillagásza kisebb megszakításokkal 1904 és 1912 között a Kis Magellán-felhőben 25 cefeidát azonosított és rájött, hogy összefüggés van a csillag abszolút fényességé, valamint a változás periódusa között. 1912-ben megjelent cikkében közölte felfedezését: a csillag távolsága a periódushossz logaritmusának lineáris függvénye. Ez a felfedezés tette lehetővé extrém nagy távolságok mérését a csillagászatban. Módszert adott

4. ábra. A generált analóg feszültségjel mint fénygörbe.



és teret engedett *Edwin Hubble* korszakalkotó vizsgálatainak, ami végül a világegyetem tágulásának felismeréséhez vezetett. Leavitt munkássága jelentősen hozzájárult ahhoz, hogy a világegyetem méretét ma sokkal nagyobbak ismerjük.

A mérendő mennyiség ismét a periódusidő – ezt két matematikai lépésben lehet csillagközi távolsággá alakítani. Ez a mérés különösen kedves nekem. Sokat foglalkoztatott, mert az egyik verziójában a δ Cephei fénygörbéjéhez hasonló analóg feszültségelet kellett előállítani (*4. ábra*), majd az azzal arányos árammal egy asztali csillagképmo­dell LED-csillagának fényességét vezérelni – működő példája a rendszer sokoldalúságának.

Öveges-módszer versus digitális technika?

A nyilvánvalóan provokatív alcím sejteti az egyetlen lehetséges választ. A magyar fizikatanítás legszebb hagyományai közé tartozik az *Öveges* professzor úr által képviselt vonal, aminek egyik lényeges eleme, hogy az új jelenségeket a legegyszerűbb eszközökön, a lehető leginkább letisztult módszerekkel kell megközelíteni és bemutatni. Ennek komoly kultúrája alakult ki hazánkban; a filléres alkatrészeket használó „sufnituning” eszközöknek ma is helye van a tanórákon és a fizikaszer­tarakban. A kérdés helytelen szembeállítás sugall. A mai modern fizikatanítás egyszerűen nem kerülheti meg a 21. század technológiai fejlettségét. De miért is tenné? Ha egy mérési eljárás, egy jelenség megértéséhez másodpercenként akár több száz jel vételére és valós idejű feldolgozására van szükség, akkor értelem­szerűen számítógépet kell igénybe venni. A gyerekek érthetően rácsodálkoznak a rézcsőben eső neodímium mágnes váratlanul lassú mozgására, de nemkülönben felszisszennek, ha Lenz-törvényét egy, a másodperc töredéke alatt lezajló tranziens kikapcsolási jelenség feszültség-idő grafikonján szemléltetjük. Különösen, ha a bemutatáshoz szükséges programot ők írhatják! Ezek az eszközök békésen elférnek egymás mellett ugyanazon a tanári asztalon.

Tapasztalataim összegzése

Nem álltam volna neki a munkának, ha nem láttam volna esélyét, hogy az eljárások használhatók a tanítás során is. Kezdetben voltak ezzel kapcsolatos féltéseim: vajon mennyire alkalmazható ez a bonyolultnak tűnő rendszer a hétköznapi iskolai gyakorlatban vagy legalább a középszintű érettségien? Bíz­tam a pozitív válaszban, de nem voltam meggyőződve róla.

A mérések kidolgozása során, elsősorban a már félig-meddig megírt programok tesztelési időszakában szerzett tapasztalatok szerencsére oszlatták kétségeimet. Egyrészt a myDAQ pontossága és adatvételi sebessége olyan gyors lefolyású jelenségek elemző bemutatását teszi lehetővé, amelyekre korábban esélyünk sem volt. Rövid, akár 5-10 milliszekundumos és kicsiny, akár csak néhány ezrelékes változások is mér-

hetővé válnak. Másrészt óriási lehetőséget látok a modern fizikai eredmények feldolgozásában akár modell szintű, akár generált jelekkel szimulált mérések révén. Harmadrészt biztos vagyok abban, hogy a mérések bevet­hetőek középszintű érettségi vizsgán is. A Hévízi Bibó Gimnázium idei fizika szóbeli tételsorának mérési feladatai között már szerepelt négy myDAQ-mérés. A felkészülési időszakban tanítványaim könnyedén, gyorsan és szívesen mértek ezzel az eszközzel. Én magam sokat tanultam a munkafolyamatból, sok örömet szer­zett, minden kollégámnak bátran merem ajánlani.

Digitális méréstechnikai rendszer a közoktatásban

Az alaptézis az volt: szükség van a számítógépes adatfeldolgozásra épülő mérésekre mind a tanórákon, mind az érettségi vizsgákon. Nyilván más is létezik az általam ismertetett myDAQ – LabVIEW rendszeren kívül. Nem vagyok hivatott arra, hogy eldöntsem, melyik lenne a legjobb választás, egyáltalán, hogy szükség van-e egységes rendszerre, de abban biztos vagyok, hogy ez a rendszer alkalmas a közoktatásba való bevezetésre. Nem létezik olyan kerettantervi témakör, amelyikre ne lenne alkalmazható. Meggyőződésem, hogy a magyar fizikaoktatás csak nyerne azzal, ha a lehető legszélesebb körben elterjedne ez vagy egy ehhez hasonló, megfelelő rugalmasságot biztosító, kreativitást igénylő rendszer. Egy ilyen eszközzel és némi munkával mérések, demonstrációk tucatjai lennének *helyi fejlesztéssel* megvalósíthatók. Egységes hardver és szoftver esetén a helyben kidolgozott eljárások mások számára is hozzáférhetővé válhatnak. Tanulóinknak szinte egyedülálló lehetőséget kínál a tudományos kutatások módszertanának megismeréséhez: a *modellalkotás, tervezés, programozás, mérés kivitelezése, elemzés* fázisai, számtalan visszacsatolási lehetőséggel mind-mind szerves részei egy új mérési eljárás kidolgozásának. Az elinduláshoz szükséges ismeretek gyakorlati továbbképzésekkel egyetlen hétfőre alatt is megszerezhetők. Megfelelő motivációval egyformán lehetne mozgósítani tanárt, diákot, hogy éljenek a fejlesztés lehetőségével. Tisztában vagyok azzal, hogy ehhez jól átgondolt döntések sorára, széleskörű egyetértésre és összefogásra van szükség a fizikatanároknak, a fenntartók és a támogatók részéről egyaránt. De a feladat sürgető. A mérések terén is utol kell ér­nünk évszázadunkat, ha úgy tetszik, most nekünk, fizikatanároknak kell felnőnünk a Z generációban nevelkedő tanítványainkhoz.

Irodalom

1. Fraller Cs.: *Mérésekkel a Cosmos nyomában*. Pályázati anyag, 2015.
2. <http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/>
3. http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AGalaxisok_Vilaga/ch02s09.html
4. A mérések kezelőfelületéről készített videók lejátszási listája: http://www.youtube.com/playlist?list=PLjUAAW-uFTB55mxZOV_BnsE12GpItZ4-Yf

CSILLAGÁSZATI DIÁKOLIMPIA MAGYARORSZÁGON

Hegedüs Tibor, Szegedi Tudományegyetem, Bajai Observatórium
Horváth Zsuzsa, Kosztolányi Dezső Gimnázium
Udvardi Imre, Újpesti Könyves Kálmán Gimnázium

Diákjaink nagyon sok versenyen vehetnek részt, és a nemzetközi diákolimpiák száma is egyre nő. Cikkünkben bemutatjuk a fizikához erősen kötődő, nemrég alapított Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpiát (IOAA). A múlt évi megmérettetésen azon diákok voltak előnyben, akiknek tudása fizikából is legalább olyan szinten volt, mint csillagászatból. Általában sem a fizika, sem a földrajz tantárgyakon belül nem jutunk el mélyebb asztronómiai ismeretekig, de éppen azért hozták létre ezt a világversenyt, hogy ezzel is segítsék a csillagászati ismeretek tanításának terjedését az iskolákban. Úgy gondoljuk, hogy ennek megvalósulásával a fizikaoktatás csak nyerne, hiszen a csillagászat (és a belőle kiváló társtudományok, például az űrfizika vagy asztrobiológia) az egyik leggyorsabban fejlődő tudományág, amely szinte mindenkit, így diákjainkat is érdekel. Végeredményben a fizika népszerűsítésének egyik legeredményesebb eszköze.

Természettudományos diákolimpiák

Különbéféle természettudományos diákolimpiák vannak. Elsőként a Nemzetközi Matematikai Diákolimpiát (IMO) rendezték meg (1959-től), de egy évtizeden belül elindult a Nemzetközi Fizikai Diákolimpia (IPhO, 1967-től) és a Nemzetközi Kémiai Diákolimpia (IChO, 1968-tól) is. Hazánk kiváló matematika- és természettudományos oktatásához nyilvánvalóan hozzájárult a kezdetektől fogva folyamatos részvétel a matematikai, fizikai, kémiai és informatikai diákolimpiákon. Magyarország többször is sikeresen volt e nemzetközi versenyek házigazdája. Kialakultak a felkészítést segítő olimpiai szakkörök, és több évtizedes versenyeknek feladatai segítik ma már diákjainkat az eredményes részvételben. A legújabb szervezésű diákolimpia, a Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia (IOAA) versenyébe alapítása után négy évvel kapcsolódhattak be a csillagászatot szerető és értő magyar diákok.

Csillagászati diákolimpiák

Hasonlóan a kémiához (IChO, Mengyelejev), csillagászatból is kétféle diákolimpia van: az IAO (International Astronomy Olympiad) és az IOAA (International Olympiad on Astronomy and Astrophysics). Az elsőben főleg a szovjet utódállamok vesznek részt, és az Eurázsiai Csillagászati Egyesület (Euro-Asian Astronomical Society, EAAS) felügyelete alatt áll. A 2006-os Nemzetközi Fizikai Diákolimpián vetődött fel egy

kissé más szemléletű csillagászati diákolimpia szervezésének ötlete. A 2007-ben alapított IOAA a Nemzetközi Csillagászati Unió (International Astronomical Union, IAU) elvi támogatásával működik. Az évek múltával ez fejlődött inkább, de sok nemzet mindkét versenyen indítja diákjait. Természetesen ez leginkább pénzkérdés. Az IAO 2014-ben ugyan a 19. versenyénél járt, de csak 23 résztvevő országgal, míg az IOAA nyolcadik évében 37 ország tanulóit mérhették össze tudásukat. Magyar diákok negyedik éve szerepelnek az IOAA versenyein, de az IAO diákolimpiára eddig még nem volt módunk csapatot küldeni.

Az első IOAA diákolimpiát Thaiföldön tartották 2007-ben. Ezen 21 ország tanulóit versenyeztek, köztük lengyel, román, görög, szlovák és ukrán diákok is. Ezután Indonéziában, Iránban, Kínában rendezték egyre bővülő körben az IOAA versenyeit. Az ötödik olimpiára (2011) már magyar csapat is utazott Lengyelországba. Ez volt az első európai helyszín, így ide már horvát, bolgár és portugál diákok is érkeztek. Még nem volt ugyan tapasztalatunk a diákolimpiával kapcsolatban, a megelőző felkészítések során a korábbi hazai szakköri színvonalhoz igazodtunk, ami kevésnek bizonyult, de egyik olimpiaként (*Dálya Gergely*) így is dicséretet kapott.

A hatodik olimpián, Brazíliában már a magyar diákok és felkészítőik is tisztában voltak a verseny színvonalával, így olimpiaként eredményesen szerepeltek: ketten (*Bécsy Bence* és *Dálya Gergely*) bronzérmesek lettek, egy diák (*Galgóczi Gábor*) pedig dicséretet kapott. A hetedik, görög olimpia még eredményesebb volt számunkra: *Bécsy Bence* ezüstérmet, *Granát Roland* és *Kopári Adám* bronzérmet, *Kunsági-Máté Sándor* pedig dicséretet kapott. Az IOAA tavalyi versenye (Romániában) az előzőeknél nehezebbnek bizonyult. Diákjaink a középmezőnyben

A fényképek a 2015-ös, indonéziai olimpián készültek.





teljesítettek, ketten (*Horváth János* és *Ványi András*) dicséretet kaptak, *Kopári Ádám* pedig az előző évi mellé egy újabb bronzéremmel gazdagodott.

A diákolimpiák nagyon hasonlóan zajlanak le, de a rendező ország is alakíthatja egy kicsit a programokat. Nemzetközi versenyhez méltóan már egy évvel a verseny előtt megismerhetik a résztvevők az olimpia helyszíneit, majd egyre több információval látják el a leendő olimpiákonkat és kísérőiket a diákolimbia hivatalos honlapján. Általában tíz napig tartanak a programok, amelyekből egy napot az esetleges időeltolódás, klímaváltozás, vagy egyszerűen csak az utazás fáradalmainak kipihenésére szánnak. A verseny egyes fordulói között is van mód a pihenésre. A helyi szervezők angolul jól beszélő fiatalokat adnak minden ország versenyzőjé mellé. Erre azért van szükség, mert a megnyitó után már nem találkozhatnak a csapatvezetők a diákokkal, még a szálláshelyeik is másik településen vannak. Az elkülönítés oka, hogy az olimpiai feladatok végső változatát az egyes országok kísérő tanárai, csillagászai fogadják el hosszas vita után, és arra is van lehetőség, hogy lefordítsák diákjaik anyanyelvére, ugyanis az nem követelmény, hogy az olimpiákon tudjanak angolul (az IOAA hivatalos nyelvén).

A csillagászati diákolimbia feladatai

Az IOAA csillagászati diákolimpiákon általában ötféle feladattípussal kerülnek szembe olimpiáink: planetáriumi, távcsöves (égbolt alatti, észlelési), elméleti és adatfeldolgozási feladatokban mérhetik össze tudásukat egyénileg, és van csapatverseny is. Planetáriumi fordulóra nem mindig kerül sor.

A 2014-es diákolimbia alapján ismertetjük az egyes feladattípusokat. A planetáriumi észlelési fordulónak két része is volt. Az első részben ténylegesen a planetáriumi kupolában töltötték ki a diákok egy feladatlapot. Nyolc perc állt a diákok rendelkezésére, hogy szemük alkalmazkodjon a sötéthez. A kupolára természetesen helyi, suceavai 18 órának megfelelő égboltot vetítettek, de a dátumot nem mondták meg, a versenyzőknek kellett megadniuk hónapra pontosan. Két kört is vetítettek a kupolára, amelyekről el kellett

dönteni, hogy milyen égi körnek felelnek meg (égi egyenlítő, meridián és ekliptika közül választhattak). Ezután egy asszisztens három Messier-objektumra mutatott egy piros nyílal, amelyeket fel kellett ismerniük a diákoknak, majd típusát (galaxis, gázköd, nyílthalmaz vagy gömbthalmaz) kellett beírni egy táblázatba, és azt is tudniuk kellett, hogy melyik csillagképhez tartozik ez az égi objektum. Az előzőekhez hasonlóan ezután három csillagról kérdezték a nevükön kívül, hogy magányosak vagy kettőscsillagok, illetve melyik csillagképhez tartoznak. A következő feladatlapot már a kupolán kívül töltötték ki az olimpiákon, ebben lényegében a csillagtérképen való eligazodást mérték. Egy szintén helyi (suceavai) égboltlálásról készült csillagtérképre kellett berajzolniuk az égtájakat, a horizontot, az ekliptikát, az égi egyenlítőt valamint galaxisunk egyenlítőjét. A szabad szemmel látható bolygók éppen aktuális helyzetét is meg kellett jelölniük. Ezután a térképen látható négy legfényesebb csillagot kellett megnevezni, fényesség szerint sorba rendezni. Nem maradhattak el itt sem a Messier-objektumok, hármat kellett megtalálniuk, további két megadott csillag helyét pedig be kellett jelölniük. Végül a csillagtérképre legalább 15 csillagképet kellett rárajzolniuk a diákoknak hivatalos neveikkel azonosítva. Ezeknél a feladatoknál segítségül egy listát kaptak a diákok a csillagképekről, amelyben a magyar nevük is szerepelt a nemzetközileg ismert néven és rövidítésen kívül.

A távcsöves fordulón, ha nem maradt volna el a kedvezőtlen időjárás miatt, többek között a következő feladatok lettek volna: csillagképek megnevezése, az M39 Messier-objektum (nyílt halmaz a Hattyú csillagképben) és egy megadott koordinátájú égi objektum távcsöves megkeresése, felismerése. Az olimpiákon számára egy EQ5 mechanikára szerelt Newton-távcsövet adtak a megfigyeléshez, amellyel az észlelés tervezett napjának délelőttjén ismerkedtek meg.



Az elméleti fordulón végül 12 rövidebb és két hosszabb feladatot kellett megoldaniuk a versenyzőknek (eredetileg 15 rövidebb és 3 hosszabb feladatot terveztek a szervezők). A rövid feladatokban rákérdeztek a Nap–Föld-rendszer Lagrange-pontjaira. Ki kellett számolni a Föld új pályaperiódusát egy olyan feltételezett esetben, ha a Nap hirtelen elveszítené tömegének felét. Volt kérdés a π -mezón bomlásával kapcsolatosan. *Sandra Bullock* és *George Clooney* *Gravitáció* című filmje adta az ötletet egy kérdéshez, amelyben az űrhajójától 90 méterre levő (műholdat javító) űrhajósnak egy jeget tartalmazó palack segítségével kellett volna visszajutnia az űrhajójához, és azzal is bonyolították ezt a feladatot, hogy csak három percre volt elég oxigénje. A fő kérdés az volt, hogy lehetséges-e ez a feladatbeli adatok alapján, és a megfelelő körülményeket, lehetséges módot is részletezni kellett. Egy másik feladatban a csillagok Hertzsprung–Russell-diagramján a fősorozaton tartózkodás idejét kellett megadni a Nap bizonyos adataihoz viszonyítva. Egy-egy további feladat egy csillag két különböző hullámhosszon kibocsátott (hőmérsékleti) sugárzásával, illetve a fény nyomásával volt kapcsolatos. Meg kellett határozni egy Nap körül keringő űrhajóból nézve a Nap látszó fényességét és szögátmérőjét. A Vega csillagnak egy kamera fotólemezen két eltérő fényességű képe fotografikus magnitúdójának különbségét kellett kiszámolni (ezt a feladatot részletesen is ismertetjük). A Hold látszó fényességével kapcsolatos feladatot is kaptak. Továbbá le kellett vezetni egy cefeida változócsillag abszolút fényességének megadott képletét.

Az egyik hosszú feladat a Föld egy pontjából (Romániából) az „ellenpontjába” kilőtt rakéta adataira kérdezett rá: a kilövési sebességre és szögére, a célpontbeli sebességre, a rakéta minimális sebességére pályája során, illetve a repülési idejére. Azt is kérdezték, hogy szabad szemmel látható lenne-e a Földtől legtávolabbi pontjában. A másik hosszú feladat pedig a naplemete hosszával volt kapcsolatos.

Az adatfeldolgozási feladatsornál három feladatot kaptak diákjaink.

Az elsőben egy, a Tejútrendszer középpontjában lévő fekete lyuk (Sagittarius A*) körül keringő csillag észlelt helyzetéről (17 mérés) egy táblázatot kaptak a versenyzők. Ennek alapján kellett ábrázolniuk a csillag égi pályáját, majd kiszámítani a csillag pályájának adatait (fél nagytengely, fél kistengely, excentricitás), a csillag észlelőtől való távolságát, keringési idejét, a csillag + fekete lyuk rendszer teljes tömegét. Segítségül milliméterpapírt, indigós papírt, átlátszó papírt és ellipszisrajzolási segédletet kaptak átlátszó fólián.

A második feladatban két képzeletbeli exobolygó felszínére szállt le egy-egy űrszonda. A bolygóléggörök tiszta szén-dioxidból álltak, és termodinamikai egyensúlyi állapotban voltak. Rákérdeztek arra a magasságra, amelytől már egyenesen esett az űrszonda, valamint egy adott magasságbeli hőmérsékletértéket is meg kellett határozni.

A harmadik feladatban is egy exobolygón voltunk, mégpedig a Sirius egy képzeletbeli bolygóján. Ebből a helyzetből kellett többek között a Nap látszó fényességét, magának a Siriusnak a fényességét, a Mizar többes rendszer (négy csillagból áll) összluminozitását, a Föld és a Mizar-rendszer átlagos távolságát, valamint a Mizar és a Sirius szögtávolságát meghatározni. Elvárták még a válasz hibájának becslését is.

Az elméleti feladatok és a gyakorlatiak egyenlő súllyal szerepeltek az összpontszámban.

Az egyes országok tanulói együtt, csapatversenyen is összemérhették tudásukat. Egy felénk száguldó aszteroidától kellett megmenteniük a Földet. Egy nukleáris töltetű űrhajóval szerették volna szétrobbantani azt a kisbolygót (2013 UX11), amit 2013 októberében fedezett fel két román csillagász. Diákjaink feladata volt, hogy megtervezzék a rakéta fellövésének kezdőfeltételeit mindössze 1,5 óra alatt számítógép segítségével nélkül. Ehhez meg kellett határozniuk az aszteroidaöbven, a Mars és a Jupiter között 4,2 éves periódussal keringő kisbolygó pályaelemeit (fél nagytengelyét, perihélium- és aphélium-távolságát), tudva, hogy 0,15 excentricitású a pálya. Kérdezték még a kisbolygó felszínén mérhető legkisebb és legnagyobb hőmérsékleteket is. Meg kellett határozni a rakéta kezdősebességét, pályaelemeit is.

IOAA-2014, elméleti feladatsor 9. feladata

Most, a fény nemzetközi évében egy fényvel kapcsolatos olimpiai feladatot és megoldását ismertetünk részletesen. A csillagászati fényesség mérésével kapcsolatos kis kiegészítéssel akár tanórán is tárgyalható ez a feladat.

Néhány honlap a témával kapcsolatosan:

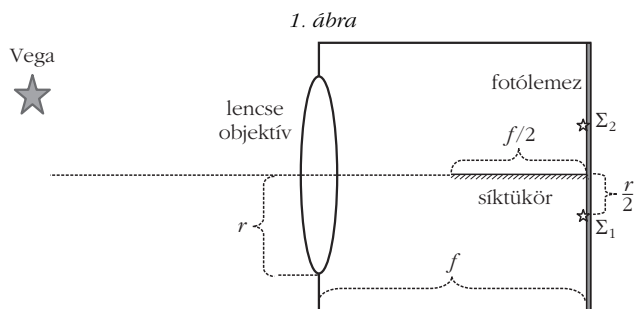
<http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/termesztudomanyok/foldrajz/csillagaszat/csillagkepek-csillagok-csillagfejlodes/a-csillagok-alapveto-tulajdonsagai>

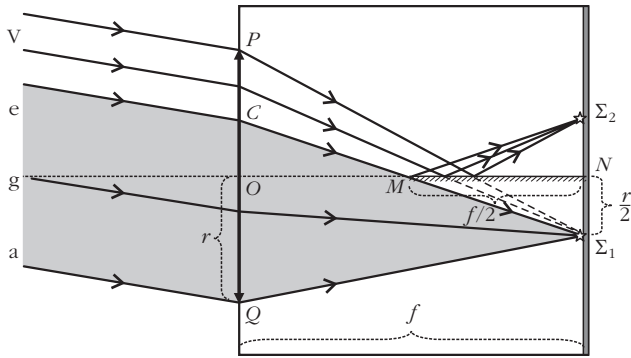
<http://astro.elte.hu/icsip/csil\elele/allapothatarozok/fenyseg.html>

<http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/7/\Csillagfejlodes/csillagfejlodes.htm\#id2532528>

A Vega tükröképe

Egy fotókamera belsejében egy síktükör van, amely az objektív optikai tengelyében fekszik (1. ábra). A tükör hossza éppen fele az objektív fókusz-távolságának. A fotólemez az optika fókusz-síkjában van. A fotólemezen két eltérő fényességű képet rögzíthetünk (az





2. ábra

1. ábrán ezek Σ_1 és Σ_2). A Vega nem pontosan a lencse optikai tengelye irányában van. A Σ_1 kép távolsága az optikai tengelytől: $r/2$. Határozd meg a Vega két képe látszó fotografikus magnitúdójának különbségét!

Megoldás. A Vegáról érkező fénysugarak párhuzamosnak tekinthetők a megfigyelőtől való nagy távolság miatt. A csillag két különböző képen létrejötte azzal magyarázható, hogy az optikai tengely nem párhuzamos a csillagról érkező fénysugárral (2. ábra). A képek a fotólemezén szimmetrikusan helyezkednek el az optikai tengelyhez képest.

Az egyes képpontokban nem ugyanakkora fluxus koncentrálódik. A 3. ábra mutatja, hogy a lencse mely tartományairól jut fény az egyes képpontokba. Az $APBC$ tartományon áthaladó fény koncentrálódik a Σ_2 képpontban, míg az $ACBQ$ tartományon áthaladó fénysugarak a Σ_1 képet adják.

A két képből koncentrálódó fényfluxusok aránya megegyezik a két említett tartomány területének arányával. Geometriai meggondolásokból:

$$MN = OM,$$

$$N\Sigma_1 = OC = \frac{r}{2},$$

$$\angle(CBO) = 30^\circ = \frac{\pi}{6},$$

$$\angle(BOC) = 60^\circ = \frac{\pi}{3},$$

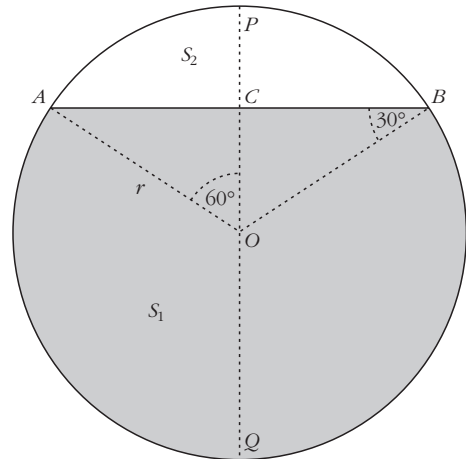
$$\angle(AOB) = 120^\circ = \frac{2\pi}{3}.$$

A körszelet területe:

$$S = \frac{1}{2} r^2 (\alpha - \sin\alpha),$$

ahol az α szöget radiánban értjük. Így a két körszelet hányadosa:

$$\begin{aligned} \frac{S_1}{S_2} &= \frac{\frac{1}{2} r^2 \left(\frac{4\pi}{3} - \sin \frac{4\pi}{3} \right)}{\frac{1}{2} r^2 \left(\frac{2\pi}{3} - \sin \frac{2\pi}{3} \right)} = \frac{\frac{4\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{2\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2}} = \\ &= \frac{8\pi + 3\sqrt{3}}{4\pi - 3\sqrt{3}} \approx 4. \end{aligned}$$



3. ábra

A Pogson-féle képletet használva megkaphatjuk a képek látszó magnitúdójának különbségét (T_V , R_V és d_{FV} a Vega felszíni hőmérséklete, sugara és a fotókamerától való távolsága):

$$\log \frac{E_1}{E_2} = \log \frac{\frac{\sigma T_V^4 4\pi R_V^2}{4\pi d_{FV}^2} S_1}{\frac{\sigma T_V^4 4\pi R_V^2}{4\pi d_{FV}^2} S_2} = -0,4(m_1 - m_2),$$

$$\log \frac{S_1}{S_2} = -0,4(m_1 - m_2),$$

$$m_2 - m_1 = 1,5^m.$$

A Σ_1 „valódi kép” 1,5 magnitúdóval fényesebb, mint a Σ_2 „tükörkép”.

Olimpiai témakörök

Az IOAA diákolimpián széles körű csillagászati alapismereteket várnak el mind az elméleti, mind a gyakorlati feladatoknál. A feladatok középiskolai matematikai és fizikai ismeretekkel megoldhatók, nem szükséges a differenciál- és integrálszámítás vagy a komplex számok ismerete. Ha csillagászati szoftvereket szeretnének használni akár a gyakorlati, akár a megfigyelési résznél, azoknak ingyeneseknek vagy olcsónak kell lenniük, és legalább három hónappal az olimpia előtt ezt a szoftverhasználati szándékot be kell jelenteniük a szervezőknek. Ez érvényes a bonyolultabb gyakorlati felszerelésre is, amit esetleg használni szeretnének a verseny során. Lehetnek a megadott ismeretanyag kívüli fogalmak és jelenségek is a feladatokban, de akkor elegendő információt kell biztosítani a versenyzőknek, hogy azok se kerüljenek hátrányba, akik előzőleg nem hallottak ezekről a témákról. A feladat kiíróinak az SI mértékegységeket kell használniuk, a diáktól pedig elvárható, hogy megfelelő mértékegységekben adják meg a megoldásukat annak hibájával, értékes számjegyeivel együtt.



Elméleti rész

Asztrofizikai alapok

Égi mechanika (Newton gravitációs törvénye, Kepler törvényei kör- és nem körpályákra, Roche-határ, tömegközéppont, kéttest-probléma, Lagrange-pontok); *elektrodinamika és kvantummechanika* (elektromágneses színekép, sugárzási törvény, Planck-féle sugárzási törvény); *termodinamika* (termodinamikai egyensúly, ideális gázok, energiaátadás); *spektroszkópia és atomfizika* (abszorpció, emisszió, szórás, égitestek színeképe, Doppler-effektus, vonalas és folytonos színekép, színképvonalak felhasadása és kiszélesedése, polarizáció); *magfizika* (alapfogalmak és az atom szerkezete, tömeghiány és kötési energia, radioaktivitás, neutrínók).

Koordináták és idők

Éggömb (szferikus csillagászat, égi koordináták és alkalmazásai, napéjegylenlőség és napfordulók, circumpoláris csillagok, csillagképek, állatöv); *az idő fogalma* (középszoláris idő, csillagidő, Julián dátum, időzónák, világidő, lokális középidő, az év különböző definíciói, időegyenlet).



Naprendszer

Nap (szerkezete, felszíni aktivitása, forgása, sugárzása, napállandó, napneutrínók, Nap-Föld viszony, a mágneses tér szerepe, napszél és a sugárnyomás, helioszféra, magnetoszféra); *Naprendszer* (Föld-Holdrendszer, precesszió, nutáció, libráció, a Naprendszer keletkezése és fejlődése, szerkezete és összetevői, naprendszerbeli égitestek szerkezete és pályái, sziderikus és szinodikus periódus, retrográd mozgás, a Naprendszer külső részei); *a világűr felfedezése* (műholdak pályái és pályamódosításai, a Naprendszer emberes felfedezése, bolygómissziók, gravitációs lendítés, műholdakon levő műszerek); *jelenségek* (ár-apály, évszakok, fogyatkozások, sarki fény, meteorzáporok).

Csillagok

A csillagok tulajdonságai (távolságmeghatározási módszerek, sugárzás, energiakibocsátás [teljesítmény] és fényesség, színindex és a hőmérséklet, csillagok sugarának és tömegének meghatározása, csillagok sajátmozgása, szabályos és szabálytalan változócsillagok osztályozása és tulajdonságaik, cefeidák és a periódus-fényesség összefüggés, a pulzáció fizikája); *csillagbelső és csillaglégkörök* (csillagok belső egyensúlya, energiatermelésük [nukleoszintézis], energiatranszport, határfeltételek, csillaglégkörök és színeképük); *csillagfejlődés* (csillagkeletkezés, Hertzsprung-Russell-diagram, fősorozat előtti állapot, fősorozati csillagok, fősorozat utáni állapot, szupernóvák, planetáris ködök, csillagok végállapotai).

Csillagrendszerek

Kettőscsillagok (különböző típusú kettőscsillagok, tömegmeghatározás kettőscsillagoknál, fénygörbék és radiálissebesség-görbék fedési kettőscsillagoknál, Doppler-eltolódás kettőscsillagoknál, kölcsönható kettősök, különleges kettőscsillagok); *exobolygók* (exobolygó-felfedezési módszerek); *csillagthalmazok* (osztályozásuk, szerkezetük, tömeg, energiakibocsátás, kor, távolságmeghatározás); *Tejútrendszer* (szerkezete és összetevői, Galaxisunk forgása, a Tejútrendszer kísérőgalaxisai); *csillagközi anyag* (gáz, por, III-régiók, 21 cm-es színképvonal, ködök, csillagközi elnyelés és diszperzió mérése, Faraday-rotáció); *galaxisok* (osztályozásuk szerkezetük, összetevőik és aktivitásuk szerint, tömeg, energiakibocsátás és távolság meghatározása, tengelyforgási görbék alakja); *kialakulási folyamatok* (alapelméletek [gömbi és korongnövekedés], Eddington-féle energia).

Kozmológia

Elemi kozmológia (táguló Univerzum és Hubble törvénye, galaxishalmazok, sötét anyag, sötét energia, gravitációs-lencse-hatás, kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás, ősrobbanás-elmélet, az Univerzum kü-



lönböző modelljei, a Világegyetem nagy léptékű szerkezete, távolságmeghatározás, kozmológiai vörösetolódás).

Műszerek és űrtechnológia

Csillagászat különböző hullámhosszakon (csillagászati megfigyelések rádió-, mikrohullámú, infravörös, látható [fény], ultrabolya-, röntgen- és gamma-hullámhosszakon, földi légköri hatások); *műszerek* (távcsövek és detektorok [CCD, fotométer, spektrográf], nagyítás, fókusz-távolság, fókuszarány, a távcsövek felbontó- és fénygyűjtő képessége, kételemű interferométer geometriai modellje, adaptív optika, fotometria, asztrometria).

Az előzőekben felsorolt témák szinte mindegyike szerepel az emelt szintű érettségi követelményekben (fizika, földrajz, természettudomány), és sok fellelhető belőlük a középszintű érettségik követelményrendszerében, így a különböző kerettantervekben is.

Gyakorlati rész

Ez két részből áll: a *megfigyelésből* és az *adatfeldolgozásból*. Az elméleti résznél megadott témakörök szolgáltatók a gyakorlati problémák alapját is.

Észlelés

Az észlelésnél a következő területeken való jártasságot mérik: szabadszemes megfigyelés, csillagtérképek és katalógusok használata, égi koordináta-rendszerek alkalmazása, fényesség becslése (magnitúdómeghatározás), szögtávolságbecslés, távcsövek és különböző detektorok használata. A megfigyelt objektumok lehetnek valódiak és vetítettek is. Számítógépes szimulációk is használhatók, ha erről a versenyzőket kielégítően tájékoztatták előzőleg.

Adatelemzés

Az adatelemzési részben konkrét csillagászati adatokat kell vizsgálni, meghatározni, belőlük újabbakat kiszámolni. A versenyzőkkel szembeni elvárások: a hibafor-

rások azonosítása, hibaszámítás és annak becslése, hogy ez miként hat a végeredményre. Tudniuk kell használni a logaritmikus beosztású vagy polárkoordinátás papírt. Az adatokat át kell tudni alakítani olyan formába, hogy azok egyenesre illeszkedjenek. A legjobb illesztést is meg kell adniuk közelítőleg. Elvárják a mért adatok elemi statisztikai vizsgálatának ismeretét is. Az elméleti részben szereplő fizikai mennyiségek legismertebb mérési eljárásaival is tisztában kell lenniük.

A gyakorlati részhez szükséges készségek elsajátításához már kell, hogy amatőr vagy hivatásos csillagászok segítsék diákjainkat. Erre szinte az egész országban adódik lehetőség (iskolai csillagászati szakkörön, helyi amatőrök vagy csillagvizsgáló által szervezett szakkörökön).

Csillagász diákolimpikonok kiválasztása, felkészítése

Az IOAA-n való részvételre új országokat meghívások alapon választanak be. Magyarországot szlovák csillagászok ajánlották 2009-ben. A következő olimpián (amelyhez Kínába kellett volna utazni) még elsősorban a támogatás hiányában nem volt jelen magyar delegáció, de 2011-re már összeállt egy kiutazó csapat. A romániai olimpiáig minden csapattagnak és kísérőnek saját pénzéből kellett fizetnie a kiutazás költségeit, majd a helyszínen már a fogadó ország biztosította a versenyzők szállását, étkezését és utazását. Természetesen korlátozzák az országonkénti résztvevők számát (5 versenyző és 2 kísérő). Mód van megfigyelők, esetleg más diákok részvételére is, de a létszám limitált, és a költségeiket saját maguknak kell fizetniük. A rendező ország mindig két csapattal vehet részt a versenyen, és ezt még egy-két alapító országok is minden évben megengedik.

Magyarországi felkészítéshez tavaly biztosítottak először központi állami támogatást. Az olimpikonok kísérői (egyben az IOAA hazai koordinátorai) *Hegedűs Tibor*; az SZTE Bajai Obszervatóriumának vezetője és *Udvardi Imre*, az Újpesti Könyves Kálmán Gimnázium matematika-fizika szakos tanára. A versenyzők kiválasztásában, felkészítésében természetesen sokan segítenek, köztük az SZTE és az ELTE Gothard Asztrofizikai Obszervatóriumának csillagásza, a TIT Budapesti Planetárium és a Magyar Csillagászati Egyesület, de néhány korábbi csillagász diákolimpikon is.

Az olimpiára utazók végső sorrendje országos versenyen alakul ki. Először három internetes fordulón kell csillagászati feladatokat megoldaniuk a diákoknak, amelyek között megfigyelési is van. A három forduló után választják ki az országos döntő versenyzőit, általában húsz fő alatti létszámban. A végső hazai megméretésen már semmilyen segédeszközt sem használhatnak a tanulók, de ahogyan az igazi diákolimpián, itt is egyforma számológépet és egy csillagászati állandókat tartalmazó táblázatot kapnak. A diákolimpián középisolás diákok vehetnek részt, a felső korhatár húsz év.

Miután felállt az olimpiai csapat, elkezdődik az intenzív felkészítés, amely igen megterhelő a diákoknak, hiszen többen ezzel egyidejűleg készülnek az érettségire is. A csillagászati olimpiai szakkörnek is helyet adó Újpesti Könyves Kálmán Gimnáziumban néhány szombaton tartanak felkészítő előadásokat, majd az észlelési részben a Planetáriumba, és a Polaris csillagvizsgálóba mennek a diákok. A nyári szünetben néhány napot a piszkéstetői csillagvizsgálóban, míg egy hetet a bajai csillagvizsgálóban töltenek közös felkészüléssel diákjaink. Biztató, hogy a volt olimpiások közül sokan segítik a felkészítést, bennük még friss az élmény, korban közel állnak az új versenyzőkhöz, igen hatékony a segítségük. Új ismeretek, barátságok alakulnak, a kis csapatnak is van ideje összekovácsolódni.

Bár az IOAA-nak még egy évtizedes múltja sincs, a magyar diákok pedig még csak néhány éve versenyeznek, kedvező, hogy a felkészítés módszertanát már nem kell kitalálnunk, csak át kell vennünk a jó ötleteket (ilyenek például a válogatóversenyek). Az intenzív felkészítő táborok, a bárki által látogatható évközi olimpiai szakkör is beindulhat ez évtől nemcsak Budapesten, az Újpesti Könyves Kálmán Gimnáziumban, de Baján és Debrecenben is. Bízunk abban, hogy más nagyobb városban is elindulnak hasonló kezdeményezések. 2015 nyarán egy szomszédos országok közötti csillagász versenyt is rendezünk az „éles” olimpiai tréning céljából – talán ebből is jó hagyomány válik. Most már elegendő feladatanyag is rendelkezésünkre áll angolul, fordításuk folyamatosan történik, és szeretnénk magyar nyelvű elméleti felkészítő anyagot is készíteni, ezzel is segítve az érdeklődő tanulók felkészülését.

Csillagász diákolimpiai helyszínek a jövőben

A következő diákolimpiát Indonéziában, 2015 nyarán rendezik¹. Olimpikonjaink egzotikus környezetben mérhetik össze tudásukat a világ minden részéről érkező diákokkal. Az olimpiai feladatmegoldások közötti kirándulásokon megismerhetik a rendező ország látványosságait, kultúráját. Bizonyára sokaknak közülük életre szóló élményt ad egy-egy olimpia az elért eredményen kívül is. Olyan ismeretek alakulhatnak ki, amelyek az egyetemi tanulmányokban vagy a későbbi munkavállalásban is segíthetnek. A következő évek olimpiái is különleges, távoli helyszíneken lesznek, Pakisztánban, Indiában vagy éppen Srí Lankán.

IOAA 2019: Magyarország

Az Európán kívüli sok újabb helyszín után európai országok közül először Magyarország vállalta az IOAA megrendezését 2019-ben. Lehetőségünk lesz két csapattal is versenyezni. Nagy kihívás, sok ember segítő munkáját igénylő feladat, de egyben a hazai csillagászati szakma és egész országunk, kultúránk is bemutatkozhat a nemzetközi porondon.

Fizikatanárként meg kell ismertetnünk diákjainkkal ezt a lehetőséget, és segítenünk kell a felkészülésben őket. Ez is ragyogó lehetőség a fizika megszeretetéséhez.

Forrás

<http://ioaa2015.org/syllabus>

¹ A kézirat beérkezése óta az IOAA 2015 lezajlott.

HÍREK – ESEMÉNYEK

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Rekordenergia az LHC-ben, magyar közreműködéssel

Befejeződtek a Nagy Hadronütköztető (LHC) júniusi indulásának előkészületei, amelyekben magyar kutatók is komoly szerepet vállaltak. Az LHC történetének újabb mérföldkövéhez érkezett: ezúttal minden eddiginél nagyobb, 13 TeV-es energiával ütköztettek protonokat egy tesztkísérletben.

Május 20-án 22.30 körül a CERN Nagy Hadronütköztetője fejlesztésének 2. fázisa újabb mérföldkövéhez érkezett: először ütköztek benne protonok 13 TeV-es rekordenergiával. Ez újabb fontos lépés abban a folyamatban, amelyben a berendezést felkészítik a részecskenyalábok ütköztetésére. Sok rend-

szert – főleg a nyalábkollimátorokat – kell még összehangolni ahhoz, hogy júniusban biztonságosan elindulhassanak a fizikai mérések. A nyalábkollimátorok távolítják el a nyalábból a széttartó részecskéket. Precíz beállításukkal biztosítják a gyorsítós szakemberek a megfelelő védelmet az LHC mágnesei és észlelőrendszerei számára az adatgyűjtés június elején várható kezdetére.

A mostani, rekordenergiájú ütközés a 2. fázishoz vezető út kulcsfontosságú pillanata, és rengeteg ember kemény munkájának eredménye, köztük számos magyar szakemberé. Jó néhány magyar mér-

nök, fizikus és informatikus dolgozik a gyorsító és észlelőrendszerei fejlesztésén, karbantartásán, üzemeltetésén.

Az LHC két detektora, az ALICE és a CMS magyar résztvevői az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontból, az MTA Atommagkutató Intézetből, a Debreceni Egyetemről és az Eötvös Loránd Tudományegyetem-

ről mind résztvettek a másfél éves előkészítő munkában. A detektorok készenlétben várják a protonok ütközését. Az LHC előkészületi munkája alatt a szét-szórt részecskék, illetve a részecskegyorsítás szünetében a kozmikus sugarak észlelésével folyamatosan ellenőrzik a detektorok működését a szakemberek.

(http://mta.hu/tudomany/_hirei/)

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

A lézer felfedi az őskori leletek korábban nem észlelt részleteit

Egy új, lézeres szkennelő technikát fejlesztettek ki amerikai tudósok, amely segíthet abban, hogy a kutatók régészeti leletek vizsgálatával új információhoz jussanak. A nem költséges és roncsolásmentes módszer kereskedelmi forgalomban kapható lézereket használ, hogy a leletben fluoreszcenciát váltson ki, amely olyan részleteket tár fel, amelyek a hagyományos módszerekkel, mint az UV-fénnyel való besugárzás, nem láthatók. A paleontológiában már régóta használnak olyan megvilágítási módszereket, amelyekkel a leleteket megvilágítva azok vizsgálhatók vagy fényképezhetők. Egy érdekes technika UV-fényt használ, amely látható fluoreszcenciát hoz létre bizonyos ásványokban, mint például a hidroxipatit (a csontok szervesen összetevője) – és bizonyos esetekben még láthatóvá teszi a megkövesedett lágy szöveteket is. A legtöbb ásványt a kőületekben nem lehet fluoreszkálásra készíteni, ezek UV-fényben sötétek maradnak.

A fluoreszcencia intenzitása azonban megnövelhető, ha nagyintenzitású fényforrást használunk, mint a lézer, amely detektálható fluoreszcenciát hoz létre a minták szélesebb választékánál. Míg a lézeres gerjesztést hagyományosan részletes vizsgálatokra használják mikroszkopikus skálán – vagy konfokális lézer szkennelő mikroszkóppal, vagy Raman-spektroszkópiával – a legújabb fejlemények és a költségsökkenés a kereskedelmi lézertechnológiában lehetővé tette, hogy *Tom Kaye*, a Seattle városában lévő Burke Múzeum paleontológusa és kollégái makroszkopikus szinten is alkalmazzák a lézer kiváltotta fluoreszcenciát.

A módszer egyszerű – egy besötétített szobában a leleteket lézerefénnyel gerjesztik és megfelelő szélessávú szűrőn keresztül nézik. A szűrő blokkolja az intenzív lézerefényt, ugyanakkor átengedi a leletből származó

fluoreszcens jelet, ami egy digitális kamerával hosszú expozíciós idő beállításával lefényképezhető. A különböző hullámhosszak más-más módon gerjesztik a különböző kőületeket és fossziliákat. Még ha egy bizonyos kőület nem is fluoreszkál, akkor is besugározhatjuk a környező kőzetet, háttérvilágítást adva mintának.

A minták részleteinek láthatóvá tétele mellett a lézerefény elég intenzív ahhoz, hogy behatoljon bizonyos kőzetekbe korlátozott mélységig, és láthatóvá tegye azokat a részleteket, amelyek a minta felszíne alatt részlegesen vagy teljesen rejtve maradnak. A lézertechnika használatával a kutatóknak sikerült azonosítani egy 120 millió éves, beágyazott „titokzatos fossziliát” – egy halat – amikor a minta fogai és csontváza nagyobb intenzitással fluoreszkáltak, mint a környezetük.

A lézeres szkennelés segít a hamisítványok leleplezésében is – olyan maradványoknál, amikor a lelet különböző példányokból lett összeállítva. „Az emberek megpróbálják a leleteket »kicsinosítani«, hogy jobban el lehessen adni őket” – magyarázza a kutatócsoporttag *David Burnham* a Kansas Egyetemről. Néhány művész olyan ügyes, hogy nem lehet megállapítani, hol végződik a valóság és hol kezdődik a csalás. A lézerekkel most már tudni fogjuk.”

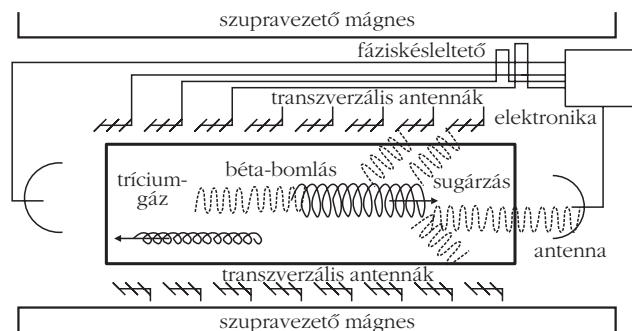
Miután demonstrálták a lézer kiváltotta fluoreszcencia lehetőségeit, Kaye és munkatársai az új eszköz a korábban vizsgált mintákra is alkalmazzák, hogy új részleteket tárjanak fel. Azt is vizsgálják, hogyan alkalmazható a módszer egy terület szkennelésére leletek felderítéséhez 100 méter körüli távolságból, összekapcsolva a lézert egy telefontól kamerával.

(<http://physicsworld.com/>)

Először mérték meg az egyetlen elektron által kibocsátott ciklotronsugárzást

Amerikai és német fizikusok egy kutatócsoportjának először sikerült megmérnie egyetlen elektron szinkrotronsugárzását. A kutatás lehetővé teszi egy új és várhatóan az eddiginél pontosabb eljárását a béta-sugárzás vizsgálatának, amelynél egy elektron és egy neut-

rínó kibocsátása történik. A részleteket illetően lehetővé teszi a fizikusoknak a neutrínó tömegének az eddiginél sokkal pontosabb meghatározását, ami kulcsfontosságú a standard modellen túli fizika megértéséhez.



A tervezett kísérlet sematikus rajza. A tríciumgázzal töltött kamra állandó mágneses térben van. A béta-bomlással keletkező elektronok ciklotronmozgást végeznek és ezzel ciklotronsugárzást bocsátanak ki, amelyet az antennarendszer detektál.

A részecskefizika standard modellje feltételezi, hogy a neutrínó tömege zérus, de 1998-ban Japánban a Super-Kamiokande detektor azt az eredményt adta, hogy a részecskék oszcillációt szenvednek, következésképpen kell, hogy tömegük legyen. A háromféle neutrínó tömegének ismerete kulcsfontosságú az új fizikában, de a tömegek tényleges megmérése rendkívül nehéz feladat. „Jelenleg sokkal többet tudunk a Higgs-bozon tömegéről, amit két éve, mint a neutrínó tömegéről, amelyet hatvan éve fedeztek fel” mondja *Patrick Huber*, az amerikai Virginia Tech kutatója.

A neutrínóoszcilláció vizsgálata csak annyit mond, hogy az átlagos neutrínótömeg legalább $0,01 \text{ eV}/c^2$, ezért a kutatók a tömeget a béta-bomlásnál az energiamegmaradásából próbálják meghatározni. Ez egy olyan magfizikai folyamat, amelynél egy elektron és egy neutrínó – szigorúan véve egy elektron antineutrínó – kerül kibocsátásra. A neutrínókat igen nehéz detektálni, ezért a fizikusok inkább az elektron energiáját mérik, és azt használják fel, hogy kiszámítsák a neutrínó tömegét.

Az eddigi legjobb mérések által az elektron antineutrínó tömegének felső határára a $2,05 \text{ eV}/c^2$ adódik. A tudósok egy új, KATRIN elnevezésű detektort szerelnék össze Németországban a Karlsruhe Institute of Technology-ban. Ez akár olyan kis tömeget is tud mérni, mint $0,2 \text{ eV}/c^2$ – amely még mindig egy húszszoros bizonytalanságot jelent a tömeg értékében. De

a KATRIN detektor épület nagyságú, és a mérés pontosságának növelése egy még nagyobb és drágább spektrométert igényelne.

A fizikusok Karlsruheban és több amerikai egyetemen megindították a Project 8 együttműködést, amely másfajta és elegánsabb módszert használ a neutrínó tömegének megmérése. Amikor egy elektron mágneses téren halad keresztül, pályája körpálya lesz, és emiatt a mikrohullámú frekvenciatartományban ciklotronsugárzást bocsát ki. E sugárzás tulajdonságai az elektron energiájától függenek, ezért ezen effektus mérése egyszerűbb és pontosabb technikát tesz lehetővé, mint a KATRIN által használt módszer. A nagy kihívás azonban az, hogyan lehet detektálni az egyetlen elektron által kibocsátott, rendkívül gyenge, fém-tovattos jelet.

A Project 8 csapat fontos lépést tett abban az irányban, hogy az első legyen, amelyik ciklotronsugárzást képes detektálni. A berendezés kis méretű, asztali prototípusa Seattle-ben, a University of Washington laboratóriumában van, és egy centiméter méretű, kripton-83-mal töltött gázcellát használ; a kripton-83 ugyanis béta-sugárzó. A tényleges neutrínótömeg-kísérletekben a kripton tríciummal helyettesítik, de ehhez további technikára és biztonsági intézkedésekre van szükség. A cellát egy szupravezető tekercs által keltett mágneses térbe helyezik. A béta-bomlásban kibocsátott elektronok a cellában hosszú, kör alakú pályán fognak keringeni mikrohullámú ciklotronsugárzást kibocsátva, amit lehűtött, rendkívül alacsony zaj háttérű detektorokkal fognak detektálni.

A kutatók 30 eV pontossággal mérték az egyes elektronok energiáját. Bár ez túl alacsony ahhoz, hogy megbízható számításokat végezzenek a neutrínótömegre, a csoport most azon dolgozik, hogy javítsa a berendezés felbontását. „Az általunk épített berendezés nagyon kicsi, és ez leegyszerűsíti az elektronikát. Most a kiolvasás, az antenna és az erősítő berendezés tervezésén dolgozunk, és a megfelelő szoftveren, hogy a méreteket meg tudjuk növelni” – mondta *Benjamin Moreal*, a University of California, Santa Barbara fizikusa, a csapat egyik tagja.

(<http://physicsworld.com/>)

EURÓPAI ÉRDEKESSÉGEK A *EUROPHYSICS NEWS* VÁLOGATÁSÁBAN (2015. március–április)

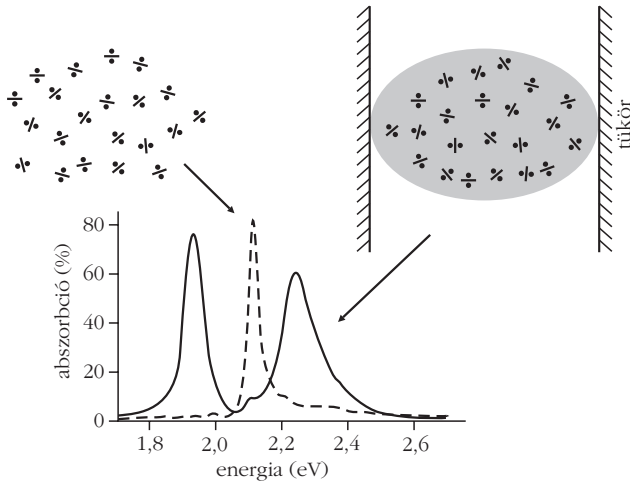
A fény-anyag csatolás hatalma

A. Canaguier-Durand, C. Genet, A. Lambrecht, T. W. Ebbesen, S. Reynaud: Non-Markovian polariton dynamics in organic strong coupling. *Eur. Phys. J. D* 69 (2015) 24.

Ez az elméleti tanulmány azt demonstrálja, hogy a fény és szerves anyag között nanoskálán kialakított

csatolás utat nyit ezen erősen csatolt rendszerek optikai, elektronikus és kémiai tulajdonságainak módosításához.

Az anyag és a fény közötti csatolás olyan erős is lehet, hogy tulajdonságaik elválaszthatatlanokká válnak. Ezt a fény-anyag csatolást hívják polaritonnak. Energiája folyamatosan oszcillál a két alrendszer között, amely érdekes új fizikai jelenségekre vezet. A



Az ábra a molekulák és egy 145 nm vastagságú Fabry–Perot-üreg optikai alapl módusának csatolását illusztrálja. A csatolatlan (szaggatott vonal) és a csatolt (folytonos vonal) molekulák abszorpciós spektrumának menete lényegesen eltér (ábra az eredeti cikk nyomán).

szerzők megindokolják, miért maradnak e polaritonok szokatlanul hosszú ideig alapállapotukban, ami egyben alkotórészeik mikroszkopikus és makroszkopikus tulajdonságait egyaránt alapvetően megváltoztatja. Új elméleti eredményei összhangban vannak a tapasztalati tényekkel, kikövezve az utat az optikai, elektronikus és kémiai alkalmazásokhoz.

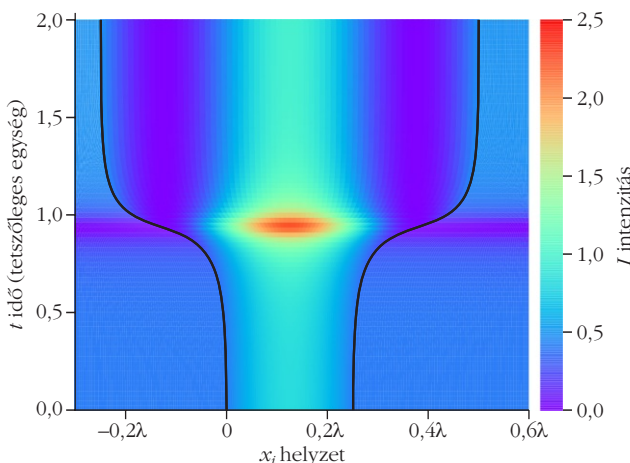
Precíziós mérések céljára fényel kristályosított atomok

D. Holzmann, M. Sonnleitner, H. Ritsch: Self-ordering and collective dynamics of transversely illuminated point-scatterers in a 1D trap. *Eur. Phys. J. D* 68 (2014) 352.

A közlemény nanoszálban haladó fotonokhoz csatolt megvilágított atomok kollektív dinamikáját tanulmányozza.

Elméleti fizikai vizsgálatok feltárták a hosszú hatótávolságú atom-atom erővel kölcsönható és megvilágítás hatására kristályt alkotó atomok önszerveződő

Két nyalábosztón áthaladó trajektóriák és intenzitásviszonyok (ábra az eredeti cikkből).



dinamikáját. A szerzők által a közelmúltban elért eredmények elősegítik az újfajta anyagok kristályosodásának megértését, a fotontárolás hatásfokjavításának és az atomokon végzett nagy pontosságú méréseknek jobb megvalósítását.

Vizsgálatuk egycsöves optikai nanoszálból „kiszivárgó” fényben kötött atomokra koncentrál. Ezek a szálok túlságosan vékonyak ahhoz, hogy a fényt teljesen magukba zárják. Az atomokat transzverzális lézertérrel világítják meg, amely fény részlegesen irányt változtat, beleszóródik a nanoszálak az egyes atomokhoz közeli szakaszaiba és csak ezt követően terjed az atomi lánc mentén. Ez a jelenség erős effektív atom-atom kölcsönhatást hoz létre. Eredményeként stabil, a fény által kötött atomlánc alakul ki, amely kristályt alkot.

Ultragyors lézerrel megmunkált rekord vékonyságú napelemek

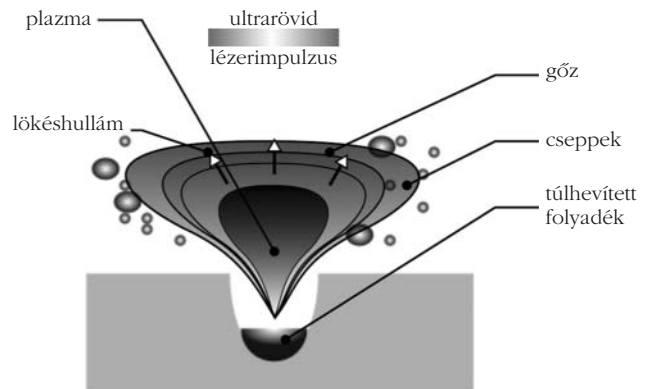
A. Gurizzan, P. Villorresi: Ablation model for semiconductors and dielectrics under ultrafast laser pulses for solar cells micromachining. *Eur. Phys. J. Plus* 130 (2015) 16.

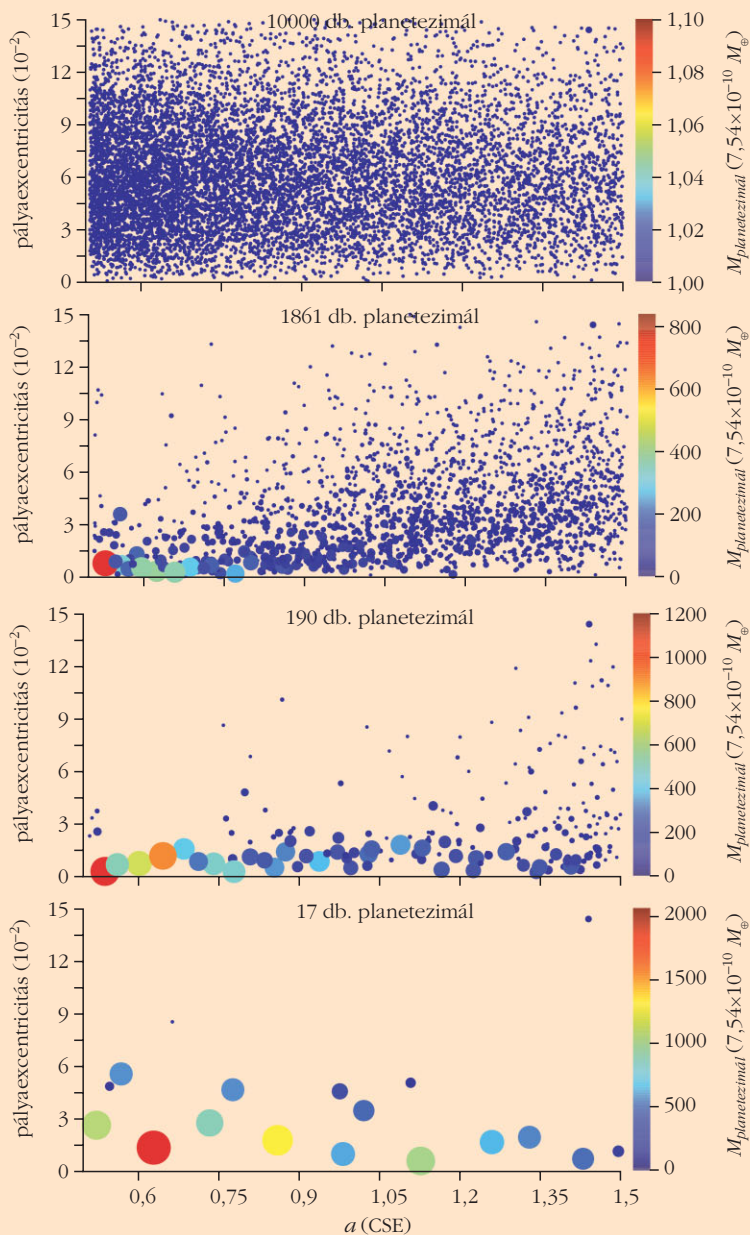
A napelemek hatásfoka függ a megmunkálás során létrehozott rétegvastagságtól. Egy új, a femtoszekundumos lézereket használó eljárás nagyobb hatásfokot ígér alacsonyabb költséggel.

A jobb hatásfokú és olcsóbb napelemekért folyó verseny a megmunkálás lehetőségeit feszítő igényeket támaszt. Egyre vékonyabb fotovoltaiikus napelemeket kell gyártani, miközben azok belső szerkezete egyre bonyolultabb. A szerzők e munkájukban modellt alkottak azokra a fizikai folyamatokra, amelyekben ultragyors lézereket használnak a megmunkálás során.

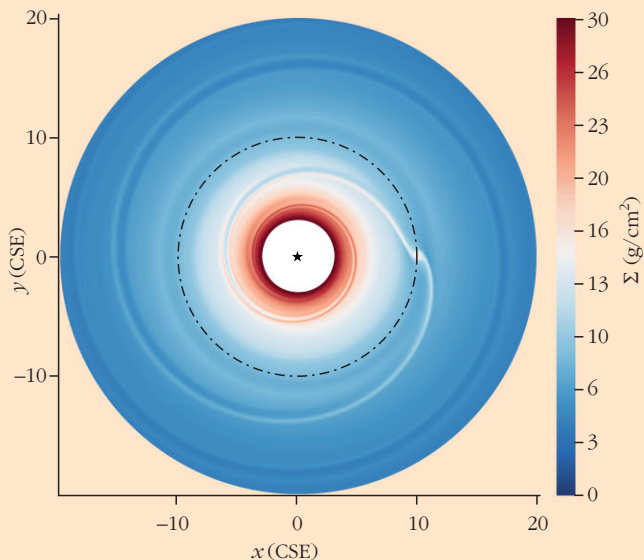
A szerzők az ultragyors lézereket abban az ablációs folyamatban használják, amely során a fémérintkezéseket alakítják ki. Ez a fotovoltaiikus cella felső rétegének szelektív eltávolítását igényli, miközben az alatta elhelyezkedő félvezető réteget nem érheti károsodás. A korábbi módszerekhez képest az új eljárás sok előnyt ígér – csökkenti a hőkárosodást, hatékonyabb energiaszétvitelt eredményez, növekvő pontosságot tesz lehetővé, miközben gyorsítja az eljárást.

Az ultrarövid lézerimpulzus és a céltárgy kölcsönhatása (ábra az eredeti cikkből).

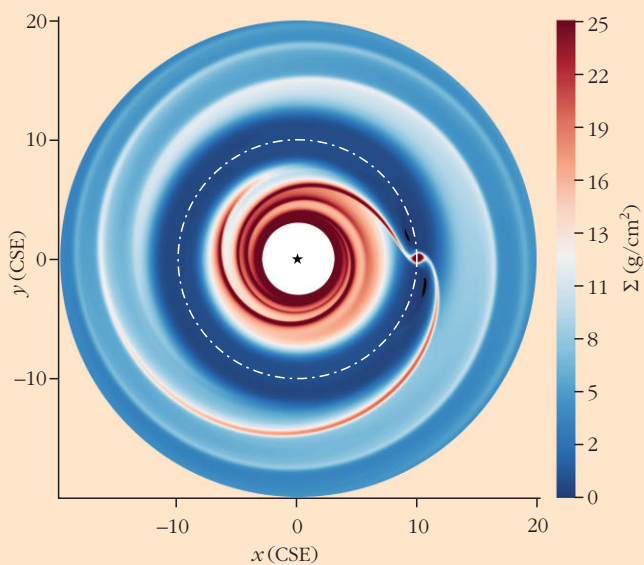




6. ábra. Kőzetbolygók kialakulásának kezdeti fázisa. A bolygócsírák keletkezésének numerikus N-test szimulációja 10000 planetezimál kölcsönös ütközéseinek modellezésével. Az eltelt idő fentről lefelé: nulla, ezer, tízezer és százezer év.



7. ábra. Föld-tömegű bolygó által keltett spirális hullámok a protoplanetáris korongban. A színskála a gáz felületi sűrűségét jellemzi.



8. ábra. Óriásbolygó által nyitott rés a protoplanetáris korongban. A színskála a gáz felületi sűrűségét jellemzi.

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Az elmúlt másfél évtized legfontosabb csillagászati eredményeit összefoglaló, tanórai előadásra is alkalmas segédanyag on-line változata szabadon letölthető a www.fizikaiszemle.hu honlap mellékletek pontjából.



Mérnöki és természetes gárendszer a nagy aktivitású hulladékok hosszútávú, biztonságos elhelyezéséért

A kondicionált radioaktív hulladékot korrózióálló és mechanikailag szilárd, acélból vagy rézből készült konténerbe helyezik. Az első és másodlagos mérnöki gát megakadályozza a radionuklidok környezetbe kerülését.

A befogadó kőzet (vízmegekötő agyagos kőzet/gránit) természetes geológiai gátként működik. A kőzet minőségével kapcsolatban fontos követelmény a kis permeabilitás és a jelentős radionuklid-visszatartó képesség.

A konténereket az erre kialakított betonfalú tárolóvágtatba helyezik, amelyet bentonittal tömedékelnek. A bentonit stabilizálja a konténert, megvédi a talajmozgástól és a rétegvíz okozta sérüléstől. A megtelt tárolóvágtatokat cementtel és/vagy bentonittal visszatöltik. Ezek alkotják a mérnöki gárendszerét.

