

fizikai szemle

SZEGŐ KÁROLY
EMLÉKÉRE

bolygók
üstökösök
helioszféra
űridőjárás

2023/7–8

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:

Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:

Asbóth János, Biró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczi Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

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

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

A Nap a Solar Dynamics Observatory űrszonda 2023. július 2-án a távoli ultraibolya hullámhosszakon készített felvételén. A napkorong jobb pereménél egy hatalmas napkitörés látszik. A kitörés alkalmával forró anyag kerül ki a bolygóközi térbe, ami hatással lehet az útjába kerülő égitestekre is (forrás: NASA/SDO).

TARTALOM

Szegő Károly emlékére	217
Németh Zoltán, Opitz Andrea: A Naprendszer űrszondás kutatása – szakmai bevezető	218
Opitz Andrea, Madár Ákos: A belső helioszféra kutatása	220
Bebesi Zsófia: A Szaturnusz és plazmakörnyezetének vizsgálata – részvétel a Cassini–Huygens-űrmisszióban	225
Tátrallyay Mariella: Magyar részvétel a VEGA-űrmisszióban	235
Németh Zoltán, Timár Anikó: Egy üstökös háborgó plazmakörnyezete – Rosetta-eredmények	241
Kereszturi Ákos: A Comet Interceptor küldetés	245
Tóth Imre: Mit tudtunk meg az üstökösmagokról az eddigi helyszíni űrmissziókból? – rövid áttekintés	248
Kármán Tamás: A Bécsi Természettudományi Múzeum kiállítása, 2018.	255
Sulik Béla, Herczku Péter, Jubász Zoltán, Duncan V. Mifsud, Kovács T. S. Sándor, Sergio Ioppolo, Rácz Richárd, Biri Sándor, Robert W. McCullough, Rabul Kumar Kuswaha, Zuzana Kaňuchova, Vajda István, Lakatos Gergő, Nigel J. Mason: Jeges égitestek ionokkal bombázott felületén zajló folyamatok és laboratóriumi modellezésük	256
Jubász Zoltán, Duncan V. Mifsud, Herczku Péter, Zuzana Kaňuchova: Laboratóriumi asztrokémiai vizsgálatok a Jupiter jeges holdjait felderítő Juice-misszió jegyében	262
Szalai Sándor, Nagy János: Fejlesztések naprendszer-kutatási missziókban	267
REFLEKTORFÉNYBEN	
Pethes Ildikó: Kamarás Katalin, az első Széchenyi-díjas fizikusnő	274
A FIZIKA TANÍTÁSA	
Gnädig Péter, Széchenyi Gábor, Vankó Péter, Vigh Máté: Beszámoló a 2022. évi Eötvös-versenyről	279
Sükösd Csaba: XXVI. Országos Szilárd Leó fizikaverseny – 2. rész	288
KÖNYVESPOLC	
Surján Péter: Patkós András: Céltudatos bolyongásaim – történetek a fizika labirintusaiból	296
In memoriam Károly Szegő	
Z. Németh, A. Opitz: Solar System exploration by space probes – an introduction	
A. Opitz, Á. Madár: Study of the inner Heliosphere	
Sz. Bebesi: Investigation of Saturn and its plasma environment – participation in the Cassini–Huygens space mission	
M. Tátrallyay: Hungarian participation in the VEGA space mission	
Z. Németh, A. Timár: The boisterous plasma environment of a comet – ROSETTA results	
Á. Kereszturi: The Comet Interceptor space mission	
I. Tóth: What did we learn about cometary nuclei from in situ space missions so far – a brief overview	
T. Kármán: Exhibition of the Natural History Museum Vienna, 2018	
B. Sulik, P. Herczku, Z. Jubász, D. V. Mifsud, S. T. S. Kovács, S. Ioppolo, R. Rácz, S. Biri, R. W. McCullough, R. K. Kuswaha, Z. Kaňuchova, I. Vajda, G. Lakatos, N. J. Mason: Ion impact processes on the icy surface of celestial bodies and their modeling in the laboratory	
Z. Jubász, D. V. Mifsud, P. Herczku, Z. Kaňuchova: Laboratory astrochemical studies in the spirit of the JUICE mission exploring the icy moons of Jupiter	
S. Szalai, J. Nagy: Space missions exploring the Solar System with Hungarian contribution	
IN THE SPOTLIGHT	
I. Pethes: Katalin Kamarás, the first female physicist to receive the Széchenyi Prize	
TEACHING PHYSICS	
P. Gnädig, G. Széchenyi, P. Vankó, M. Vigh: Report on the 2022 Eötvös competition	
Cs. Sükösd: XXVI th National Leo Szilárd Physics Competition – Part 1	
BOOKS	
P. Surján: András Patkós: My purposeful wanderings – stories from the labyrinths of physics	

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:

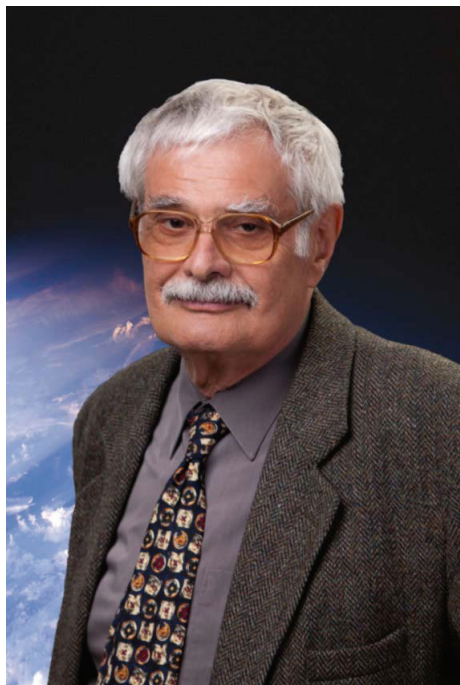


EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA



Nemzeti Kulturális Alap





SZEGŐ KÁROLY EMLÉKÉRE

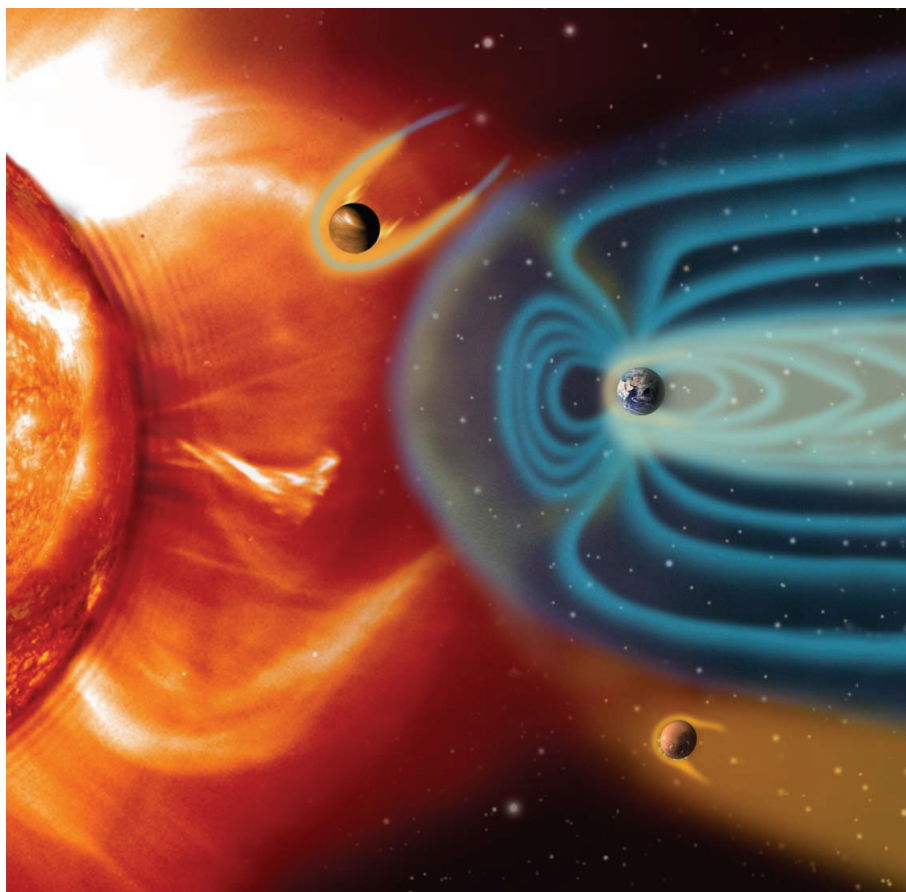
Szegő Károly (Budapest, 1943. augusztus 17. – Budapest, 2022. január 22.) a magyar űrkutatás kiemelkedő alakja, nemzetközi szinten elismert fizikus, űrkutató volt. Sokat tett azért, hogy magyar kutatók is részt vehessenek a Naprendszer kutatására küldött nemzetközi űrmissziókban. 1966-ban szerzett fizikus diplomát az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Kezdetben, elméleti részecskefizikusként, csoportelméleti módszerekkel foglalkozott az MTA Központi Fizikai Kutatóintézetében, kandidátusi értekezését 1972-ben védte meg. Az űrkutatás felé a 80-as években fordult a figyelme, amikor az Interkozmosz együttműködés keretében lehetőség nyílt a Halley-üstököshöz indított VEGA-űrmisszióban való részvételre, ahol az irányító testület társvezetője lett. Az MTA fizikai tudományok doktora címet 1987-ben szerezte meg, a napszél és a Naprendszer szilárd testeinek plazmakörnyezete közötti kölcsönhatások vizsgálata területén elért kimagasló eredményeinek összefoglalásával. A későbbiekben vezetésével magyar kutatók további komoly nemzetközi űrkutatói programokhoz is csatlakozhattak. Ezek közé tartozott például a Fobosz–2 (Interkozmosz), a SOHO (NASA/ESA), a Cluster (ESA), a Venus Express (ESA), a Cassini–Huygens (NASA/ESA/ASI), a Rosetta–Philae (ESA), a BepiColombo (ESA/JAXA) és a JUICE (ESA) űrmisszió is. Egyik kezdeményezője volt a Cassini–Huygens-misszió közösségéből a kétezres évek elején kifejlődő, űrkutatóhoz kapcsolódó európai tudományos együttműködésnek, az Europlanetnek; vezetője a 2005-ben induló első projekt egyik munkacsoportjának és szervezője a közösség első tudományos kongresszusának (European Planetary Science Congress, EPSC 1, Berlin, 2006). Több űrkutatóhoz kapcsolódó nemzetközi tudományos szervezet (COSPAR, IAA, Europlanet) vezetőségének volt aktív tagja. A KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetének (KFKI RMKI) igazgatói pozícióját 1975 és 2002 között töltötte be. Ebben az időszakban látványosan megerősödött az RMKI nemzetközi tevékenysége, köszönhetően egyrészt az előzőleg említett nemzetközi űrkutatói projekteknek; másrészt a részecskefizika, a magfizika és a plazmafizika kutatási területein működő fontos nemzetközi együttműködésekhez (például CERN, EURATOM) történt csatlakozások hatásának. 2002-től 2010-ig az MTA Kutatóintézeti Főosztálya, majd Kutatásfejlesztési és Innovációs Főosztálya vezetőjeként szervezte és támogatta az akadémiai kutatóhálózat munkáját. 1986 és 2003 között a Magyar Asztronautikai Társaság alelnöke, évtizedeken át, haláláig az MTA Csillagászati és Űrfizikai Tudományos Bizottság tagja volt. Oktatóként és témavezetőként is fontos szerepe volt a kutatói utánpótlás nevelésben. Nyugdíjba vonulása után, az RMKI Professzor Emeritusaként továbbra is részt vett az ELTE Doktori Iskola munkájában, mint az ELTE Professzor Emeritusa. Iskolateremtő munkássága sok hazai és külföldön dolgozó űrkutató karrierjét indította el, még többet segítette. Tudományos pályája során több mint 300 publikáció szerzője, illetve társszerzője volt. Számos díjban és elismerésben részesült, 1986-ban Állami Díjat kapott, 1989-ben Fonó Albert-díjjal, 1991-ben MTESZ-díjjal ismerték el tevékenységét. 2007-ben neki ítelték a rangos Bay Zoltán-díjat, 2008-ban MTA Pro Scientia Hungarica Éremmel tüntették ki, 2018-ban pedig az MTA Eötvös József-koszorúval ismerte el tudományos munkásságát.

A NAPRENDSZER ŰRSZONDÁS KUTATÁSA

– SZAKMAI BEVEZETŐ

A Naprendszert rendkívül változatos építőelemek alkotják, amelyek sokrétű és bonyolult kölcsönhatásban állnak egymással. Leglátványosabb állandó elemei természetesen a Nap és a nagybolygók, de a Nap körül keringő objektumok méretskálája az óriásbolygóktól kezdve, a kisbolygókon és üstökösmagokon keresztül egészen a nanométerű porszemcsékig terjed, minden köztes méretet felölelve. Valójában a bolygóközi tér még azon tartományai sem üresek, ahol éppen nem tartózkodik egyetlen porszemcse sem: bizonyos értelemben a Naprendszer minden ismert bolygója, még a legtávolabbi is, a Nap kiterjedt légkörében úszik. Helioszférának nevezzük azt a Naptól mintegy 100 csillagászati egység távolságig kiterjedő térrészt, amelyet a Nap légköre dominál. Ez a „légkör” nagyon különös. Először is plazmaállapotú, vagyis ionizált gáz, atommagok és elektronok keveréke. További

különlegessége, hogy a távoli naplégkör „szökésben van”; vagyis nincs álló, nyugalmi állapota, hanem a Naptól nagy sebességgel radiálisan kifelé áramlik. E meghatározó tulajdonsága miatt ezt a Naptól kiinduló, alacsony sűrűségű, magas hőmérsékletű plazmaáramlást napszélnek hívjuk. A napszél jellemzően 400-800 kilométert tesz meg másodpercenként (!), így sokszorosan szuperszonikus. Mint minden vezető közeg, a napszélplazma is kölcsönhatásba lép a mágneses térrel. Így hát a napszél nem csak anyagot szállít az égitestek és a csillagközi tér felé, de magába zárja és magával cipeli a Nap mágneses terét is. Tehát a bolygóközi teret áramló, mágnesezett plazma tölti ki. A kölcsönhatásokat tovább gazdagítja a Nap hősugárzása, továbbá a látható, az UV- és a röntgensugárzás, a napkitörésekből származó anyagkidobódások és nagy energiára felgyorsult töltött részecskék. Az égitestek részéről a kölcsönhatásban szerepet kap még a bolygók saját mágneses tere, az égitestekről származó gázok, illó anyagok és por is. Ebből a



1. ábra. Művészi elképzelés az űridőjárásról, a napszélről és néhány bolygó (Vénusz, Föld és Mars) magnetoszférájáról. Kép forrása: ESA.

komplexitásból az égre felnézve nem sokat láthatunk, de űrszondák segítségével tanulmányozni tudjuk a látható és láthatatlan Naprendszer rendkívül gazdag és dinamikus életét.

A napszél igen változékony, sebessége, nyomása, hőmérséklete, a benne szállított mágneses tér, lényegében minden tulajdonsága – a mérések számára elérhető összes idő- és méretskálán – fluktuációkat mutat. A változékonyságban felismerhetünk turbulens viselkedést, a Nap forgásából adódó visszatérő struktúrákat és a napkitörések okozta gyors lefolyású, rendszertelen, úgynevezett tranziens jelenségeket is. Mindezen változások esetenként nagyon jelentős hatást gyakorolnak a napszéllel kölcsönható égitestek környezetére, sőt néha még a felszínükre is. Ezen eseményeket és hatásait összefoglaló néven űridőjárásnak nevezzük.

Amikor a napszél egy mágnesezett bolygóval találkozik, a jó vezető napszélplazma és a bolygó mágneses terének kölcsönhatása nagyon jellegzetes struktúrát alakít ki a bolygó körül – ez a magnetoszféra. A

mágneses tér üreget képez a napszélben, amibe a Napból érkező plazma nem tud behatolni, hanem inkább körülötte áramlik. Hasonlóan a szuperszonikus repülő előtt kialakuló hanggrobbanáshoz, a magnetoszféra előtt is egy lökéshullám (fejhullám) helyezkedik el, ez teszi lehetővé, hogy a napszél eltérüljön, és kikerülje a magnetoszféra által képezett akadályt. A Nap felőli oldalon a napszél nyomása összesűríti a bolygó mágneses terét, míg az éjszakai oldalon hosszú csóva alakul ki, amit a bolygóról kiinduló, de a bolygóközi térbe hosszan elnyúló nyílt erővonalak töltenek ki. Az 1. ábra ezt a struktúrát mutatja a Föld környezetében.

Ha a napszél egy nem mágneses, de légkörrel burkolt bolygóval lép kölcsönhatásba, meglepően hasonló struktúra alakul ki, bár merőben eltérő okokból. A bolygó légkörében a napsugárzás ionizáló komponensei (UV, röntgen), illetve töltött részecskékkal való ütközések folytán kialakul egy viszonylag sűrű, ionizált és ezáltal vezető légréteg, az ionoszféra. A napszél által szállított mágneses erővonalak nem tudnak behatolni az ionoszféra vezető közegébe, emiatt a napszél körüláramolja az akadályt, a mágneses erővonalak feltorlódnak a nappali oldalon, és elnyúló csóvát alkotnak az éjszakain. Ez az indukált magnetoszféra (az 1. ábrán a Vénusz és a Mars körül).

Üstökösök esetén szintén az indukált magnetoszféra egy sajátos formája alakul ki. Az üstökös – a Naptól való távolsága függvényében – nagyon különböző módon viselkedő égi jelenség. Naptávolban csak egy viszonylag apró, bár jelentős illóanyag-tartalmú égitest. A napszéllel való kölcsönhatása ilyenkor igen hasonló a többi, légkör nélküli égitestéhez, amennyiben a napszél eléri a felszínt, és ott különös kémiai folyamatokat vált ki, illetve atomokat „üt ki” a felszínről. Amikor azonban egy üstökös elnyúlt pályája mentén napközbe ér, felszíne felmelegszik, illó anyagok és por

szabadulnak fel belőle, kialakítva a kómát, ami az üstökös – a magjánál sok ezerszer vagy akár milliószor nagyobb átmérőjű – poros légköre. A kóma kialakulásával válik az üstökös azzá a látványos égi jelenséggé, ami oly érdekessé tette a földi megfigyelők számára a történelem hajnala óta. A kómából megszökő port a napfény sugárnyomása lassanként egyre távolabbi Kepler-pályákra tereli – így épül fel a porcsóva. Az ionizálódó gáz és a napszél kölcsönhatása pedig egy indukált magnetoszférát alakít ki, aminek egyik látványos jele lehet a megfigyelhető ioncsóva (2. ábra).

A Naprendszerben található égitestek mérete, összetétele, mágnesezettsége roppant változatos, így remek lehetőséget nyújtanak a különböző típusú magnetoszférák és az ott jellemző kölcsönhatások tanulmányozására. Kutató űrszondáink már ellátogattak légkör nélküli, légkörrel körülvett, mágneses és nem mágneses égitestekhez, üstökösökhöz és óriásbolygókhoz is, hogy felfedezzék és megfigyeljék az ott zajló sokrétű, különlegesen egyedinek vagy éppen általános érvényűnek bizonyuló folyamatokat. A bolygók közül a Naphoz legközelebb keringő Merkúr rendelkezik eredendő mágneses térrel, de légköre nincs, tengely körüli forgása pedig nagyon lassú. A szemérmes Vénusznak jelentős szén-dioxid-alapú légköre van, de egyáltalán nincs saját mágneses tere. A Földnek erős mágneses tere van és sűrű légköre, míg kísérője a Hold nem mágneses és légköre sincs. A Mars ritka szén-dioxid-alapú légkörrel rendelkezik, és csupán kéregmágnesség található rajta foltokban. Két hold kíséri. A Jupiter óriási gázbolygó, erős mágneses térrel, számos érdekesebbnél érdekesebb holddal. Hasonló, de mégis egyedi a Szaturnusz, csodálatos gyűrűrendszerével és sok kísérőjével. Az üstökösök különleges környezetében pedig olyan jelenségek is tanulmányozhatók, amelyek sehol másutt nem fordulnak elő. A Naprendszer hatalmas és izgalmas labora-

2. ábra. A C/2020 F3 NEOWISE üstökös, fölül az ion-, míg lejjebb a porcsóva (fotó: Christian Koll).



tórium, kutatása számos érdekes felfedezéssel gazdagította már ismereteinket. Cikkgyűjteményünk ezen megfigyelésekből mutat be néhány érdekességet, kitérve a belső helioszféra sajátosságaira, az óriásbolygó-kutatás néhány érdekességére, illetve a légkör nélküli égitestek felszínén zajló különleges kémiai folyamatokra. Több cikkben taglaljuk az üstökös-kutatás eredményeit, illetve megtudhatunk majd néhány érdekességet az űrkutatási műszerekkel kapcsolatban is.

Németh Zoltán,
Opitz Andrea
Wigner FK

A BELSŐ HELIOSZFÉRA KUTATÁSA

Opitz Andrea – Wigner FK

Madár Ákos – Wigner FK és ELTE Fizika Doktori Iskola

A Nap közvetlen környezetének tanulmányozása, a napszél kialakulásának kutatása és a belső bolygók űridőjárásának vizsgálata rendkívül aktuális témák az utóbbi évtizedek űrszondás adatbőségének köszönhetően. A belső helioszféra plazmafolyamatainak tanulmányozása a napszél által kitöltött tér azon részének kutatása, amely a Naptól egészen a Mars pályájáig terjed. A Naprendszer ezen tartományának vizsgálata rendkívül változatos jelenségek tanulmányozását teszi lehetővé: a fiatal napszél mellett annak különböző bolygókkal való kölcsönhatását kutathatjuk. A számos űrszondával végzett megfigyelések és a rájuk épülő modellek segítik a plazmafolyamatok megértését.

Csillagunk titkai

A belső helioszféra működésének megértéséhez néhány szót kell ejtenünk a Nap szerkezetéről. Központi csillagunk belsejét jó közelítéssel koncentrikus gömbhéjakból állónak feltételezhetjük. A Nap sugárának 20%-áig ($0,2 R_{\odot}$) terjedő legbelső régió a *mag*, amely a teljes égitest tömegének körülbelül 34%-át, míg térfogatának csupán 1%-át teszi ki. A mag 15 millió K hőmérsékletű, ami a nagy nyomással együtt lehetővé teszi a hidrogénatommagok héliummá történő fúzióját. Ezt a magot a *radiatív* vagy *sugárzási zóna* veszi körül ($0,2\text{--}0,7 R_{\odot}$). Itt a magban keletkezett nagy energiájú fotonok a töltött részecskékkel való rugalmatlan ütközéseken keresztül veszítenek energiájukból, az energiaszállítás domináns módja a radiatív diffúzió. A sugárzás számára a radiatív zóna rendkívül átlátszatlan, egy foton karakterisztikus tartózkodási ideje nagyságrendileg 100 000 év! A radiatív zónán kívül helyezkedik el a *konvektív zóna*. Ez a

réteg a konvekcióra nézve instabil, a radiatív energia-transzfer helyett az anyagáramlás lesz az energia szállításának domináns módja. A radiatív és a konvekciós zóna közötti tartomány a vékony *tachoklína*. A konvekciós zóna felett helyezkedik el a *fotoszféra*, amely a definíció szerint a Nap azon rétege, ahonnan a látható fény érkezik. Ennek vastagsága néhány száz kilométer, felső határán található a Nap hőmérsékleti minimuma (4200 K). A fotoszféra felett található a *kromoszféra*, körülbelül 500–3000 km magasságig. A hőmérséklet 25 000 K-ig nő a fotoszférától távolodva, tehát itt hőmérsékleti inverzió lép fel. A hőmérséklet növekedése kifelé folytatódik, így a Nap külső „légköre”, a *korona* hőmérséklete már meghaladhatja az 1 millió K-t is.

A Nap számos megfejtésre váró talánya közül is kiemelkedik az a kérdés, hogy miért olyan magas a napkorona hőmérséklete. A napszél folyamatos „szökésének” oka éppen ez, hiszen a magas hőmérséklet-hez tartozó nagy részecskesebbségek elegendők ahhoz, hogy legyőzzék a Nap gravitációs hatását. Ez a hőmérsékleti anomália már csaknem egy évszázada foglalkoztatja a kutatókat, ám megválaszolása továbbra is várat magára. Bár az igen valószínű, hogy a korona fűtéséhez az energiát a Nap mágneses tere biztosítja, viszont a pontos mechanizmus (esetleg mechanizmusok), amelynek során ez az energia a részecskék kinetikus energiájává alakul, egyelőre tisztázatlan.

Hasonlóan fontos lenne megérteni, hogyan is működik a Nap „dinamója”, amely központi csillagunk mágneses teréért, így közvetetten a napszél keletkezéséért és az űridőjárást befolyásoló jelenségek kialakulásáért is felelős. Az eddig is tudvalevő volt, hogy a nagyskálás mágneses mező létrejöttét a konvektív zónában, illetve annak alsó határán, a tachoklínában létrejövő igen bonyolult plazmaáramlások okozzák. Az viszont jelenleg is nyitott kérdés, hogy emellett milyen arányban lehetnek jelen kisebb, lokális dinamóeffektusok. Szintén kérdéses még,

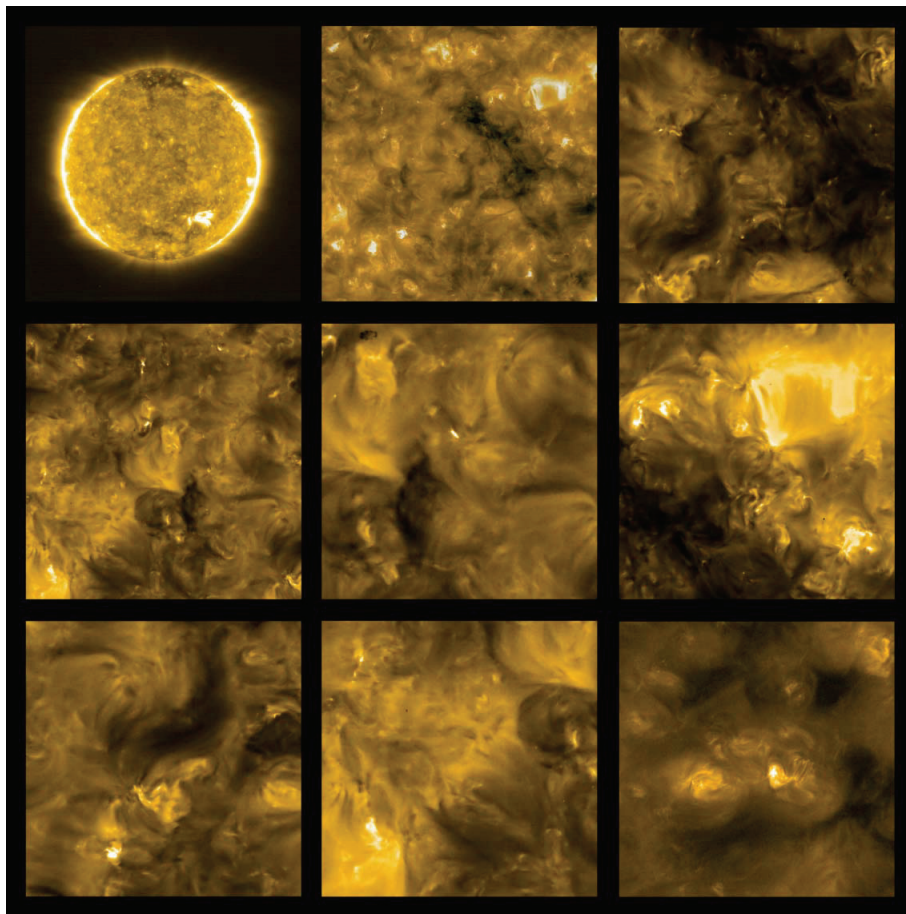
A szerzők hálásak az űrszondákat és műszereiket üzemeltető csoportoknak a kutatásaikhoz használt mérési adatok szolgáltatásáért: Parker Solar Probe, Solar Orbiter, STEREO, ACE, BepiColombo, VEX és MEX. Kutatásainkat az NKFIH/OTKA FK128548 számú, *Belső helioszféra* című projekt támogatta.



Opitz Andrea űrkutató és csillagász, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. Svájcban doktorált, Franciaországban volt posztdoktori ösztöndíjas, majd utána az ESTEC-ben, az Európai Űrügynökség (ESA) hollandiai központjában dolgozott. A napszélstruktúrákat kutatja, valamint azok hatását vizsgálja a Naprendszer különböző égitestjeire.



Madár Ákos űrkutató-geofizikus, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos segédmunkatársa, illetve az ELTE Fizikai Doktori iskola végzős doktorandusza. A napközeli térséget kutatja űrszondás mérések alapján, a fiatal napszélbeli struktúrák és a plazmaturbulencia érdekli.



1. ábra. Az első perihélium alatt az Extreme-Ultraviolet Imager műszer által 174 Å hullámhosszon készített felvételek a Nap felszínéről és a *tábornüzekekről* (Forrás: ESA) [22].

hogy a sarkok felé miként történik a mágneses fluxus transzportja.

Ezekre a kérdésekre is keresi a választ a napfizika jelenlegi két „szupersztárja”: a NASA Parker Solar Probe [1] és az ESA Solar Orbiter [2] missziói. Az előbbi űrszonda minden eddiginél közelebb merészkedik a Naphoz, csupán 9 napsugárnyi távolságra megközelítve azt (összehasonlításképp a Föld Naptól való távolsága hozzávetőlegesen 215 $R_{\odot}$). Az utóbbi napszondának pedig bár távolabbi lesz a napközelsége (körülbelül 70 $R_{\odot}$), a pályája a küldetés végére több mint 34°-ot zár majd be a Nap egyenlítői síkjával. Ez lehetővé fogja tenni, hogy a belső helioszféra eddig felfedezetlen vidékein, magasabb szélességeken is végezzünk *in situ* napszélplazma- és mágnesestér-méréseket, valamint optikai megfigyeléseket.

Mind a Parker Solar Probe, mind a Solar Orbiter végez *in situ* megfigyeléseket a napszél tulajdonságainak feltérképezésére, ezek a mérések jellemzően a plazma különböző paramétereinek (sebesség, sűrűség és hőmérséklet), illetve a mágneses tér meghatározására irányulnak. A Solar Orbiter küldetésben a Wigner Fizikai Kutatóközpont Űrfizikai és Űrtechnikai Osztálya is aktívan részt vesz, a flux-gate magnetométere építéséből mérnökeink is kivették a részüket [3].

Fontos különbség a Parker-napszondától, hogy a Solar Orbiter az *in situ* méréseken felül a Nap felszínét 6 távérzékelési műszerrel is megfigyeli az elektromágneses spektrum széles skáláján (láttható, ultraibolya- és röntgentartományban). Így a két küldetés remekül kiegészíti egymást, tudományos céljaik igen hasonlóak. A kutatók a fent vázolt nap- és helioszférafizikai kérdésekre keresnek válaszokat.

A Solar Orbiter misszió első izgalmas eredményét az első napközelsége idején szállította a tudományos közösségnek. Jelentős mennyiségű tábornüzeke elnevezett felfényesedést fedezett fel a Nap kromoszférájának felső részében, illetve a kromoszféra és a korona közt elhelyezkedő átmeneti zónában. Ezek a felfényesedések a nyugodt napfelszínen az extrém ultraibolya (EUV) tartományban láthatók (1. ábra). Létezésük nem teljesen új

fejlemény, de olyan mérettartományban vannak, hogy a korábbi kisebb felbontású mérési adatokban könnyen el lehetett siklani felettük, ami a Solar Orbiter szonda Extreme-Ultraviolet Imager (EUI) műszerénél már nem jelent problémát. A jelenlegi hipotézis az, hogy ezek úgynevezett pikoflerek, amelyek a klasszikus flerekhez képest mintegy 12 nagyságrenddel kisebb energiatartalommal járnak, viszont jóval több van belőlük, mint a nagyobb energiás társaikból. Nagyobb rokonaikhoz hasonlóan bennük is mágneses energia szabadul fel, amelynek egy része elektromágneses hullámokká, másik része pedig a plazma részecskéinek energiájává alakul. A Solar Orbiter szonda által szolgáltatott adatokban a meglepetést az okozta, hogy sokkal több ilyen eseményt találtak az EUV-felvételeken, mint ahogy a kutatók várták. A másik érdekesség annak kimutatása, hogy ezek az események a kromoszféra mágneses hálózatainak mentén lelhetők fel [4].

A fiatal napszél

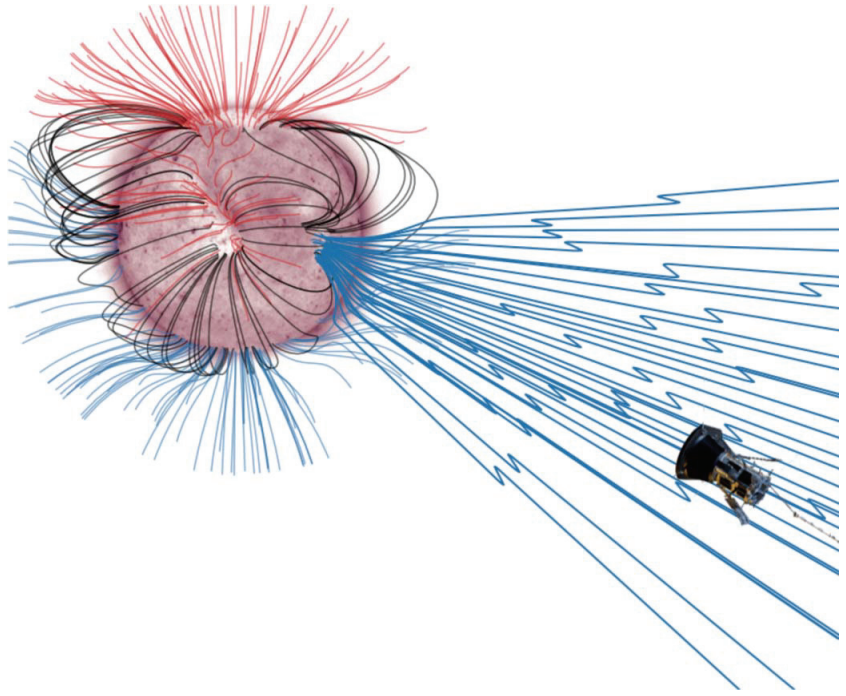
A Parker-szonda új eredményei közül a legjelentősebb, hogy belépett a Nap koronájába és ott *in situ* méréseket végzett. A korona határát a kritikus Alfven-

ponttal szokták jellemezni: ez az a pont (illetve a napkorona esetében bonyolult felület), amelyen belül a plazma a mágneses mező által dominált. Úgy is fogalmazhatunk, hogy ezen a felületen belül a mágneses mező erővonalai határozzák meg a plazma mozgását, míg ezen kívül a plazma „sodorja” magával a mágneses erővonalakat. Az első ilyen regisztrált áthaladásokra 2021 tavaszán került sor, ekkor a Parker-űrszonda három alkalommal is a korona határán belül tartózkodott. Figyelemre méltó, hogy az adatok tanúsága szerint a korona és az interplanetáris napszél közötti átmenet éles, a koronába lépve a plazmasűrűség hirtelen és erősen lecsökken. A kutatók meghatározták az Alfvén-felületen való áthaladások során mért napszél forrását, egy potenciáltér-közelítést alkalmazó modell szerint ez a struktúra (úgynevezett pszeudo-streamer) két mágneses hurokból áll, és azonos polaritású koronalyukakat köt össze. Jelenleg a napaktivitási maximum felé tartunk és a Parker-űrszonda egyre közelebb kerül a Naphoz, így azt várjuk, hogy a szonda még többször és hosszabban fog megfigyeléseket végezni a napkoronában, ami számos fontos tudományos eredmény lehetőségével kecsegtet [5].

Szintén nagy visszhangot váltott ki az angol szaknyelvben *magnetic switchback* néven ismert cikcakkalakú mágneses struktúrák gyakori észlelése a Parker-űrszonda napközeli napszéladataiban [6]. Ezek jellemzője, hogy a rajtuk történő áthaladásokor az űrszonda a domináns mágneses irány gyors megfordulását, illetve a napszél sebességének megnövekedését észleli (2. ábra). Jelentőségük abban áll, hogy befolyásolhatják a napszél turbulens folyamatait, valamint hozzájárulhatnak annak fűtéséhez. Keltkezésük nem teljesen tisztázott, erre esélyes jelölt lehet a mágneses erővonalak átkötődése (rekonnekció), de szóba jöhet a plazmahullám, illetve különböző sebességű napszéláramlások kölcsönhatása is mint kiváltó ok.

A napszél hatása a belső bolygók plazmakörnyezetére

A belső bolygók (Merkúr, Vénusz, Föld és Mars) plazmakörnyezete igen változatos a különböző paramétereik (pálya, a forgástengely dőlése, összetétel, mágnesség stb.) miatt, így a napszéllel való kölcsönhatásuk vizsgálata rendkívül izgalmas. Számos űrszondás



2. ábra. Illusztráció a Parker-űrszonda által mért *magnetic switchback* eseményekhez. A kék vonalak a napszél által kisodort mágneses mező erővonalait jelzik. Látható, hogy ennek iránya időnként hirtelen megváltozik, a cikcakkyszerű struktúrák neve switchback [6].

küldetés segíti ezen kutatásokat, a napszondák mellett fontos bolygókutató szondák is ontják az adatokat. A tudományos közösség minden olyan alkalmat igyekszik kihasználni, amikor több űrszonda végez szimultán méréseket. A többpontos mérések rendkívül fontosak az űrkutatásban, hiszen csak általuk lehetséges a jelenségek idő- és térbeli tulajdonságainak elkülönítése.

Jelenleg az ESA/JAXA BepiColombo [7] misszió (2018–) plazmaméréseket végez a belső helioszférában, mielőtt pályára áll a Merkúr körül [8]. Számos együttműködési lehetőség van [9] a már említett Parker Solar Probe, Solar Orbiter, BepiColombo-missziók, valamint több, hosszabb ideje szolgálatban lévő napszonda között, mint például a STEREO-A [10], WIND [11], illetve az ACE [12]. A 2025-ben esedékes Merkúr körüli pályára állása után a BepiColombo két keringőegysége (az európai vezetésű Mercury Planetary Orbiter és a japánok által koordinált Mercury Magnetospheric Orbiter) a bolygó plazmakörnyezetét, valamint felszínét fogja tanulmányozni [13]. A korábbi űrszondás megfigyelések (az amerikai Mariner-10 és MESSENGER-missziók) alapján a kutatók megállapították, hogy a bolygó felszíne becsapódási kráterekkel erősen tarkított, illetve egykori vulkáni aktivitás jelei is látszanak a felvételeken. Kis tömegének és környezete magas hőmérsékletének köszönhetően a Merkúrnak nincs stabil légköre, csupán exoszféra van. A Vénusszal ellentétben a Merkúr saját globális mágneses mezővel rendelkezik, így – akárcsak a Föld esetében – kialakul egy magnetoszféra, valamint a Nap felőli oldalon

egy fejhullám, ahol a napszél hirtelen lelassul. A Földhöz képest kisebb mágneses térerősség miatt a napszél nagyobb energiájú részecskéi feltehetően elérhetik a felszínt is, erodálva azt. A bolygó felszínéről elszökő részecskék csóvát alkotnak a Nappal áttellenes oldalon, ez a csóva akár 2000 Merkúr-sugárig is kiterjedhet.

Az ESA Venus Express (VEX) küldetése 2006 és 2014 között vizsgálta a Vénusz plazmakörnyezetét és légkörét. Az elnyúlt elliptikus pályán történő keringés folyamán az űrszonda naponta egyszer eltávolodott a Vénusztól, és kilépett a háborítatlan napszélbe, majd visszatért a bolygóhoz, és a mélyebb plazmakörnyezetét figyelte meg.

A Vénusz érdekessége, hogy a belső mágneses tér hiánya miatt az ionok relatíve szabadon reagálhatnak a plazmanyomás gradiensére, így a napos oldalon lévő fotoionizációs forrásból származó ionok az éjsz-

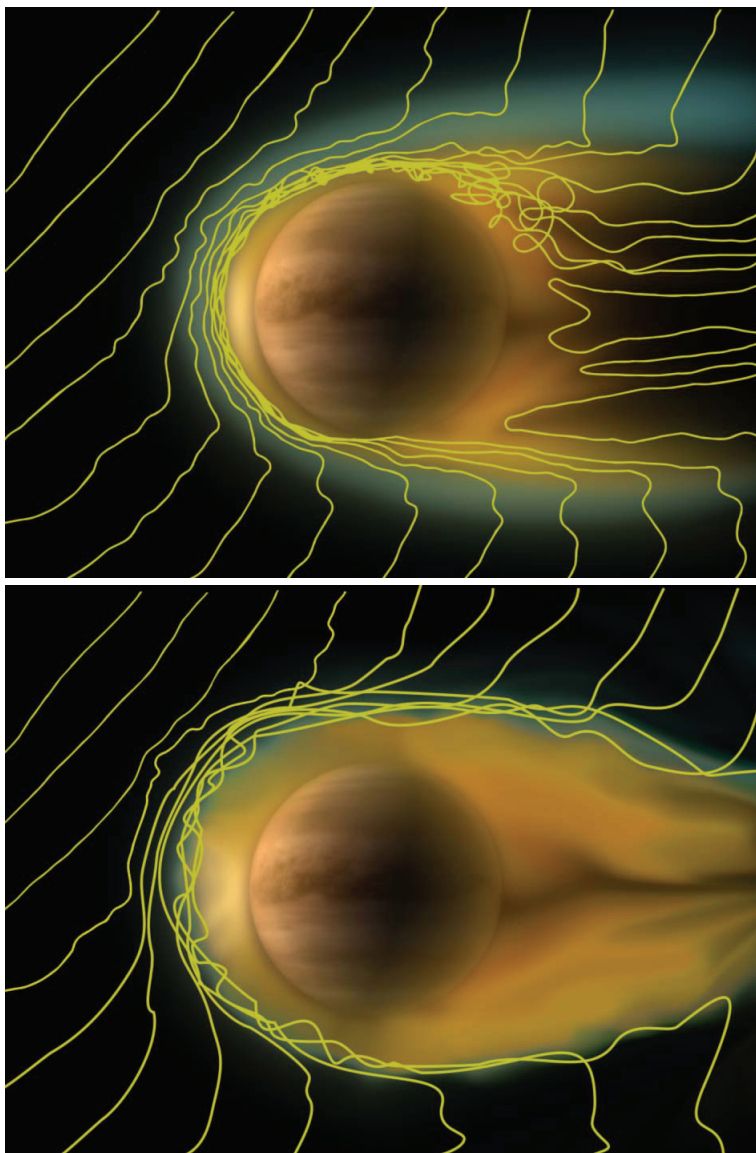
kai oldal felé áramolhatnak [14, illetve a benne található hivatkozások]. A VEX-misszió egyik érdekes eredménye volt a rendkívül alacsony napszélnyomás miatt kialakult cseppszerű ionoszféra kimutatása [15]. A nyomásesés miatt az ionoszféra nagyobb magasságokra is kiterjedt, mint a szokásos 150-300 km, és a terminátor (a nappal és az éjszaka határvonala) feletti indukált mágnesség a megszokottnál még gyengébb volt. Ezért az éjszakai oldal felé történő ionáramlás – bár lassabb – mégis sokkal szabadabb volt, ami a Vénusz Nappal ellentétes oldalán rendkívül kiterjedt éjszakai ionoszférát eredményezett, az üstökösökre hasonlító ioncsóva (3. ábra) az éjszakai oldalon 15 000 km-re elnyúlt [16].

A Vénuszra ható másik extrémum, amikor a napkitörésekből származó koronaanyag-kidobódások (Interplanetary Coronal Mass Ejections) érik el és átrendezik plazmakörnyezetét. Hatásukat *Vech* és munkatársai [17] szisztematikusan vizsgálták a VEX-űrszonda plazma- és mágneses méréseinek segítségével. Azt találták, hogy ICME-k idején az indukált mágneses tér megnő, a bolygó előtti lökéshullám nagyon eltávolodik, és az éjszakai magnetoszféra magassága csökken.

A Mars környezetét egyszerre több szonda is vizsgálja. Az ESA MEX (2004–) küldetés már 20 éve végez megfigyeléseket a vörös bolygónál. Napi négyszer kerül meg a bolygót és minden keringés során kimegy a napszélbe, majd vissza a Mars indukált magnetoszférájába. A NASA MAVEN (2013–) szondája többnyire közelebb van a bolygóhoz, de remekül kombinálhatók az indukált magnetoszférában végzett mérései a MEX napszél-megfigyeléseivel.

A marsi magnetoszféra érdekessége, hogy bár eredendő mágneses tere (már) nincs, foltokban kéregmágnességet figyeltek meg rajta. Ennek hatása jól látható a bolygó ionoszféráján, de például az auróra megjelenési helyét is részben befolyásolja. A földi sarki fénnel ellentétben a Marson bármely szélességen megjelenhet a légkörbe érkező nagy energiájú részecskék hatására létrejövő fényjelenség. A Mars napszél által indukált magnetoszférája természetesen rendkívüli mértékben függ a napszél jellemzőitől, a bolygóközi mágneses tér iránya határozza meg a bolygó magnetoszférájának dőlését és irányát, így egy egyszerű helioszférikus áramlepel-átmenet (amely a bolygóközi mágneses tér irányváltásával jár) is teljesen átrendezi a Mars plazmakörnyezetét (ez igaz a Vénusznál is). További érde-

3. ábra. A Vénusz ionoszférája átlagos (föül) és rendkívül alacsony (alul) sűrűségű napszél idején [16].



kesség, hogy *Lilensten* és munkatársai [18] a Földön domináns zöld és piros mellett – a szén-dioxid alapú légkörnek köszönhetően – kék színű aurórát is jósltak.

A belső bolygók összehasonlítása igen érdekes eredményeket ad. A nem mágneses Vénusz és a gyengén (csupán foltokban) mágnesezett Mars plazmakörnyezete meglepően sok hasonlóságot mutat [19]. Mindkettő indukált magnetoszférával rendelkezik, és térerősségük összevethető, a plazmafolyamatok hasonlóak. Természetesen vannak különbségek is, hiszen a két bolygó különböző távolságra van a Naptól, méretük és légkörük kiterjedése is más. A két bolygó helioszférikus (radiális vagy Parker-spirál menti) együttállásaira külön megfigyelési és adatelemzési kampányokat indítanak. Mivel mindkettőjük plazmakörnyezete erősen függ az őket elérő napszél tulajdonságaitól, ezért, ha ugyanaz a napszélcsomag vagy -struktúra találkozik először a Vénusszal, majd néhány nap múlva a Marssal, az remekül látszik a két bolygónál történt mérésekben.

Mivel mind a VEX-, mind a MEX-szonda rendszeresen volt a háborítatlan napszélben is, ezért ezen időszakok méréseit napszélkutatásra is tudjuk használni. A két különböző naptávolságban (Vénusz és Mars pályája) végzett megfigyelések összevetésével a napszélstruktúrák radiális fejlődését vizsgálhatjuk. Ezen kutatás eredményei a bolygó űridőjárásának vizsgálatához nyújtanak remek segítséget, javítják a napszél-előrejelzéseket. Az egyszerű ballisztikus napszél-propagációtól [20] a komplex MHD-szimulációig sok próbálkozás van egy adott pontban történt mérés alapján egy másik pontba való extrapolációra. Léteznek komoly web-szolgáltatások is ezen kutatások támogatására, például az Europlanet Planetary Space Weather Services kiterjesztése, az Europlanet SPIDER szolgáltatás is már elérhető [21].

Összefoglalás

Rendkívül érdekes időszakban élünk, a napközeli szondák és a számos bolygókutató küldetés igen gazdag adatbázist adnak elemzéseinkhez. Kutathatjuk a fiatal napszelet, a napszél és koronaanyag-kidobódások bolygóközi térben való terjedését, valamint ezek hatását a különböző égitestekre. Az itt nyert adatok segítségével kiválóan vizsgálhatók a bolygók plazmakörnyezetét meghatározó alapvető fizikai folyamatok.

Mivel az űridőjárási jelenségek elsődleges forrása a Nap, minden napszéleredetű hatás a belső helioszférán keresztül érkezik a Földre és a többi égitestre. Így a földi infrastruktúrát – közvetve életünket és a társadalmat is – befolyásolni képes űridőjárási események megértése és előrejelzése lehetetlen lenne a belső helioszféra alapos tanulmányozása nélkül.

Irodalom

1. Fox N. J., Velli M. C., Bale S. D., Decker R., Driesman A., Howard R. A., ..., Szabo A.: The solar probe plus mission: humanity's first visit to our star. *Space Science Reviews* 204 (2016) 7–48.
2. Müller D., Cyr O. S., Zouganelis I., Gilbert H. R., Marsden R., Nieves-Chinchilla T., ..., Williams D.: The solar orbiter mission-science overview. *Astronomy & Astrophysics* 642 (2020) A1.
3. Madár Á., Opitz A., Szalai S., Kecskeméty K., Dósa M., Erdős G., Tróznai G.: A Solar Orbiter napszonda Frey Sándor (szerk.) Űrtan Évkönyv 2020: Az Asztronautikai Tájékoztató 72. száma, Budapest, Magyarország: Magyar Asztronautikai Társaság (2021), 87–104.
4. Berghmans D. et al.: Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI. *Astronomy & Astrophysics* 656 (2021) L4.
5. Kasper J. C. et al.: Parker solar probe enters the magnetically dominated solar corona. *Physical Review Letters* 127/25 (2021) 255101.
6. Bale S. D., Badman S. T., Bonnell J. W., Bowen T. A., Burgess D., Case A. W., ..., Wygant J. R.: Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole. *Nature* 576/7786 (2019) 237–242.
7. Milillo A. et al.: Investigating Mercury's environment with the two-spacecraft BepiColombo mission. *Space Science Reviews* 216 (2020) 1–78.
8. Mangano V., Dósa M., Fränz M., Milillo A., Oliveira J. S., Lee Y. J., ..., Baumjohann W.: BepiColombo science investigations during cruise and flybys at the Earth, Venus and Mercury. *Space Science Reviews* 217 (2021) 1–81.
9. Hadid L. Z., Génot V., Aizawa S., Milillo A., Zender J., Murakami G., ..., Walsh A.: BepiColombo's cruise phase: Unique opportunity for synergistic observations. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 8 (2021) 718024.
10. Kaiser M. L., Kucera T. A., Davila J. M., St. Cyr O. C.: The STEREO mission: an introduction. *Space Sci. Rev.* 136 (2008) 5–16.
11. Acuña M. H. et al.: The global geospace science program and its investigations. *Space Science Reviews* 71 (1995) 5–21.
12. Chiu M. C. et al.: ACE spacecraft. *Space Science Reviews* 86 (1998) 257–284.
13. Bebesi Zs. et al.: A BepiColombo űrmisszió mérföldkövei és tudományos célkitűzései a Merkúr bolygónál. *Fizikai Szemle* 70/7–8 (2020) 236–244.
14. Opitz A., Forczek B.: A rejtélyes Vénusz. *Fizikai Szemle* 68/4 (2018) 115–118.
15. Wei et al.: A teardrop-shaped ionosphere at Venus in tenuous solar wind. *Planetary and Space Science* 73 (2012) 254–261.
16. <https://sci.esa.int/web/venus-express/-/51323-the-ionosphere-of-venus-under-different-solar-wind-conditions>
17. Vech D. et al.: Space weather effects on the bow shock, the magnetic barrier, and the ion composition boundary at Venus. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120 (2015) 4613–4627.
18. Lilensten J., Bernard D., Barthélemy M., Gronoff G., Wedlund C. S., Opitz A.: Prediction of blue, red and green aurorae at Mars. *Planetary and Space Science* 115 (2015) 48–56.
19. ISSI / Europlanet könyv (Springer): The plasma environment of Venus, Mars, and Titan. Szerk. Szegő Károly, Space Sciences Series of ISSI (2011).
20. Opitz A., Fedorov A., Wurz P., Szego K., Sauvaud J.-A., Karrer R., Galvin A. B., Barabash S., Ipavich F.: Solar-wind bulk velocity throughout the inner heliosphere from multi-spacecraft measurements. *Solar Physics* 264 (2010) 377.
21. <http://spider-europlanet.irap.omp.eu/>
22. <https://sci.esa.int/web/solarorbiter/-/solar-orbiter-s-first-images-reveal-campfires-on-the-sun>

A SZATURNUSZ ÉS PLAZMAKÖRNYEZETÉNEK VIZSGÁLATA – RÉSZVÉTEL A CASSINI–HUYGENS-ŰRMISSZIÓBAN

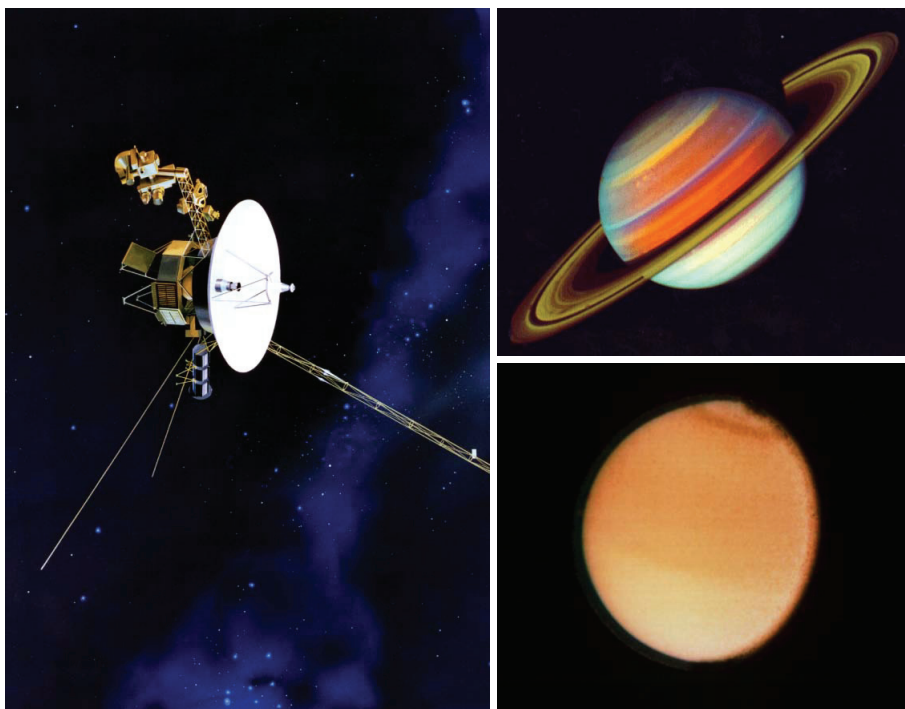
Bebesi Zsófia

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály

A külső Naprendszer felfedezése a NASA által létrehozott, 1972 márciusában útjára indított Pioneer-10 és az 1973 áprilisában felbocsátott Pioneer-11 űrmissziókkal vette kezdetét. A Szaturnuszt és holdjait elsőként (1979-ben) a Pioneer-11 közelítette meg. Az azt követő években – a Naprendszerből szintén kifelé tartó Voyager-1 és -2 űrszondák is elhaladtak a bolygó közelében (1980 novemberében, illetve 1981 júniusában), és számos érdekes felfedezésük a kutatókat egy önálló, célirányos, komplett új űrmisszió létrehozására ösztönözték. Ekkor született meg a Szaturnusz és elsősorban a Titan hold felkutatására tervezett Cassini–Huygens-szondapár gondolata, amelyet a kutatók és mérnökök nemzetközi csoportjának több mint egy évtizedes összefogása eredményeként valósítottak meg. Szegő Károly és az – akkor még – Központi Fizikai Kutatóintézet Részecske- és Magfizikai Kutatóintézete Kozmikus Fizikai Főosztályán dolgozó kutatók, valamint az intézet mérnökei a kezdetektől fogva aktívan részt vett a Cassini–Huygens nemzetközi csapatának munkájában.

A Cassini–Huygens-űrmisszió

A Voyager-1 és -2 űrszondák széleskörű plazmafizikai és spektroszkópiai vizsgálatokat végeztek a Szaturnusz és holdjainak környezetében, valamint számos rendha-



1. ábra. A Voyager-2 felvétele a Szaturnusról és a Titan holdról 1981-ben. Forrás: NASA.

gyó felvétel is készült (1. ábra). A Szaturnusznál töltött rövid idő alatt is olyan izgalmas új célpontokat vizsgálhattak, mint például a bolygó mágneses tere, bonyolult gyűrűrendszere vagy a Titan hold. A Titan az egyetlen olyan hold Naprendszerünkben, amelynek a Földhöz hasonlóan kiterjedt, főként nitrogénből álló atmoszférája van. A Titan atmoszférájában található nitrogén a metánnal elegyítve a napsugárzás hatására komplex szerves vegyületeket alkothat, amelyek vizsgálata a földi élet kialakulásának tanulmányozásához döntő bizonyítékokkal szolgálhat. Többek között ezek a fontos felfedezések arra ösztönözték a kutatókat, hogy további vizsgálatokat végezzenek, megszületett tehát egy Szaturnusz–Titan-űrmisszió ötlete.

A Cassini–Huygens-űrmisszió tervezése és kivitelezése több mint egy évtizeddel az indítást megelőzően, a 80-as évek első felében vette kezdetét, a magyar részvétel elsősorban Szegő Károly szervezőmunkájának köszönhetően vált lehetségessé. A mérnökcsoport Szalai Sándor vezetésével a Cassini keringő egység két fedélzeti műszeréhez, a plazmaspektrométerhez (CAPS), valamint a magnetométerhez (MAG) készített földi ellenőrző és kalibráló berendezéseket, valamint egy adattömörítő algoritmussal is hozzájárultak az űrmisszióhoz. A földi ellenőrző berendezések-



Bebesi Zsófia okleveles csillagász (2003) és fizikus (2005) – Szegedi Tudományegyetem, Ph.D. (2008, ELTE). 2003 óta az MTA KFKI RMKI munkatársa, 2012-től a Wigner FK Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának tudományos főmunkatársa. Elemezte a Cassini és a Venus Express űrszondák adatait. Kutatói érdeklődése a bolygók mágneses tere és a napszél, illetve az interplanetáris mágneses tér közötti kölcsönhatás, a Titán plazmakörnyezetének és felső atmoszférája ionizációs folyamatainak vizsgálata.



2. ábra. A Cassini–Huygens-szondapár a szerelőcsarnokban (balra) és jobbra az indítás pillanataiban (forrás: NASA, ESA).

kel tesztelni lehetett a CAPS- és a MAG-műszerek információküldő és -fogadó képességét. A CAPS-műszer társkutatója Szegő Károly, a magnetométeré pedig Erdős Géza lett, a két berendezés műszaki paramétereiről és működési elvükről Szalai Sándor és Nagy János cikkében olvashatnak részletesebben.

A Cassini–Huygens-szondapár létrehozásában a NASA (National Aeronautics and Space Administration), az ESA (European Space Agency), valamint az ASI (Agenzia Spaziale Italiana) űrügynökségek irányítása alatt, Magyarországgal együtt összesen 17 ország vett részt. A Cassini–Huygens-szondát valójában két űreszköz, a Cassini keringőegység (NASA) és a Huygens leszállóegység (ESA) alkotta. Ez utóbbit arra tervezték, hogy történelmünk során elsőként landoljon a Szaturnusz több szempontból is különleges óriásholdján, a Titanon, amit végül 2005. január 14-én sikeresen végre is hajtott.

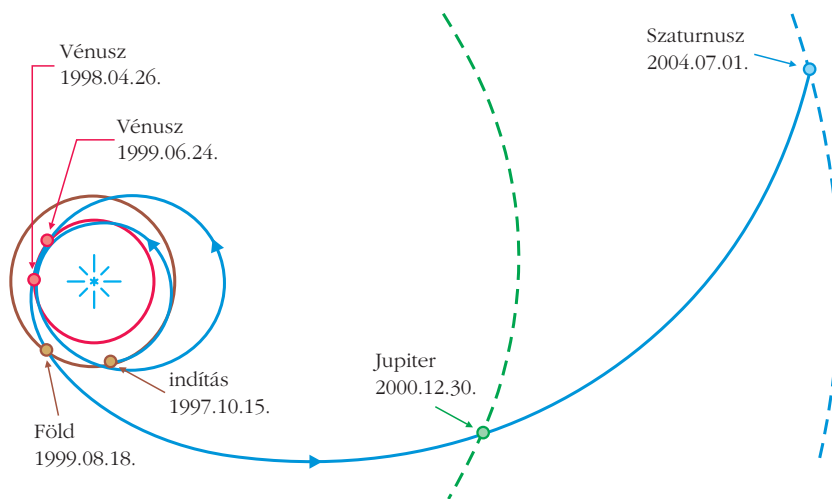
A Cassini–Huygens-szondapárt (2. ábrán balra) összesen 27 különféle tudományos vizsgálat kivitelezésére tervezték. A célok megvalósításához 18 fedélzeti műszert hoztak létre, közülük tizenkettőt a Cassini keringőegységen, hatot pedig a Titanra leszálló Huygensen helyeztek el. A 6,8 méter magas Cassini-egység tömege (a mintegy három tonna üzemanyag nélkül) 2150 kg, az 1,3 méter magas Huygens-szonda tömege pedig 320 kg volt. A három tonnányi folyékony üzemanyagot pályakorrekciókra, a Szaturnusz körüli pályára állításra, valamint a bolygó körüli manőverekre használták el, a szonda működéséhez, stabilizálásához szükséges energiát pedig három radioizotópos termoelektromos generátor (RTG) szolgáltatta. A Cassini fedélzeti műszerei két nagyobb csoportba sorolhatók: távérzékelők, valamint a tér- és részecskedetektorok. A távérzékelők közé tartoznak az optikai (képalkotó alrendszer; 380–1100 nm), az ultra-

ibolya (UVIS; 55–190 nm), az infravörös (CIRS; 7–1000 μm) kamerák és spektrométerek, illetve a radarberendezés. A tereket, valamint a részecskék sebesség- és energiaeloszlását, töltését és sűrűségét pedig a szonda közvetlen környezetében *in situ* mérték az érzékelők. A napszél és a Szaturnusz mágneses terében áramló, nagy energiájú semleges és töltött részecskék irány- és energiaeloszlását a magnetoszférikus képalkotó berendezés (MIMI; 15 keV – 130 MeV) és a tömegspektrométerek (CAPS; 1 eV – 50 keV, INMS; 0,01–100 eV) detektálták. A plazmakörnyezetre a telemetria vivőhullámainak módosulásából (Radio Science) is következtetni lehetett.

A Cassini–Huygens-szondapárt 1997. október 15-én indították útjára (2. ábrán jobbra) az amerikai Kennedy Űrközpontból (Cape Canaveral). Ezután a majdnem hét évig tartó bolygóközi utazását követően, több bolygónál végrehajtott gravitációs hintamanőver segítségével (3. ábrán fölül), 2004. július elsején állt pályára a Szaturnusz körül (3. ábrán alul). A pályára állítás során áthaladt a magnetoszférikus határfelületeken, a magnetoszféra belső tartományain, sőt a gyűrűrendszeren is. A manőver a sebesség drasztikus lecsökkentésére is irányult, hogy a pályára állítást sikeresen lehessen megvalósítani.

A Cassini–Huygens pályára állítása és a magnetoszférikus plazma vizsgálata

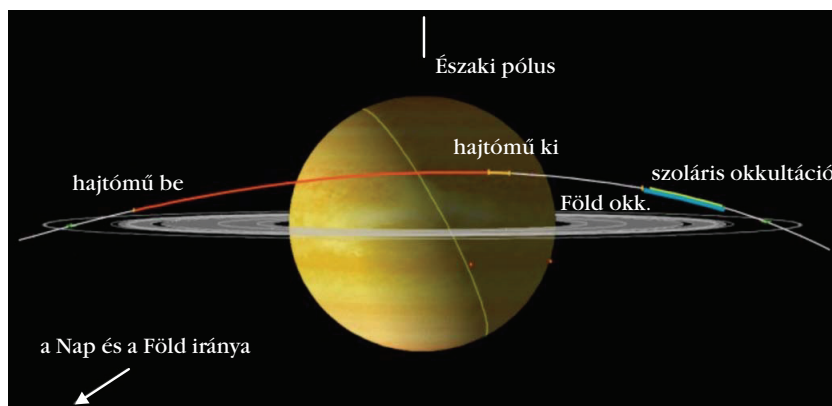
Amikor a Cassini–Huygens 2004-ben megérkezett a Szaturnuszhoz, a Galileo-űrszonda már majdnem egy évtizeden át (1995–2003) végzett átfogó méréseket a legnagyobb gázóriásunk, a Jupiter magnetoszférájában. 2000 végén a Cassini–Huygens is megközelítette a Jupitert, és több alkalommal áthaladt az óriásbolygó



sok mágneses terének belsejében keringő holdak – amelyek között számos jelenleg is aktív (az árapály hatására vulkanikus aktivitást vagy geizirtevékenységet mutató) égitest található –, valamint a Szaturnusz esetében a bolygó egyedülálló gyűrűrendszere. A holdaknál ugyancsak anyagkidobódással jár a felszínt érő részecske-, por- vagy mikrometeoroid-bechapódás is. A Szaturnusz magnetoszférájának szerkezetét, fontosabb belső folyamatait a 4. ábra mutatja. A magnetoszférikus határfelületekről részletesebben a jelen szám *A Naprendszer űrszondás kutatása – szakmai bevezető* című cikkében olvashatnak.

Ahogy a 3. ábrán látható, a Cassini pályára állítása során rendkívül közel került a Szaturnuszhoz, áthaladt a belső magnetoszféra tartományain, majd a bolygó közvetlen közelébe érve kétszer is átmetszte a gyűrűk síkját. A CAPS-adatok feldolgozásában kutatócsoportunk fizikusai Szegő Károly vezetésével vettek részt, a legelső eredményeket a nemzetközi CAPS-team egy közös publikációban [2] tette közzé.

A Cassini 2004. június 29-én, 02:43-kor (UT) ért be a Szaturnusz magnetoszférájába (áthaladt a magnetopauzán). Mivel az űrszonda a Titan pályasíkja (pályasugara $20,5 R_s$, ahol $R_s = 60\,268$ km a Szaturnusz egyenlítői sugara) alatt $5 R_s$ távolságban haladt el, a pályára állítás időszakában nem volt lehetőség a hold régóta feltételezett nitrogéntórusának detektálására. Ezt a későbbiekben

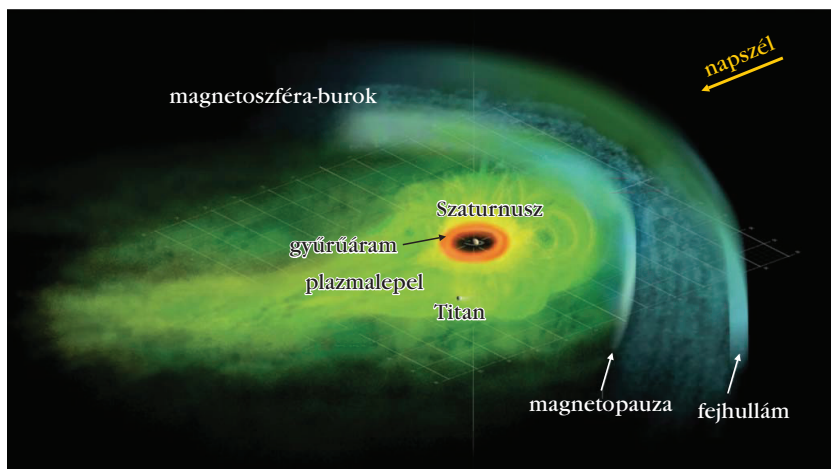


3. ábra. Fölül a Cassini–Huygens utazása a bolygóközi térben a Szaturnusz rendszeréhez. Alul a Cassini–Huygens Szaturnusz körüli trajektóriája a pályára állítás során (forrás: NASA, ESA).

fejhullámán [1], amely az áramló napszél változó dinamikus nyomása miatt állandó mozgásban van.

Annak ellenére, hogy a Szaturnusz mágneses momentuma a Jupiterénél kisebb és az ekliptikához képest (a Jupiterrel ellentétben) jelentős tengelyhajlása ($26,7^\circ$) van (ezek a tényezők lényeges hatást gyakorolnak a magnetoszféra dinamikájára), mégis számos analógiát találunk a két magnetoszféra „működése” között. Az óriásbolygók magnetoszférái arányaikban jóval kiterjedtebbek a földi mágneses térnél. Ennek oka nemcsak az égitestek nagyobb méretében keresendő, hanem a gázóriások gyorsabb forgása (a Jupiter tengelyforgási periódusa 9 óra 55 perc, a Szaturnuszé 10 óra 45 perc), illetve a dinamoeffektust fenntartó, a Jupiter és a Szaturnusz magja fölött áramló fémes hidrogénréteg szintén hozzájárul az erős mágneses tér létrejöttéhez. A gyors forgás mellett lényeges eltérést, és jelentős magnetoszférikus plazmaforrást jelentenek a gázóriá-

4. ábra. A Szaturnusz magnetoszférikus határfelületei, valamint a belső magnetoszféra dinamikája és felépítése a Cassini MIMI fedélzeti berendezésének mérései alapján (forrás: NASA/JPL/JHUAPL).

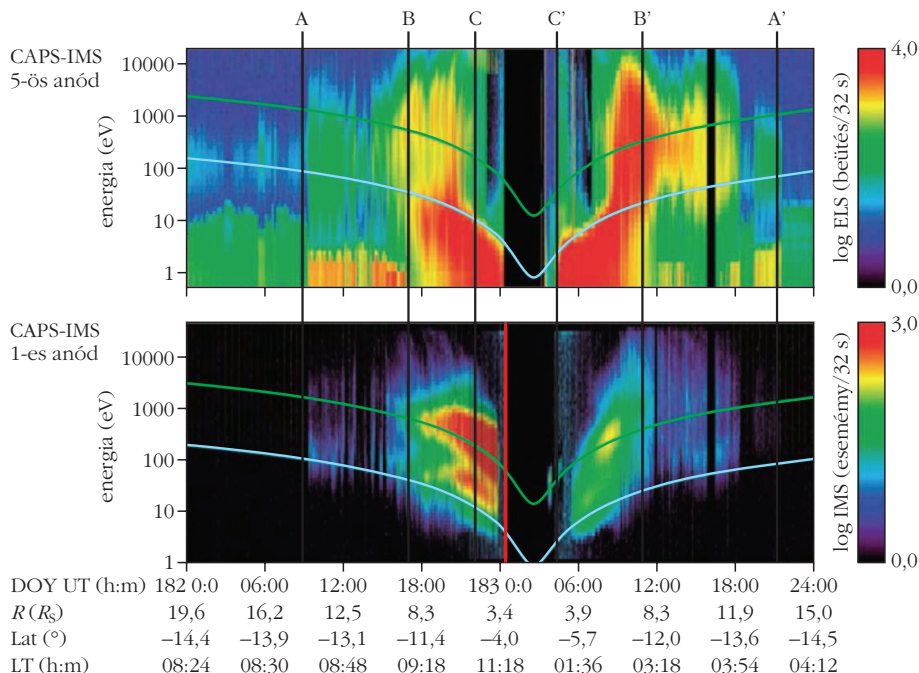


sem észleltük, mivel az a Titan pályája mentén áramló magnetoszférikus plazma korotációja (azaz a befagyási tétel miatt a gyorsan forgó Szaturnusz mágneses erővonalaival együttmozgása) mellett fellépő gyors radiális elmozdulásai miatt nem maradna stabil.

A legelső Szaturnusz-megközelítés során leginkább arra koncentráltunk, hogy a magnetosféra belsejében milyen plazmafizikai szempontból megkülönböztethető tartományokon halad keresztül a szonda, és hogy ezek milyen szerepet játszanak a magnetosféra működésében, dinamikájában. A CAPS elektronokra és ionokra vonatkozó méréseit az 5. ábra mutatja. A felső panelen az CAPS-ELS (elektron-spektrométer) 5-ös, az alsón pedig a CAPS-IMS (iontömeg-spektrométer) 1-es apertúrája (anódja) által mért beütésszámok láthatók az idő függvényében – az adatok 32 másodperces átlagok. A jobb oldali színskála a ráta intenzitását jelzi logaritmikus skálán. A spektrumokra szuperponált görbék az O^+ -ion (zöld) és a H^+ (kék) elméleti korotációs sebességeire vonatkozó energiákat mutatják.

A Szaturnuszhoz közeledve, a bolygótól $\sim 14 R_s$ távolságban (távolodáskor pedig $13,6 R_s$ -nél) megfigyeltük, hogy a plazmasűrűség hirtelen egy nagyságrenddel ($\sim 3 \cdot 10^{-4}$ -ről $\sim 3 \cdot 10^5 m^{-3}$ -re) megemelkedett. Az átmeneti réteg vastagsága $\sim 0,2 R_s$ volt, ez a határfelület egyfajta plazmapauzának tekinthető. A plazmapauzán belül észlelt töltött részecskék elsősorban protonok, He-ionok, de a bolygóhoz közeledve O^+ -ionok is megjelentek. Ebben a tartományban a plazma csak részleges korotációt végez, a tartományt *külső plazmaszférának* nevezzük, melynek határait az 5. ábrán az A és A' vonalak jelzik. A plazmapauzán kívüli tartományban, az egyenlítő síkjától távolabb már főleg protonokból álló, a mágneses féltekékre – plazmalebeny – jellemző, ritka plazmát észleltünk.

A Szaturnuszhoz közeledve, $\sim 9 R_s$ távolságban (a bolygótól távolodva pedig $\sim 7,6 R_s$ -nél) észleltük először a vízcsoport ionjait (OH^+ , H_2O^+ és H_3O^+), amelyek változékonnyal, részlegesen korotáló keveréket alkottak. Ezt a tartományt az 5. ábrán a B és B' tartományhatárok jelölik, amelyeken belül már a *belső plazmaszféra* található. Itt a magnetoszférikus ionpopulációk mozgását egyre inkább a korotáció határozza meg. A domináns plazmaösszetevők egymáshoz viszonyított koncentrációi a belső plazmaszférában a külsőhöz képest megfordulnak, azaz ebben a tarto-



5. ábra. A CAPS-ELS (föül) és az IMS (alul) energia-idő spektrogramjai 2004. június 30-a és július elseje között (DOY 182 és 183). A függőleges tengely az energiát, a vízszintes tengely pedig az időt (UT), a Szaturnusz középpontjától mért radiális távolságot (R_s), a szélességet (Lat) és a helyi időt (LT) mutatja [2].

mányban a protonokhoz képest a nehezebb részecskék kerülnek túlsúlyba (6. ábra, alsó panel). Ez a régió egyben az E-gyűrűvel (sugara $\sim 3-8 R_s$) is azonosítható, amely jégszemcsékben és vízmolekulákban igen gazdag, és forrása az apró (505 km sugarú), de napjainkban is rendkívüli aktivitást mutató Enceladus hold. Korábban a Voyager-1 és -2 plazmaspektrométerének mérései alapján (6. ábra, felső panel) nem lehetett pontosan megállapítani a plazma összetételét, ezért csak feltételezheték, hogy a detektált nehezebb részecskék a Titan vastag és döntően nitrogénből álló atmoszférájából származó N^+ -ionok lehetnek. A CAPS mérései alapján azonban egyértelművé vált tehát, hogy a belső magnetoszférában detektált nehéz ionok populációja főleg oxigénből, valamint víz eredetű ionok összetett keverékéből áll (6. ábra, föül), amelyek legfőbb forrása az Enceladus, illetve annak feltételezett, felszín alatti óceánja lehet. Az Enceladusról és a Naprendszerünk más, az árapályhatás által fenntartott jégkéreg alatti óceánt tartalmazó holdjairól a *Fizikai Szemle* 2021. július–augusztusi számában olvashatnak részletesebben [3].

Ahogy a szonda tovább haladt a magnetosféra legbelső szektorai felé, a C és C' tartományi határon belül az O^+ - és W^+ -ionok koncentrációja (a protonokéhoz képest) még jobban megemelkedett. Ez egybeesik az A és B gyűrűk fölötti, O^+ - és O_2^+ -ionokban gazdag plazmaréteggel, amelyet egyfajta gyűrű-atmoszférának tekinthetünk (*belső plazmaréteg*).

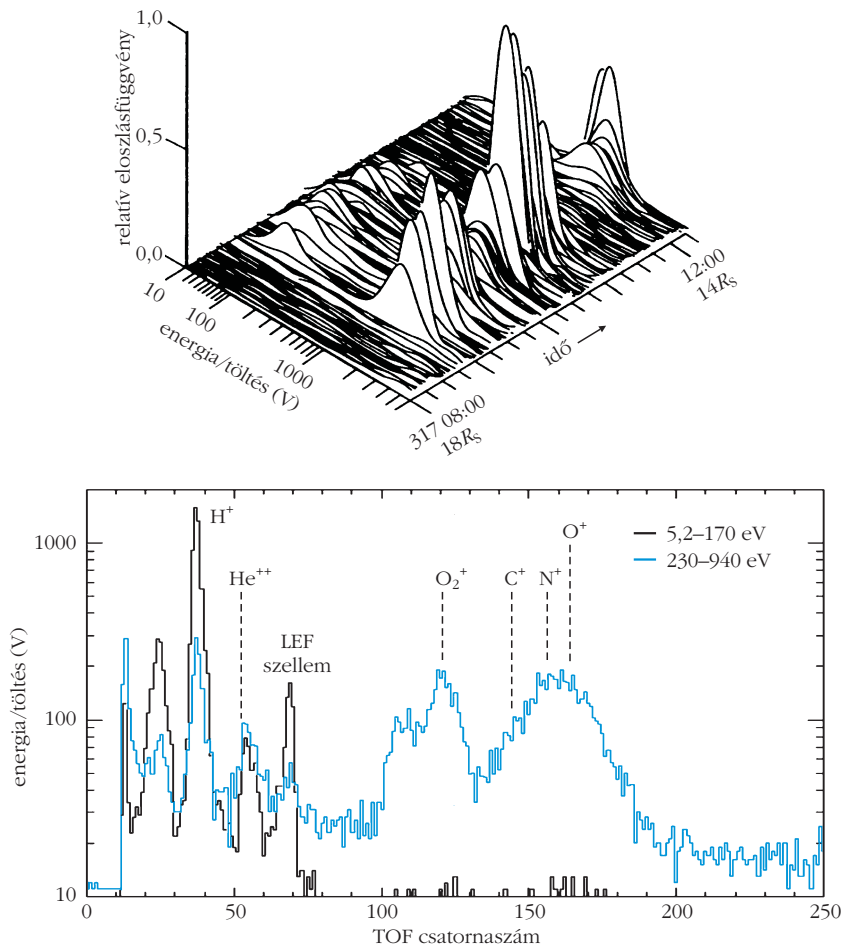
Említettük, hogy a Cassini–Huygens-űrmisszió egyik elsődleges tudományos célpontja a Titan hold volt, amiről ugyan bebizonyosodott, hogy kiterjedt atmoszférája

A Titan hold és plazmakörnyezete

A Titan a Szaturnusz magnetoszférájának határán, a folyamatosan mozgásban lévő magnetopauza átlagos helyzetének (az orrpontonál $\sim 20\text{--}25 R_S$) közelében kering. Mivel a Titan sűrű atmoszféra burkolja, a magnetoszférikus plazmával való kölcsönhatása elsősorban a felsőlégrék folyamataiban nyilvánul meg. A Titan esetében alapvetően két fontos ionizációs mechanizmust ismerünk. Ezek egyike a hold semleges koronájából és atmoszférájából származó részecskének (főként H_2 , CH_4 és N_2) a szoláris EUV-fotonok, valamint a magnetoszférikus töltött részecskék becsapódásai által okozott ionizációja. A másik folyamat pedig a magnetoszféra korotáló ionjainak és az atmoszféra semleges részecskéinek töltéscseréje. A két folyamat eredményeként létrejövő atmoszférikus eredetű, de frissen ionizált részecskék ezt követően giromozgásba kezdenek a Szaturnusz mágneses terének erővonalai körül, és korotációs sebességre gyorsulnak fel.

A Titan kiterjedt atmoszférájának felső rétege tehát ionizált állapotban

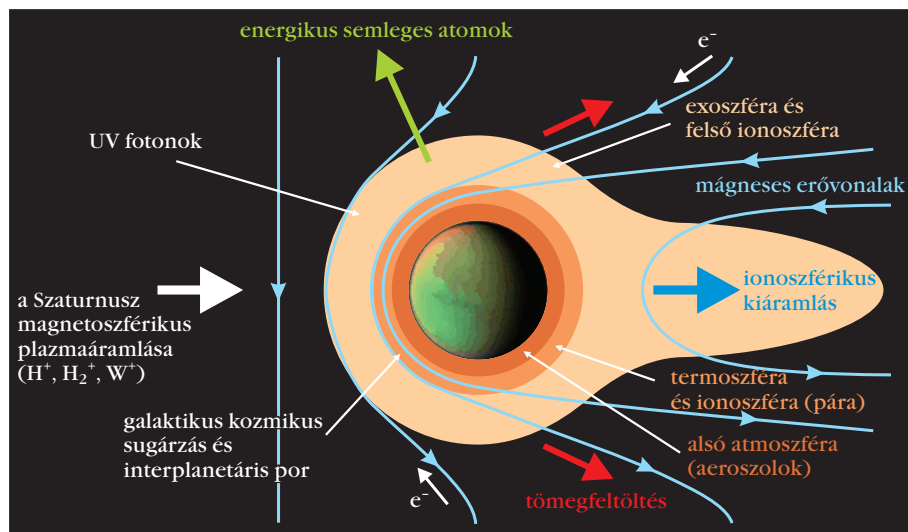
van, és mivel ez az elektromosan vezető ionoszféra effektív mágneses akadályt képez a Szaturnusz magnetoszférájában áramló plazma számára, a hold körül indukált magnetoszféra jön létre (7. ábra). A Titan-



6. ábra. Fölül a Voyager Plasma Science Experiment berendezése által, 1980. november 12-én, 08:12:16 között mért ionspektrum-sorozat [4], és alul a Time-Of-Flight spektrum a belső plazmaszférából, 2004. július elsején, $\sim 19:46$ UT-kor [5].

a várakozásokkal ellentétben nem számít elsődleges magnetoszférikus plazmaforrásnak, azonban más tekintetben rendkívül különleges égitest. Többek között méretével, szerves atmoszférájával és az atmoszférában, illetve a felszínen zajló, a Földön kívül más égitesten még sohasem észlelt folyadékkör-forgással és bonyolult kémiával mindenképpen egyedülálló a Naprendszer holdjai között. A Cassini-Huygens érkezése előtt a Voyager-szondák megközelítették ugyan a Titant, azonban fedélzeti kameráikkal a hold vastag narancssárga atmoszféráján keresztül nem lehetett megpillantani a felszínt. Spektroszkópiai vizsgálatokkal megállapították ugyan az atmoszféra elsődleges összetevőit, de hosszabb időn át tartó megfigyelésekre, a plazmakörnyezet részletes vizsgálatára nem volt lehetőség.

7. ábra. A Titan indukált magnetoszférája, az atmoszféra szerkezete és a hold plazmakörnyezetében zajló fizikai folyamatok.

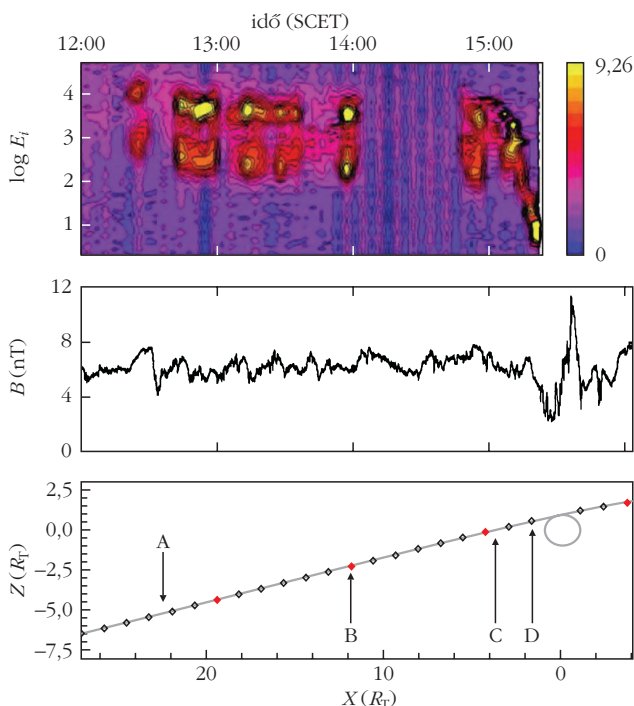


nak nincs saját belső mágneses tere, de a Szaturnusz mágneses erővonalai az ionoszféra körül elhajlanak, így a mágneses bolygók magnetoszféráira emlékeztető erővonal-konfiguráció jön létre. A Titan ionoszférája, valamint a Szaturnusz korotáló plazmája és mágneses tere közötti kölcsönhatás nagyon hasonló a Vénusz és a Mars napszéllel való kölcsönhatásához. Azonban alapvető különbség, hogy a Szaturnusz korotáló, töltött részecskéi a napszéllel ellentétben nem szuperszonikus sebességgel mozognak, ezért a Titan plazmaáramlás felőli oldalán nem jön létre fejhullám. Az viszont a Titan esetében is megtörténhet (bár aránylag ritkán), hogy magas napszélnyomás idején kikerül a magnetoszférából [6], ez esetben az interplanetáris térben a hold környezetében is kialakul a fejhullám.

A Cassini keringő egység első két alkalommal 2004. október 26-án (T_A) és december 13-án (T_B) közelítette meg a Titant [7]. A Titannak a Szaturnuszhoz és a Naphoz viszonyított pálya menti helyzete mindkét esetben közel azonos volt, így a domináns ionizációs források hasonló irányokból (korotáció és szoláris EUV) érték a hold atmoszféráját.

A T_A és a T_B megközelítések során a Titan környezetében négy plazmatartományt (A–D) különítettünk el, melyekben eltérő plazmapopulációkat azonosítottunk. A T_A esetre vonatkozóan a CAPS-ionspektromot, a mágneses tér abszolút értékét és az x - z síkban ábrázolt pályaadatokat a 8. ábra mutatja. A Titan és a Szaturnusz magnetoszférikus plazmájának kölcsönhatása a holdtól már $\sim 1 R_S$ távolságban detektálható.

8. ábra. A CAPS-IMS dinamikus spektruma (felső panel), a mágneses térerősség abszolút értéke (középső panel) és a sonda pályája (alsó panel) a Titannál a T_A megközelítés idején [7].



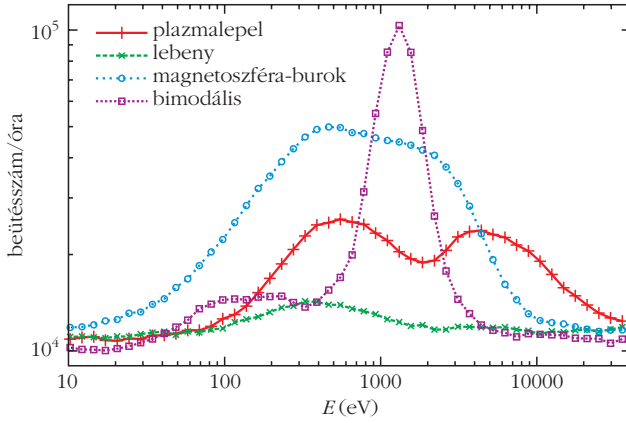
A holdtól legtávolabbi régióban („A”) a plazmát két-komponensű ioneloszlások (protonoké és oxigén-ionoké) jellemezték, és a részecskék a korotációs irányból érkeztek. A „B” tartomány ionpopulációi már többkomponensűek voltak, az ionok feltehetően nem közvetlenül a Titan atmoszférájából, hanem az azt körülvevő semleges koronából érkeztek. Az is lehetséges, hogy egy vagy két keringéssel korábban távoztak az atmoszférából, és attól tovább ionizálódtak. A „C” tartományban a Szaturnusz mágneses erővonalai feltorlódtak és elhajlottak a hold ionoszférája körül, továbbá az ebben a tartományban ionizálódó, valamint töltéscserén átesett atmoszférikus eredetű ionok találhatók. A „D” régió domináns összetevője a hideg, Titan eredetű plazma.

A Cassini Titanhoz viszonyított pályája a későbbi megközelítések során folyamatosan változott, így alkalom nyílt az indukált magnetoszféra különböző tartományainak feltérképezésére. Amikor az űrszonda több alkalommal áthaladt a Titan csóváján, kedvező esetben a mágneses erővonalak mentén összeköttetés jött létre a Cassini és a Titan felső atmoszférája között [8–10]. Ekkor meg lehetett határozni a csóva mentén kiáramló részecskék szökési és tömegvesztési rátáját, ezek nagyságrendileg a $\sim 9,6 \cdot 10^{23} - 4 \cdot 10^{24}$ ion/s, illetve az $\sim 1,6 \cdot 10^{25} - 9 \cdot 10^{25}$ amu/s tartományba esnek (amu: atomic mass unit, más néven dalton). Ezen paraméterek ismerete a Titan atmoszférája és a Szaturnusz magnetoszférája közötti kölcsönhatás modellezése szempontjából meghatározó fontosságú.

A Szaturnusz magnetodiszkjének hatása a Titan plazmakörnyezetére

A Cassini keringő egység 13 év alatt összesen 127 alkalommal közelítette meg a Titant. A hold környezetében a magnetoszférikus plazma áramlási sajátosságai elég széles tartományban változnak, ezért a Titan atmoszférája és a korotáló töltött részecskék közötti kölcsönhatás alaposabb megértéséhez érdemes volt megvizsgálni, hogy a plazmapopulációk változékonyságának hátterében milyen folyamatok állnak.

Elsőként *Rymer* és szerzőtársai [12] végeztek átfogó elemzést a hold környezetében észlelt elektronpopulációkra vonatkozóan, összesen 54 Titan-megközelítés CAPS elektronspektrométer-adatait felhasználva. Ennek során négy típust különböztettek meg: plazmalepel, lebeny, magnetoszféra-burok (mivel nagy napszélnyomás esetén a Titan kikerülhet a magnetoszféra-burokba vagy akár a napszélbe is) és bimodális jellegű plazmakörnyezetet. A plazmalepel-típusú környezetre általában magasabb részecskefluxus és nagyobb energia jellemző, a lebeny-típusra alacsonyabb fluxus és nagy energia. A magnetoszféra-burokra általában nagy részecskefluxus és alacsony energia jellemző, míg a bimodális esetben egy-



9. ábra. A Titan közelében észlelt négy eltérő plazmapopulációra jellemző energiaspektrumok [11].

szerre figyelhetők meg kisebb és nagyobb energiájú részecskepopulációk. A későbbiekben a CAPS ionadatainak elemzése hasonló eredményt (9. ábra) hozott [11]. Az egyes plazmapopuláció-típusokat csak rövidebb időintervallumokra vonatkozóan lehetett beazonosítani, de egy 12 órás intervallumra (~1 szaturnuszi nap) vonatkoztatva mindegyik típus előfordul. Ez azt jelezte, hogy egy nagyobb léptékű plazmastruktúra hatásai figyelhetők meg. Az eredményeket ezért a Szaturnusz magnetoszférájának két mágneses féltékéjét elválasztó áramlepelrel (plazmalepel) és a hozzá társuló mágneses struktúrával, a magnetodiszkkal hozták kapcsolatba [13]. A magnetodiszk középvonalaán való áthaladást egy rövid, jól behatárolható esemény jelzi, amelynek során nehéz ionok jelennek meg a plazmában.

Az óriásbolygók gyors forgása következtében a centrifugális erő a korotáló plazmát korong formájában szétteríti, és a plazma a mágneses erőterbe befagyva az egyenlítői síkban deformálja a mágneses erővonalakat – ezt a mágneses struktúrát nevezzük magnetodiszknak. A magnetodiszk a centrifugális erő, a mágneses tér ellenhatása és a plazma nyomása együttesen alakítja ki. Ha a Szaturnusznak nem lenne az ekliptikához viszonyított jelentős tengelyhajlása, akkor a magnetodiszk a bolygó egyenlítői síkjával esne egybe. Azonban – mivel a Szaturnusz forgástengelye az ekliptikával 26,7°-os szöget zár be – a magnetodiszk-struktúra a napszél nyomásának hatására

tál alakúra deformálódik (10. ábra, bal panel). A magnetoszférikus plazma összetétele és sűrűsége, valamint a bolygó mágneses terének fizikai tulajdonságai nagyban függenek a diszktól való távolságtól, illetve annak elhelyezkedésétől.

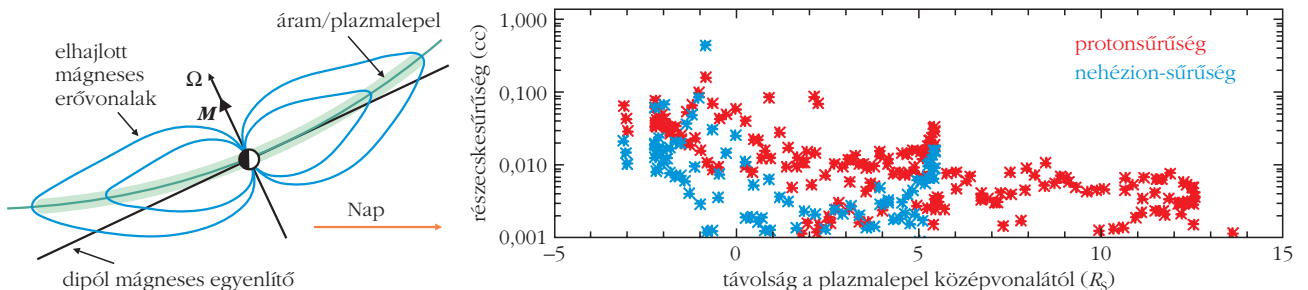
Több magnetodiszk-átmenetet megvizsgálva fény derült a struktúra és a hozzá társuló plazmalepel finomszerkezetére is [14]. A mérések azt mutatják, hogy a magnetodiszk középvonalaát egy strukturált plazmareteg veszi körül, amelyet egy könnyű ionokból álló szélesebb, valamint egy keskenyebb struktúrák formájában megjelenő, nehéz ionok alkotta tartomány épít fel (10. ábra, jobb panel). Szintén megfigyelhető, hogy a diszken belül a plazmasűrűség megnövekedése egybeesik mágneses tér radiális komponensének irányváltásával. A nehéz ionok koncentrációja általában ezen rétegekben a legnagyobb, hőmérsékletük azonban alacsony. Általánosan elmondható, hogy a plazmalepel a magnetoszféra nappali oldalán a legkiterjedtebb és a legsűrűbb. A plazmalepel/magnetodiszktól északra és délre található magnetoszférikus lebenyekben (lobes) főként protonok figyelhetők meg, amelyek sűrűsége ezen tartományokban közel állandó. A plazmalepelre a fentiekben kívül jellemző még egy periodikus hullámzó mozgás is [15, 16], amelynek következtében időről időre kimozdul a Szaturnusz egyenlítői síkjából – természetesen a Titan pályája mentén is. Ez a periodicitás korrelál a Szaturnusz gyorsan forgó magnetoszférájában észlelt, kilométeres hullámhosszú rádiósugárzással (Saturn Kilometric Radiation, SKR), amelynek hatása megjelenik a mágnesestér- és töltött részecske-adatokban is.

A hold plazmakörnyezetére tehát folyamatosan hatást gyakorol a magnetodiszk helyzete, mozgása, valamint a magnetoszférikus határfelületeknek a napszél dinamikus nyomásától függő elhelyezkedése.

A Szaturnusz fejhulláma előtti tartomány vizsgálata

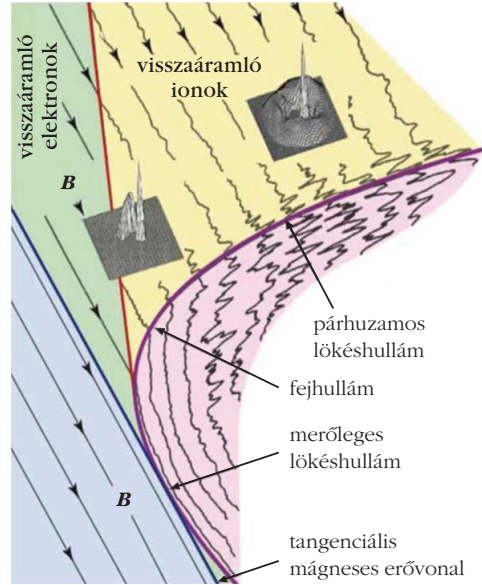
Az interplanetáris mágneses tér és a bolygók ívelt fejhullámára egy adott pontban állított merőleges által bezárt szög (θ_{Bn}) értékétől függően lehet szó kvázi-párhuzamos ($0^\circ < \theta_{Bn} < 45^\circ$) vagy kvázi-merőleges

10. ábra. Balra a Szaturnusz magnetodiszkjének sematikus ábrázolása. A jobb oldali panelen a plazmasűrűség függése a plazmalepel középvonala és a szonda között mért távolságtól, a T_{58} Titan-megközelítésre vonatkozóan [14].



($45^\circ < \theta_{Bn} < 90^\circ$) lökeshullám-tartományokról (11. ábra). A kvázi-párhuzamos fejhullám közvetlen összeköttetésben van az interplanetáris mágneses tér erővonalával, amelyek mentén a fejhullámról visszavert ionok giromozgást végezve a beérkező napszél irányába áramlanak vissza. A visszavert ionok és a napszél kölcsönhatása plazmainstabilitásokat gerjeszt, amelyek hullámkeltéshez vezetnek. A létrejövő alacsony frekvenciájú (Ultra Low Frequency, ULF) hullámok kezdetben a beérkező napszél irányában terjednek, majd a plazmaáramlás hatására visszatérnek a fejhullámhoz, ahol meredekké válnak, végül lökeshullámszerű SLAMS (Short Large Amplitude Magnetic Structures) struktúrák jönnek létre. Ezek végül beépülnek a kvázi-párhuzamos fejhullámba, így hozzájárulnak annak folyamatos fenntartásához (lökeshullám-reformáció).

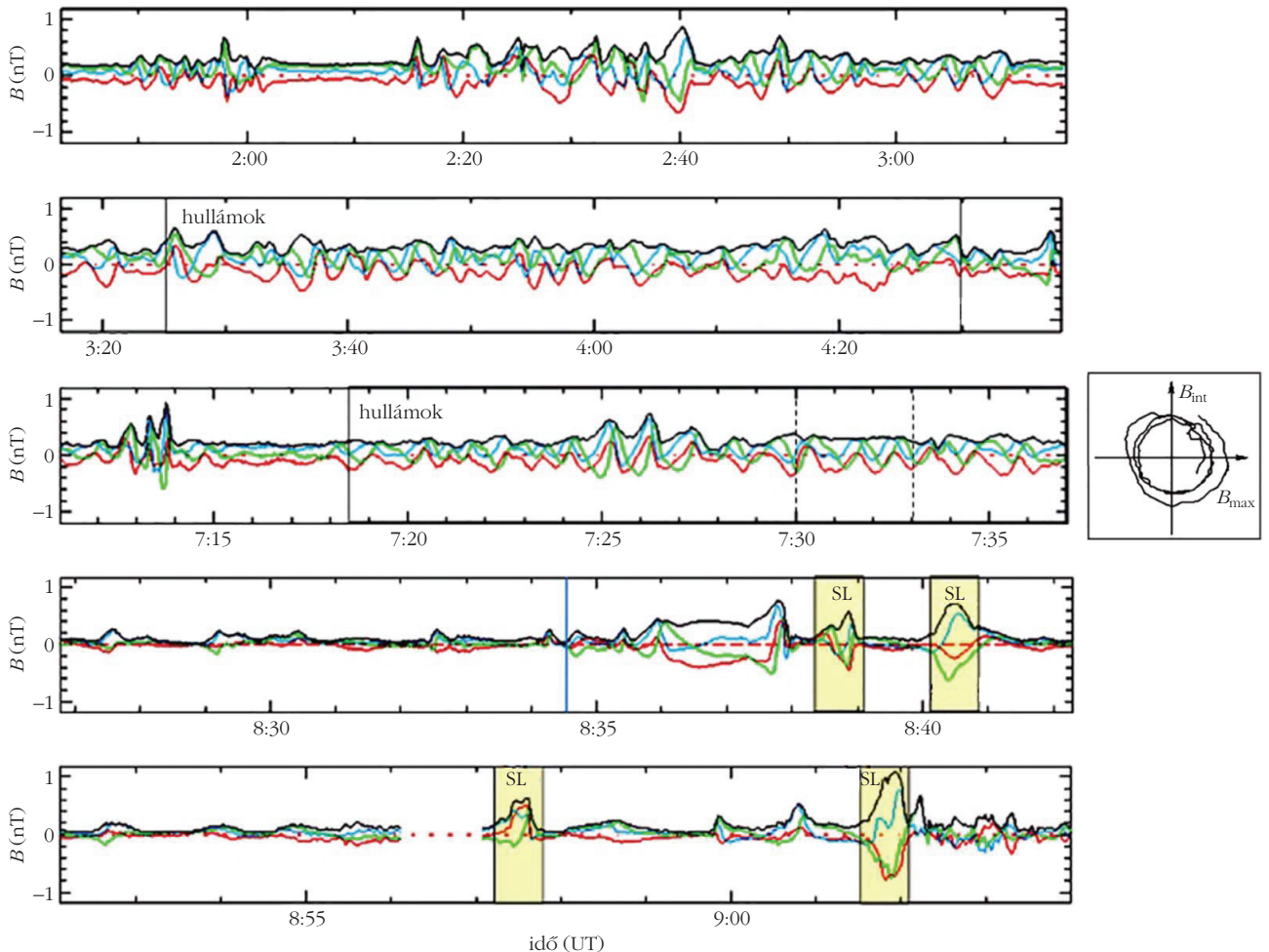
A földi kvázi-párhuzamos lökeshullám környezetében már több alkalommal figyeltek meg SLAMS-eseményeket, a Szaturnusznál viszont most volt először alkalmunk tanulmányozni ezt a kölcsönhatást és általános plazmafizikai jellemzőit [18]. Tanulmányozásukhoz a CAPS- és MAG-műszerek méréseit használtuk fel.



11. ábra. A fejhullám előtti tartomány szerkezete, és a benne zajló részecske-hullám kölcsönhatások (forrás: [17]).

2004. december 10-én a Cassini-űrszonda az interplanetáris térben a fejhullám irányában haladt (a Sza-

12. ábra. A Szaturnuszánál 2004. december 10-én észlelt ULF-hullámok és a meredekké válás stádiumában lévő SLAMS-struktúrák [18]. A jobb oldalon látható hodogram a 07:30–07:33 UTC közötti intervallumra vonatkozik.



turnusztól $\sim 37 R_s$ távolságban). A bolygó felé közeledve ($\sim 03:00$ UTC-től) ULF-hullámokat észleltünk (12. ábra), majd a fejhullámhoz közeledve megjelentek a meredekké válás különböző stádiumában lévő SLAMS-események is (sárgával jelölve) [18]. Az ULF-hullámok frekvenciája $\sim 10^{-2}$ Hz körül ingadozott. A beillesztett hodogramot a 07:30 és 07:33 UTC között mért adatokból határoztuk meg, amelyen látszik, hogy a mágneses tér folyamatos forgásban volt. Több alkalommal megfigyeltük a SLAMS-eseményekhez társuló whistler prekursorhullámokat is, amelyeket a Föld közelében észlelt SLAMS-eknél is kimutattak. A töltéstrészcseke-adatokban kimutatható volt, hogy az ionnyalábok a SLAMS közelében eltérültek, valamint a plazma felfűtődött, és áramlási sebessége hirtelen lecsökkent – ez megfelel a gyors módusú lökeshullámok viselkedésének. Általánosságban kijelenthető, hogy a Szaturnusznál észlelt SLAMS-struktúrák alapvető fizikai jellemzői megfeleltek a Föld közelében megfigyeltékének, azonban térbeli kiterjedésük lényegesen nagyobb (30 000–50 000 km) volt, mivel az ULF-hullámok frekvenciája elsősorban az interplanetáris mágneses tér erősségétől (ami a Szaturnusznál sokkal kisebb, mint a Földnél) függ. A frekvenciát az észlelések időtartamából lehetett becsülni, mivel a szonda az áramló plazmához képes stacionáriusnak tekinthető.

A Nagy Finálé és a közeljövő tervezett űrmissziói a Szaturnuszhoz és holdjaihoz

A Cassini-űrszondát a Szaturnusznál töltött utolsó hat hónapja során olyan speciális pályára állították, amelyen a gázóriáshoz minden korábbinál közelebb, a gyűrűrendszer és a felhőzet felső rétege felett repült



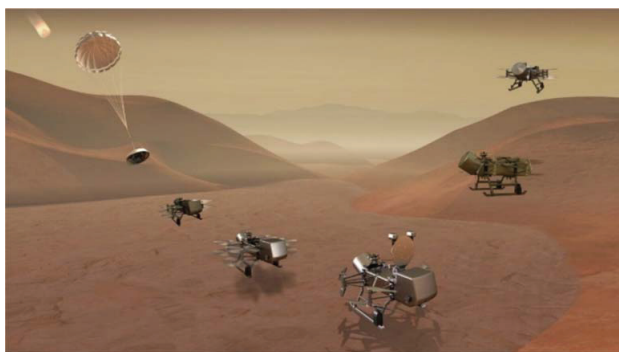
13. ábra. Fantáziarajz a Cassini keringő egység utolsó pillanatairól, ahogy 2017. szeptember 15-én megsemmisül a Szaturnusz atmoszférájában.

el. Ez volt a befejezés, a „Nagy Finálé”, azonban az ezen időszakban végrehajtott 22 keringés alatt is érdekes tudományos felfedezések születtek. Minden korábbinál részletesebben lehetett tanulmányozni a gyűrűk és a felhőzet szerkezetét, dinamikáját, valamint a gyűrűrendszer környezetében lévő plazma összetételét. A mágneses térben végzett mérések során kiderült, hogy a bolygó forgástengelye és mágneses tengelye gyakorlatilag egybeesik, az általuk bezárt szög 0,06 foknál is kevesebb. A közeli pályák a gravitációs tér finomszerkezetének vizsgálatát is lehetővé tették.

A Cassini–Huygens-űrmisszió 2017. szeptember 15-én ért véget a keringő egység kontrollált megsemmisítésével, a Szaturnusz atmoszférájában (13. ábra). Erre azért volt szükség, hogy az irányítás nélkül keringő űrszonda véletlenül se csapódhasson be olyan holdak felszínére, amelyek a későbbiekben a lehetséges élet nyomainak kutatása szempontjából érdekesek lehetnek (elsősorban a Titan és az Enceladus). Az űrmisszió a Szaturnuszánál töltött 13 év alatt 294-szer került meg a gázóriást, és az űrben töltött közel 20 év alatt 453 048 felvételt készített, illetve összesen 139 gigabájtnyi tudományos adatot sugárzott vissza a Földre. Az űrmisszió tehát hivatalosan véget ért, de az adatok feldolgozása még hosszú ideig folytatódni fog.

Szegő Károly fáradhatatlan szervezőmunkájának köszönhető, hogy a későbbi kutatásokat megalapozó

14. ábra. Balra a NASA Dragonfly Titan robothelikoptere (a tervek szerint 2027-ben indul), valamint jobbra a még tervezés fázisában lévő Enceladus Orbilander űrmissziója.



Cassini–Huygens-űrmisszió sikeres, nemzeteken átívelő közös munkájában kutatócsoportunk is részt vehetett.

A Nagy Finálét követően, a megszerzett új ismeretek tükrében az űrkutatással foglalkozó szervezetek és immár magánvállalatok egyaránt új űrmissziókat terveznek a Szaturnuszhoz. A Titan hold felszínének és a folyékony metán atmoszférikus körforgásának tanulmányozásában rejlő további potenciális úttörő eredmények reményében a NASA a tervek szerint 2027-ben egy új űrmissziót indít útjára. A Dragonfly-misszió előreláthatólag 2034-ben landolhat a Titanon. A Dragonfly (jelentése szitakötő) a marsi Ingenuity robothelikopterhez hasonlóan, az atmoszférában repkedve végez majd méréseket a holdon (14. ábrán balra). A távolabbi jövőre vonatkozóan a NASA egy további űrmisszió, az Orbilander (14. ábra, jobb panel) tervét terjesztette elő, amelynek elsődleges célja az Enceladus hold vízben gazdag gejzírjeinek, valamint a hold felszínén található, életre utaló jelek vizsgálata lenne. A tervezett leszállásra a 2050-es években kerülhet sor.

Irodalom

1. Szegő K., D. T. Young, B. Barraclough, J. J. Berthelier, A. J. Coates, D. J. Comas, F. J. Cray M. K. Dougherty, G. Erdős, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, M. F. Thomsen: Cassini plasma spectrometer measurements of Jovian bow shock structure. *JGR: Space Physics* 108 A7(2003) Paper: 1287, 14.
2. Young et Young, D. T., J. J. Berthelier, M. Blanc, J. L. Burch, S. Bolton, A. J. Coates, F. J. Cray, R. Goldstein, M. Grande, T. W. Hill et al.: Composition and dynamics of plasma in Saturn's magnetosphere. *Science* 307/5713 (2005) 1262–1266.
3. Bebesi Zs., Juhász A.: A folyékony víz nyomában a Naprendszerben. *Fizikai Szemle* 71/7–8 (2021) 217–226.
4. Bridge, H. S., F. Bagenal, J. W. Belcher, A. J. Lazarus, R. L. McNutt, J. D. Sullivan, P. R. Gazis, R. E. Hartle, K. W. Ogilvie, J. D. Scudder, E. C. Sittler, A. Eviatar, G. L. Siscoe, C. K. Goertz, V. M. Vasyliunas: Plasma observations near Saturn: Initial results from Voyager 1. *Science* 215 (1982) 563.
5. Bebesi Zs.: *A Szaturnusz-magnetoszfera összetételének és a Titán globális plazmakörnyezetének vizsgálata a Cassini Plazma Spektrométer mérései alapján*. Doktori értekezés, Témavezető: Dr. Szegő Károly, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Fizika Doktori Iskola, Részecskefizika és Csillagászat Szakirány, 2007.
6. Bertucci, C., N. Achilleos, M. K. Dougherty, R. Modolo, A. J. Coates, K. Szegő, A. Masters, Y. Ma, F. M. Neubauer, P. Garnier, J. E. Wahlund, D. T. Young: The magnetic memory of Titan's ionized atmosphere, *Science* 321/5895 (2008) 1475–1478.
7. Szegő, K., Z. Bebesi, G. Erdős, L. Foldy, F. Cray, D. J. McComas, D. T. Young, S. Bolton, A. J. Coates, A. M. Rymer et al.: The global plasma environment of Titan as observed by Cassini Plasma Spectrometer during the first two close encounters with Titan, *GRL* 32:20 (2005) 1–5. Paper: L20S05.
8. Szegő, K., Z. Bebesi, C. Bertucci, A. J. Coates, F. Cray, G. Erdős, R. Hartle, E. C. Sittler, D. T. Young: Charged particle environment of Titan during the T9 flyby, *GRL* 34:24 (2007) Paper: L24S03.
9. Bertucci, C., F. M. Neubauer, K. Szegő, J. E. Wahlund, A. J. Coates, M. K. Dougherty, D. T. Young, W. S. Kurth, Structure of Titan's mid-range magnetic tail: Cassini magnetometer observations during the T9 flyby: *GRL* 34:24 (2007) 4. Paper: L24S02.
10. Coates, A. J., F. J. Cray, D. T. Young, K. Szegő, C. S. Arridge, Z. Bebesi, E. C. Sittler, R. E. Hartle, T. W. Hill: Ionospheric electrons in Titan's tail: Plasma structure during the Cassini T9 encounter. *Geophys. Res. Lett.* 34 (2007) L24S05.
11. Nemeth, Z., K. Szegő, G. Erdős, L. Foldy, A. Rymer, M. F. Thomsen, E. C. Sittler, A. J. Coates, A. Wellbrock: Ion distributions of different Kronian plasma regions. *J. Geophys. Res.* 116 (2011) A09212.
12. Rymer, A. M., H. T. Smith, A. Wellbrock, A. J. Coates, D. T. Young: Discrete classification and electron energy spectra of Titan's varied magnetospheric environment *GRL* 36 (2009) L15109.
13. Szegő, K., Z. Nemeth, G. Erdős, L. Foldy, M. Thomsen, D. Delapp: The plasma environment of Titan: The magnetodisk of Saturn near the encounters as derived from ion densities measured by the Cassini/CAPS plasma spectrometer. *JGR* 116:10 (2011) 17. Paper: A10219.
14. Szegő, K., Z. Nemeth, G. Erdős, L. Foldy, Z. Bebesi, M. Thomsen, D. Delapp, Location of the magnetodisk in the nightside outer magnetosphere of Saturn near equinox based on ion densities. *JGR* 117:9 (2012) 11. Paper: A09225.
15. Szegő, K., Nemeth, Z. Foldy, L. Cowley, S. W. H., Provan, G.: Dual periodicities in the flapping of Saturn's magnetodisk, *JGR* 118:6 (2013) pp. 2883–2887, 5 p.
16. Nemeth, Z., K. Szegő, L. Foldy, S. W. H. Cowley, G. Provan, M. Thomsen: Periodic motion of the magnetodisk as a cause of quasi-periodic variations in the Kronian magnetosphere. *Planetary and Space Science* 130:1 (2016) 54–59.
17. Treumann, R. A., C. H. Jaroschek: Fundamentals of Non-relativistic Collisionless Shock Physics: IV. Quasi-Parallel Supercritical Shocks, arXiv: 0805. 2579 (astro-ph), 2008
18. Bebesi, Z., G. Erdős, K. Szegő: Observations of short large amplitude magnetic structures at the kronian bow shock. *Icarus* 333 (2019) 306–317.



MAGYAR RÉSZVÉTEL A VEGA-ŰRMISSZIÓBAN

Tátrallyay Mariella
Wigner Fizikai Kutatóközpont

Űrszondák a Halley-üstökösnél

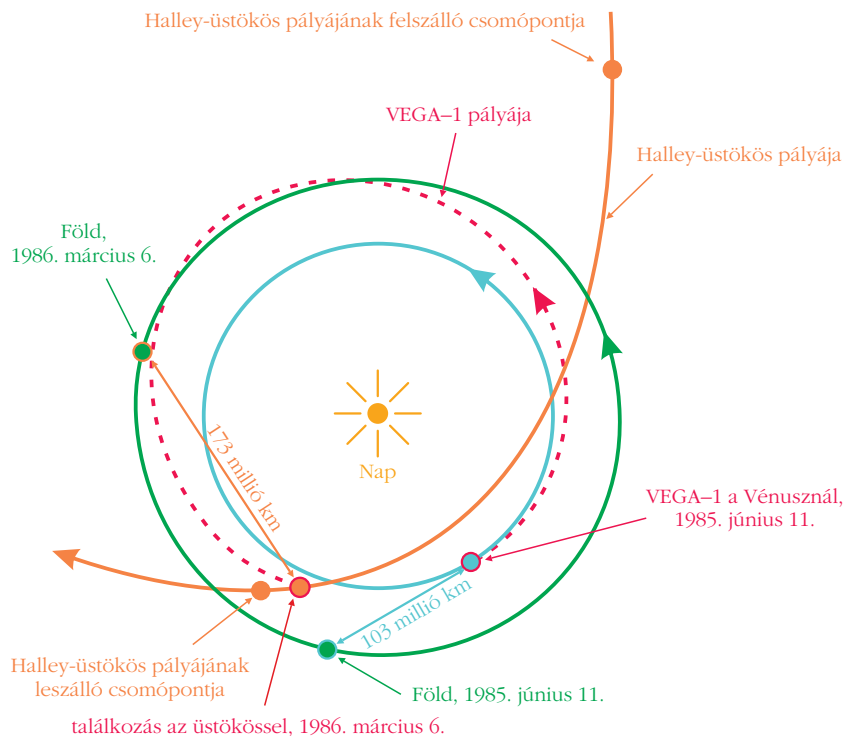
A 18. század elején *Edmond Halley* angol csillagász egy 1682-ben észlelt üstökös pályájának vizsgálata alapján arra a megállapításra jutott, hogy az 1531-ben és 1607-ben feljegyzett látványos égi jelenséget ugyanaz az üstökös okozta, amely körülbelül 76 évenként tér vissza a Nap közelébe, és következő megjelenése 1758-ban várható. A prognózis igaznak bizonyult, így az üstököst róla nevezték el.

A Halley-üstököst 1910-ben szabad szemmel is jól láthatták az emberek, mivel a Föld az üstökös csóvájába került. Következő visszatérése a Nap közelébe 1986-ban nem ígérkezett különösen látványosnak a Föld felszínéről, viszont az űrkutatás akkor már annyira fejlett volt, hogy több ország űrügynöksége fontolóra vette, hogy űrszondát küldjön az üstökös közelébe.

A szovjet Interkozmosz VEGA-missziójának szervezése 1980 nyarán a budapesti COSPAR-konferencián kezdődött [1]. Ekkor merült fel az ötlet, hogy a szovjet-francia együttműködésben a Vénusz légkörének kutatására tervezett szonda pályája módosítható úgy, hogy 1986. március elején a Halley-üstökös közelébe is eljusson. Ezután *Roald Z. Szaggyejev*, a moszkvai Űrkutatási Intézet igazgatójának vezetésével széleskörű nemzetközi együttműködés alakult két Venyera típusú (korábban a Vénusz kutatására készült) szonda felszerelésére olyan műszerekkel, amelyek alkalmasak az üstökös magja, valamint a környezetében található por, gáz és plazma vizsgálatára. A Vénusz bolygó és a Halley-üstökös orosz nevének kezdőbetűiből (Ve-Ga) alakult ki a kettős célú misszió neve.



Tátrallyay Mariella okleveles geofizikus (1966, ELTE) és fizikus (1970, ELTE), a földtudomány kandidátusa (1978, MTA). Jelenleg a Wigner FK Űrfizikai Csoportjának nyugalmazott főmunkatársa. Kutatási szakterülete az űrplazmafizika: a Föld, Vénusz, Mars és üstökösök környezetében található plazma és a napszél kölcsönhatásának vizsgálata űrszondák mérései alapján. 1993 óta részt vesz az ESA jelenleg is futó Cluster programjában, a Cluster Magyar Adatközpont munkatársa, korábban vezetője.



1. ábra. A VEGA-1 szonda pályája (szaggatott görbe) a Vénusztól a Halley-üstökösig. A Vénusz helyzete 1985. június 11-én, a Halley-üstökös helyzete – pályáját narancsszínű görbe jelzi – 1986. március 6-án látható [2].

A két VEGA-szondát 1984. december 15-én, illetve 21-én indították Bajkonurból, majd 1985. június közepén elérték a Vénuszt, ahol ballont bocsátottak a bolygó sűrű légkörébe. Az 1. ábra [2] mutatja a VEGA-1 pályáját a Vénusztól a Halley-üstökössel 1986. március 6-án bekövetkezett találkozásig. A Föld és a Vénusz közötti távolság 103 millió km volt 1985. június 11-én, amikor a VEGA-1 elhaladt a bolygó mellett. A Föld és az üstökös közötti távolság a VEGA-1 találkozó idején 173 millió km, a VEGA-2 találkozó idején 162 millió km volt, mindkettő nagyobb a Nap-Föld-távolságnál.

Az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) és a japán Űrkutatási és Űrhajózási Intézet (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS) is küldött űrszondát a Halley-üstököshöz. Az amerikai NASA nem tervezett űrmissziót, de földi megfigyelésekkel támogatta a nemzetközi „Halley-armadát”. Az öt szonda üstökösmegközelítésének legfontosabb adatai az 1. táblázatban szerepelnek: a maghoz legközelebbi pont elérésének ideje, a távolság a magtól és a relatív sebesség.

1986. március 6-án a VEGA-1 volt az első űrszonda, amely közelről fényképeket készített egy üstökös

1. táblázat Az öt Halley-szonda 1986. évi üstökösmegközelítésének adatai.			
a szonda neve, űrügynökség	az üstökösmaghoz legközelebbi időpont (GMT)	távolság (km)	relatív sebesség (km/s)
VEGA-1, Interkozmosz (szovjet)	márc. 6. 07:20	8 890	79,2
Suisei, ISAS (japán)	márc. 8. 13:06	151 000	~ 73
VEGA-2, Interkozmosz (szovjet)	márc. 9. 07:20	8 030	76,8
Sakigake, ISAS (japán)	márc. 11. 04:18	~ 7 000 000	
Giotto, ESA (európai)	márc. 14. 00:03	~ 596	68,4

magjáról. A maghoz legközelebb az Európai Űrügynökség Giotto-szondája jutott, köszönhetően az Interkozmosz, ESA, ISAS és a NASA korábban soha nem tapasztalt együttműködésének. A „Pathfinder” projekt keretében a VEGA-szondák észlelései alapján pontosítani lehetett az üstökös pályáját, a NASA VLBI adatai alapján pedig a szondák helyzetét tudták nagyon pontosan meghatározni. Így az üstököshöz néhány nappal később érkező Giotto 596 km-re tudta megközelíteni az üstökös magját. A Halley-üstökös retrográd pályán kering a Nap körül, ezért a szondák nagy relatív sebességgel haladtak el az üstökösmag mellett, annak Nap felőli oldalán és csak néhány órát töltöttek a magot körülvevő gáz- és porkómában.

Magyar részvétel a műszerek fejlesztésében

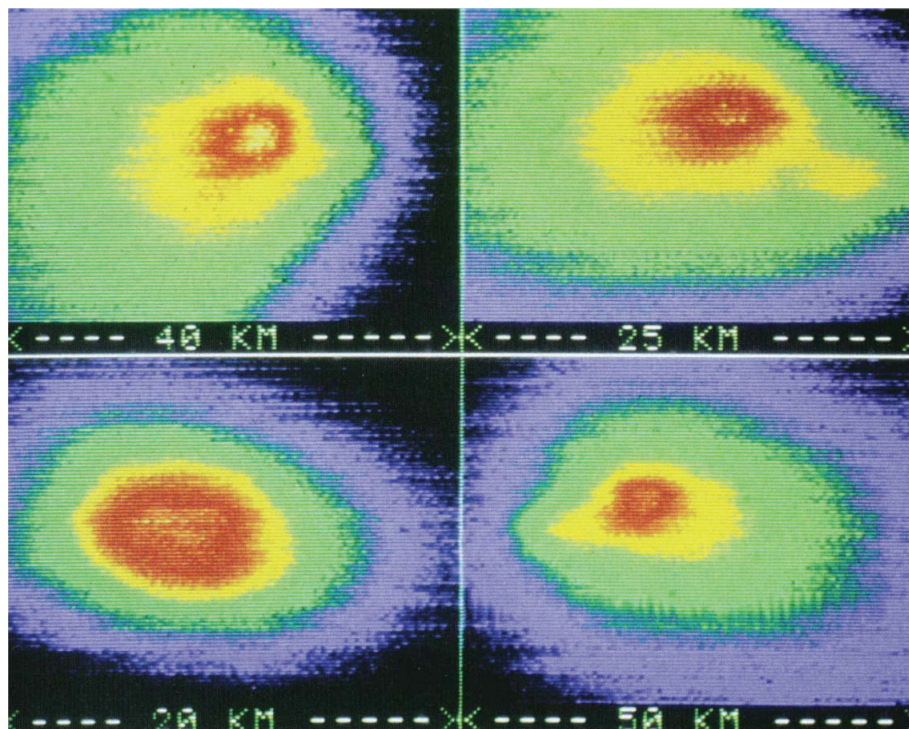
A két egyforma VEGA-szonda 3 tengelyre stabilizált űreszköz volt, fedélzetükre a Vénusz légkörébe küldött ballonon kívül az üstököskutatásra alkalmas optikai berendezések, pormérő műszerek, semleges- és töltött részecske-detektorok, valamint elektromos és mágneses teret érzékelő műszerek kerültek. A tudományos berendezések tervezésében és építésében az Interkozmosz tagországain kívül nyugat-európai, sőt amerikai kutatók is részt vettek, így ez az űrmisszió a szovjet űrkutatás legnagyobb és legsikeresebb nemzetközi programja lett. 1986. március 6-án és 9-én különböző országokból származó kutatók, köztük neves tudósok figyelhették a VEGA-1, majd a VEGA-2 szonda sikeres találkozásáról valós időben érkező adatokat a moszkvai Űrkutatási Intézetben. Az első találkozót az egyik jelentős amerikai televíziós társaság, az ABC is élőben közvetítette [2, 3].

A sok kutatóhelyen, párhuzamosan folyó munkálatokat a VEGA Nemzetközi Tudományos és Technikai Bizottsága irányította, amelynek több magyar tagja volt, köztük Szegő Károly. Az űrmisszióról és a szondák tudományos berendezéseiről részletes magyar nyelvű ismertetés jelent meg a *Fizikai Szemle* 1985/7. számában [4]. Jelen írás csak a magyar részvétellel készült műszereket mutatja be röviden.

A VEGA-űrmisszió legfontosabb berendezése a televíziós rendszer (TeleVision System, TVS) volt, készítésében a magyar szakemberek komoly feladatokat vállaltak szovjet és francia kutatókkal együttműködésben [5]. A TVS vezető kutatója, egyúttal az űrmissziót irányító bizottság elnöke R. Z. Szaggyejev volt. A KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézetének munkatársai fejlesztették a TVS elektronikus rendszerét, amelynek egyik mikroszámítógépe az üstökös felismerését és követését, a másik a képfelvételt irányította. Erről a munkáról részletes ismertetés található a jelen cikkgyűjteményben Szalai Sándor és Nagy János írásában. A Budapesti Műszaki Egyetem Mikrohullámú Tanszékén készült a TVS kifestésű tápellátását biztosító egység. A BME mérnökei részt vettek a szondák fedélzeti adatgyűjtő és adattovábbító egységének (BLISZI) fejlesztésében is.

A moszkvai Űrkutatási Intézet vezetésével, a KFKI Atomenergia Kutató Intézet és a nyugatnémet Max-Planck-Intézet (Lindau) szakembereinek közreműködésével készült a PLAZMAG plazmaanalizátor, amely hat érzékelő egységből állt [6]. Egy félgömbszelvény alakú elektrosztatikus spektrométer a Nap irányából (Solar Direction Analyzer, SDA), egy hasonló analizátor (Cometary Ram Analyzer, CRA) az üstökösmag irányából érkező pozitív ionokat észlelte. A $38^\circ \times 30^\circ$ látószögű SDA-spektrométer 60 (logaritmikus léptékben egyenlő) energiasávban detektálta az 50 eV és 25 keV közötti energiájú napszélionokat. A $14^\circ \times 32^\circ$ látószögű CRA-analizátor 120 energiasávban mérte az üstökösből származó ionokat a 15 eV és 3500 eV közötti tartományban. Mindkét ionspektrométer energiefelbontása $\Delta E/E = 0,055$ volt. A hengerpalátszelvény alakú, $7^\circ \times 7^\circ$ látószögű elektronspektrométer az ekliptika síkjára merőleges irányból érkező elektronokat észlelte a 3 eV – 10 keV energiatartományban. A PLAZMAG-berendezés része volt két fékezőpotenciál-analizátor (Faraday-kalitka), amelyek közül a $84^\circ \times 84^\circ$ látószögű SFC a Nap irányából érkező teljes ionfluxust mérte, a $25^\circ \times 25^\circ$ látószögű RFC az üstökösmag irányából érkező ionfluxuson kívül a semleges részecskeáram intenzitását is mérni tudta. Magyar kutatók készítették a PLAZMAG-berendezés elektronikáját, majd részt vettek az adatok feldolgozásában és értelmezésében is.

A KFKI RMKI irányításával készült az energikus (a PLAZMAG-berendezéshez viszonyítva nagyobb energiájú) töltött részecskéket mérő TÜNDE-spektrométer, amely a pozitív ionokat a 40–630 keV energiatartományban észlelte az üstökös közelében [7]. Az energiefelbontás 490 keV alatt 10 keV, felette 20 keV volt. A berendezés alkalmas volt nagyobb energiájú elektronok és pozitív ionok mérésére is. A műszer elektronikáját magyar kutatók fejlesztették, a szilíciumdetek-



2. ábra. A VEGA-1 hamis színezésű felvételei az üstökös magról különböző távolságokból: felül közeledéskor (bal oldalon 22 000 km, jobb oldalon 12 000 km), alul bal oldalon 9300 km (a legnagyobb megközelítés körül), alul jobb oldalon távolodáskor 23 000 km. A színek kéktől vörös felé a növekvő fényintenzitást jelölik [2].

torokat tartalmazó két teleszkóp szovjet és nyugat-német szakemberek közreműködésével készült. A teleszkópok tengelye az ekliptika síkjában feküdt, a látószög egy 50° nyílásszögű kúp volt. Az üstökös közelében fontos méréseket végző teleszkóp a Nap irányára merőlegesen, a szonda haladásával közel ellentétes irányba nézett.

Szegő Károly aktív tagja volt mind a három magyar közreműködéssel készült berendezés munkacsoportjának. A misszió kezdeti szakaszától részt vett a feladatok koordinálásban, a műszerek építésének felügyeletében, az üstökösök tanulmányozásával kapcsolatos elméleti felkészülésben, végül a VEGA-szondák által mért adatok feldolgozásában és értelmezésében is. Szerzője, illetve társszerzője lett számos tudományos publikációnak, amelyek a VEGA-szondák észleléseit használták fel.

Magyar részvétel a képfeldolgozásban

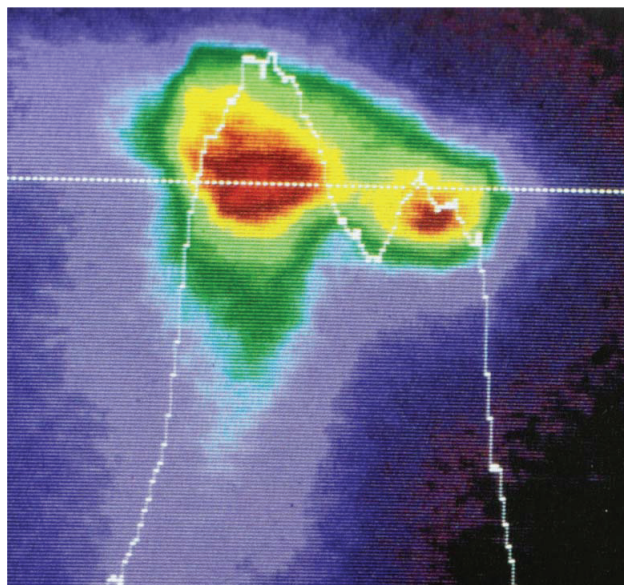
Már két hónappal a Giotto- és a VEGA-űrszondák üstökösrel történt sikeres találkozási után publikáltak néhány képet a magról a *Nature* folyóirat 1986. május 15-i 321/6067. számában. A három szonda által készített összes felvétel feldolgozása azonban hosszú ideig tartott, végül az ESA 1995-ben adta ki a legjobb felvételeket. Ez a kétkötetes monográfia (*ESA SP-1127*) méltó lezárása volt a Halley-üstökös kutatására szerveződött nemzetközi, űrügynökségeket ösz-

szefogó együttműködésnek, amely az 1980-as évek elején kezdődött. A 2. kötetben a VEGA-misszió különböző fázisaiban részt vevő kutatók bemutatták a képalkotó berendezéseket, azok kalibrálását a földön és az űrben, irányítását a repülés során, valamint az alkalmazott képfeldolgozási eljárásokat és azok eredményeit is.

A VEGA-szondák az üstökös mag mellett elhaladva több mint hetven felvételt készítettek annak környezetéről 50 000 km-nél kisebb távolságból, a Nap-irányhoz képest különböző látószögekből [5]. A két VEGA-szonda üstökös-maghoz közeli észlelései között 3 nap telt el, ez okozta, hogy a két megfigyelési időszakban készült felvételeken a fényintenzitás eloszlása nagyon különböző képet mutatott. A 2. ábra [2] mutatja a

VEGA-1 négy hamis színezésű felvételét, amelyek az üstökös-maghoz legközelebb töltött körülbelül 9 percen készültek. A bal oldali alsó kép 9300 km távolságban készült, néhány másodperccel a legnagyobb megközelítés előtt. A színek a fényerősséget jelzik, külön méretarány található mindegyik kép alatt. A 3. ábrán [2] látható a VEGA-2 8300 km távolságból készült felvétele a magról, amely jelentősen eltér a VEGA-1 által

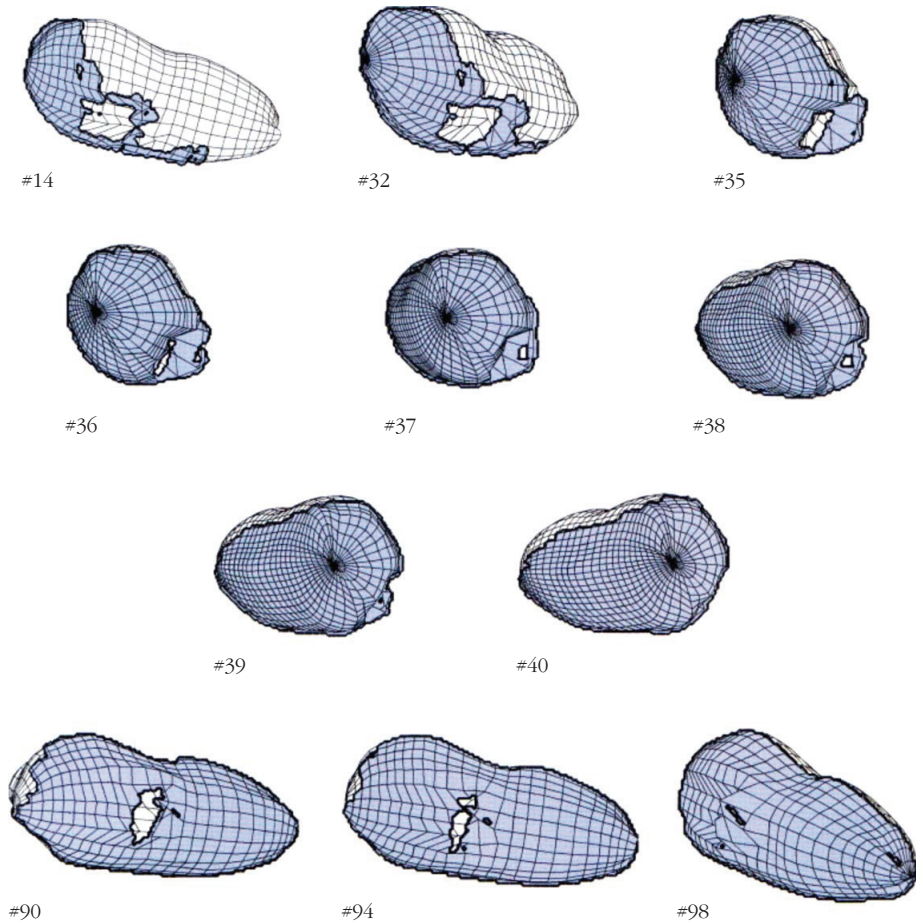
3. ábra. A VEGA-2 hamis színezésű felvétele 8300 km távolságból. A színek kéktől vörös felé a növekvő fényintenzitást jelölik. A fehér görbe a szaggatott egyenes mentén mért teljes fényerőt mutatja [2].



látott képtől. A felvételek első elemzési szakaszában megállapították, hogy az üstökös magja szabálytalan burgonya alakú, amely forog és leghosszabb tengelye közelítőleg a szonda felé irányult a VEGA–1 találkozásnál, míg a VEGA–2 inkább a hossz-tengely mentén haladt [5].

Az üstökös mag közelében készült felvételeken a mag felszínéről sugárirányban kiáramló porfelhők látszanak a legfényesebbnek a porszemcséken történő erős fényszóródás miatt. A 3. ábrán egy lefelé irányuló porkilövellés által okozott fényintenzitás-növekedés látszik. A mag kontúrja egy-egy kép alapján nem határozható meg, mivel a napsütötte oldalon a mag felszíne és peremvonalai a fényes porfelhők miatt alig láthatók, míg az árnyékos oldalon a sötétségbe vesznek. Ezért az üstökös mag alakjának pontosabb meghatározása modellszámítások segítségével történt. A tudományos eredményeket Szegő Károly foglalta össze az ESA-monográfia 2. kötetében megjelent írásában [8].

Az üstökös mag kontúrvonalainak megtalálása fontos kiindulópont volt a mag alakjának és méretének meghatározásához. Első lépésként a kutatók kiválasztottak 63 magközei felvételt, amelyeket a VEGA–1 szonda különböző látószögekből készített. Az első és az utolsó felvétel közötti látószög különbsége körülbelül 160° volt, közelítőleg szimmetrikusan a mag leghosszabb tengelyére. A napsütötte peremvonalak és az árnyékhatárok helyzetét körülbelül 0,5 km pontossággal sikerült meghatározni, ha azokat nem fedte el fényes porfelhő. A mag alakjának rekonstruálása céljából egy 1000 felszíni pontot tartalmazó hálómódellet illesztettek a képekre. Ezután az így kapott modellt a VEGA–2 által a maghoz nagyon közel készített három felvétellel hasonlították össze, amelyek 70° -os látószögtartományban készültek. Végül egy Giotto-képen is tesztelték a modellt, feltételezve, hogy a mag forog az alábbiakban részletezendő módon. A 4. ábra [8] mutatja a mag háromdimenziós modelljét a VEGA–1 63 felvétele közül nyolc pozícióból, valamint a VEGA–2 három magközei helyzetéből nézve. Az összes felvételre legjobban illeszkedő hálómódellet a mag méretére a



4. ábra. A Halley-üstökös magjának háromdimenziós modellje, ahogyan a két VEGA-szonda különböző távolságokból láthatta. A napsütötte részek a sötétebbek. A felső sorban a VEGA–1 közelítésekor #14: 33 398 km, #32: 10 500 km, #35: 8904 km; a 2–3. sorban a VEGA–1 távolodásakor: #36: 8943 km, #37: 9297 km, #38: 9809 km, #39: 10 327 km, #40: 11 412 km. Az alsó sorban a VEGA–2 legközelebb: #90: 8030 km, távolodáskor #94: 11 038 km, #98: 16 462 km [8].

következő értékeket adta: hossza a három fő tengely irányában $15,3 \times 7,2 \times 7,22$ km, térfogata 365 km^3 . A hosszúka alakú mag két végének átmérője különbözik, a vastagabb széle mellett volt a VEGA–1 szonda pályájának üstököshöz legközelebbi pontja.

A magfelület albedóját a találkozótól a Jupiterről készült felvételekkel történt összehasonlítás útján állapították meg $0,04 (+0,02, -0,01)$ értékekben [8]. Az albedóra kisebb, a mag méretére viszont nagyobb értéket kaptak az előzetesen vártnál, ez egyezik a geometriai keresztmetszet és az albedó szorzatára vonatkozó adattal, amely ismert volt már a találkozótól előtt. A mag felülete semleges színűnek, de inhomogénnek látszott. A VEGA-szondák által készített képek alapján négy, a felületből kiemelkedő alakzatot lehetett azonosítani, magasságuk körülbelül 100 m, vízszintes kiterjedésük 1 km körül lehetett. Ezek a kiemelkedések a 4. ábra modellképein is láthatók.

Az üstökös mag forgását sok kutató vizsgálta, és részben egyező, részben egymásnak ellentmondó eredményekre jutottak [8]. Az 1910-ben készült képeken látható porkilövedések görbületének alapján feltételezték, hogy a mag direkt (az üstökös pálya

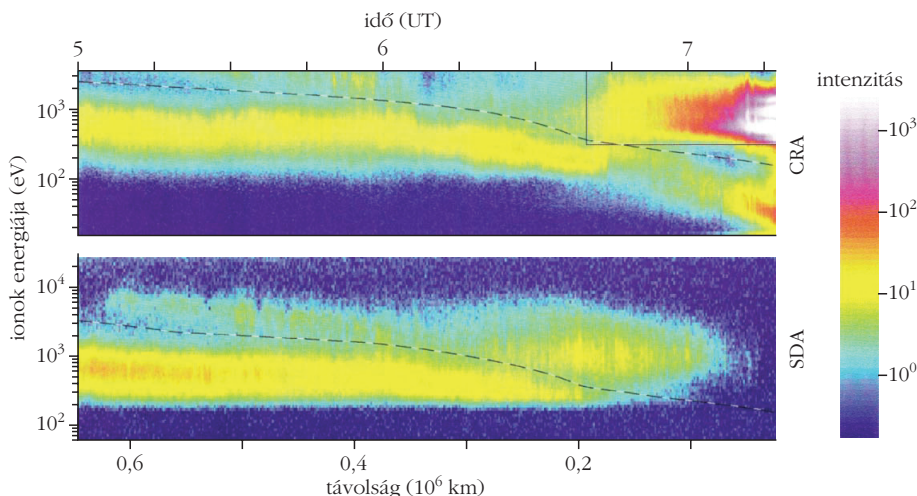
menti mozgásával ellenkező) irányban forog körülbelül 2,2 nap periódussal. Ezt az értéket az üstökös 1986-os visszatérésekor több kutatás megerősítette, míg más vizsgálatok körülbelül 7,4 napos periodicitást találtak földfelszínről mért adatokban. Magyar kutatók egy $16 \times 8 \times 7$ km méretű tehetetlenségi ellipszoidra vonatkozó forgási egyenletek megoldása útján arra a megállapításra jutottak, hogy a mag többféle mozgást végez: 2,24 napos periódussal forog a legkisebb tengelye körül, miközben a leg-hosszabb tengely mentén forog és billeg fel-le 7,66 napos periódussal [8, 9].

A mag anyagának sűrűségére többféle becslés született, Szegő Károly [8] a VEGA-adatok alapján az 1 g/cm^3 körüli értéket tartotta a legjobb közelítésnek, ami megfelel Whipple korábbi „piszkos hógolyó” modelljének (lásd Tóth Imre írását ebben a számban).

Magyar részvétel a plazmafizikai kutatásokban

Az üstökös mag felszínéről 1 km/s körüli sebességgel kilépő semleges részecskék nagy távolságba eljuthatnak. Miután ezek a protonoknál nagyobb tömegű molekulák ionizálódnak, felgyorsulnak a napszél által hordozott mágneses tér hatására, és beépülve a napszéláramba lassítják azt. A magyar közreműködéssel készült töltött részecske-detektorok az üstökös magtól már több millió km távolságban észleltek az üstökösből származó ionokat. A TÜNDE-berendezés az üstökös felé haladva körülbelül 10 millió km távolságban jelentős intenzitásnövekedést mért az 50–60 keV energiatartományban, ami az üstökösből származó nehéz ionok jelenlétére utalt. Ezek a fluxusnövekedési csúcsok az üstököshöz közeledve egyre nagyobbakká váltak, majd a 40–50 keV tartományban is növekedett az ionok fluxusa [7].

5. ábra. A PLAZMAG-berendezés üstökös irányú (CRA) és Nap-irányú (SDA) ionanalizátora által mért spektrogramok a VEGA-2 találkozója előtti 2 óra 18 percben. A függőleges tengelyeken az ionok energiája, a vízszintes tengelyeken lent az üstökös magtól mért távolság, fent a világidő. A színek a jobb oldali skála szerint a részecskék számát mutatják [10].



A PLAZMAG-berendezés üstökös irányába néző ionspektrométere (CRA) a magtól körülbelül 6 millió km távolságban észlelt először üstökös eredetű ionokat [6]. A Nap irányába néző analízátor (SDA) mind a két VEGA-szondán zavarokat észlelt a plazmaáramban a magtól 1,1–1,2 millió km távolságban, miközben a napszél sebessége csökkent. Ekkor haladtak át a szondák a fejhullámon, ahol a paraméterek nem ugrásszerűen, hanem fokozatosan és fluktuációkkal zavartan változtak meg. Ezt egyrészt a napszélbe beépülő nehéz ionok hatása, másrészt az észlelés helye okozta. Ugyanis a VEGA-szondák az üstökös–Nap iránytól körülbelül 110° -kal elhajló pályán közeledtek a maghoz, ezért a terminátor síkja mögött haladtak át a közelítőleg paraboloid alakú fejhullámon, amely itt sokkal messzebb volt a magtól, és szélesebb átmeneti tartományként jelentkezett, mint a nappali oldalon. Kifelé haladva, a hasonlóan zavart fejhullám a maghoz közelebb volt észlelhető, mivel ez az átmenet a nappali oldalon történt (zenitszög körülbelül 70°). A TÜNDE-berendezés a fejhullám körüli több százezer km széles tartományban észlelte a legkiemelkedőbb csúcsokat az energikus részecskék intenzitásában [7].

A fejhullámon belüli tartományban a PLAZMAG-berendezés mindkét analízátora észlelte a lelassult és felmelegedett napszél energiaspektrumait. Az 5. ábra mutatja az üstökös irányú CRA- és a Nap-irányú SDA-ionanalizátorok által mért spektrogramokat a VEGA-2 találkozója előtt 1986. március 9-én 5 órától, amikor a szonda az üstökös magtól körülbelül 650 ezer km távolságra volt [10]. A szaggatott vonal alatti energiatartományban a napszélből származó ionok láthatók, a magasabb energiákon a nehezebb, üstökös eredetű ionok. 6 óra 45 perc körül, a magtól körülbelül 160 ezer km távolságban az üstökösionok száma hirtelen megnövekszik a CRA mérései szerint, a napszél ionjai pedig viszonylag gyorsan eltűnnek mindkét analízátor látómezéből.

Látszólag egy viszonylag vékony átmeneti réteg választja el a külső, napszél által dominált tartományt a belső térrésztől, ahol már az üstökös eredetű ionok vannak többségben. Mivel a Giotto-szondán fokozatosabb átmenetet észleltek, a gyorsabb változás oka az lehetett, hogy a 3 tengelyre stabilizált szondán a két analízátor látószöge nem fedte le a Nap iránya és az üstökös iránya közötti teljes térszöveget, ezért nem észlelheték a teljes ionpopulációt.

A CRA-spektrum jobb felső sarkában bekeretezett tartományban jól látszik, hogy a maghoz közeledve egyre több

a maghoz képest alig mozgó ion, amelyek csak a szondához viszonyítva mozogtak. 400 eV és 600 eV között a vízcsoporthoz tartozó ionok okozták az intenzitásmaximumot, magasabb energiákon a szén-monoxid, szén-dioxid, sőt még nagyobb tömegű ionok csoportjai is megkülönböztethetők. A találkozót megelőző utolsó percekben a 30 eV körüli intenzitásnövekedést a néhány km/s sebességű protonok okozták, amelyek feltehetően nagyrészt az üstökösből származtak. A fejhullámtól a mag felé haladva a TÜNDE-berendezés egyre csökkenő számú energikus részecskét mért, csak a mag közelében volt lokális intenzitásnövekedés [7].

A PLAZMAG-berendezés üstökös irányába néző fékezőpotenciál-analizátora mérni tudta a semleges részecskék intenzitását. Az üstökös felé haladva észlelt részecskeszám-növekedésből – bizonyos feltételezésekkel – ki lehetett számítani az üstökös gázki-bocsátási mértékét. A VEGA-1 mérései alapján a magból kilépő semleges részecskék számára kapott bec-sült érték $1,3 \cdot 10^{30}$ molekula/másodperc volt [6].

A VEGA-misszió lezárása

Az üstökössel való sikeres találkozásuk után a VEGA-szondák befejezték küldetésüket, bár a tudományos berendezések egy része működőképes maradt a találkozás után is. A tévékamerával felvételt is készítettek a Jupiterről tesztelés céljából. A részlegesen sérült nap-elemek használhatók voltak, maradt elég üzemanyag is, de nem találtak a szondáknak olyan további célpon-tot, amellyel érdemes lett volna folytatni a VEGA-misz-sziót [2]. A PLAZMAG napszélionokat észlelő detektora a találkozás utáni hónapokban is szolgáltatott hasznos mérési eredményeket a bolygóközi térből. 1986. ok-tóberben érkeztek az utolsó adatok a VEGA-1-ről.

A VEGA-szondák küldetése a tudomány és a Nap-rendszer kutatása történetében valóban úttörő jelen-tőségű űrprogram volt, hiszen először sikerült lefény-képezni egy üstökös magját, és tanulmányozni lehetett annak közvetlen környezetét a kóma belsejében. Az űrkutatás történetében első alkalommal vezéreltek űr-szondákat a fedélzeten történő képfeldolgozás alap-ján. A szondák által gyűjtött adatokból számos publi-káció született a következő évtizedekben.

1986. augusztus 19-én a VEGA-program hat magyar szakmai vezetője a program előkészítésében és sike-res végrehajtásában való magyar részvételért Állami Díj kitüntetésben részesült (6. ábra). A Központi Fizi-kai Kutató Intézet főigazgatója Szabó Ferenc, a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézetének igazga-



6. ábra. Az 1986. augusztus 19-én Állami Díjjal kitüntetettek az ünnepség után. Balról: Szabó László, Szabó Ferenc, Szalai Sándor, Szegő Károly, Apáthy István és Hetényi Tamás (MTI Fotó: Wéber Lajos).

tója Szegő Károly, valamint a KFKI RMKI műszaki igazgatóhelyettese Szabó László tagja volt a VEGA-missziót irányító Nemzetközi Tudományos és Techni-kai Bizottságnak. Elsősorban ők voltak felelősek a magyar kutatóhelyeken készült tudományos berende-zések határidőre történő elkészítéséért megfelelő mi-nőségben. Szalai Sándor az RMKI kutatójaként a TV-rendszer, Apáthy István az Atomenergia Kutató Inté-zet kutatójaként a PLAZMAG-berendezés fejlesztésé-nek vezető mérnöke volt. A BME Mikrohullámú Tan-szék Űrkutató Csoportjának laborvezetője Hetényi Tamás vezette a VEGA-űrszondák adatgyűjtő rend-szerének fejlesztését. A VEGA-misszióban résztvevő több magyar kutató 1987-ben a KFKI-ban Jánossy-dí-jat, 1988-ban magyar–szovjet tudományos együttmű-ködési díjat kapott.

Irodalom

1. T. I. Gombosi: Manifesto of a space scientist. *Perspectives of Earth and Space Scientists* 3/1 (2022) <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022CN000174>
2. R. Z. Sagdeev: The Vega mission to Halley's comet. *ESA Monograph SP-1127: Images of the Nucleus of Comet Halley*. (1995) 12–19., ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands
3. <https://www.upi.com/Archives/1986/03/06/The-Soviet-spaceship-Vega-1-fulfilled-its-destiny-today-penetrating/7709510469200/>
4. Szegő K., Tóth I.: A VEGA program. *Fizikai Szemle* 35/7 (1985) 241–249.
5. R. Z. Sagdeev et al.: Television observations of comet Halley from Vega spacecraft. *Nature* 321/6067 (1986) 262–266.
6. K. I. Gringauz et al.: First in situ plasma and neutral gas measurements at comet Halley. *Nature* 321/6067 (1986) 282–285.
7. A. J. Somogyi et al.: First observations of energetic particles near comet Halley. *Nature* 321/6067 (1986) 285–288.
8. K. Szegő: Discussion of the scientific results derived from the near-nucleus images. *ESA Monograph SP-1127: Images of the Nucleus of Comet Halley*. (1995) 68–80., ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands
9. L. Földy, K. Szegő, I. Tóth: On the rotation of comet Halley. *Preprint KFKI (1990-26C)*.
10. M. Tátrallyay, K. Szegő, M. I. Verigin, A. P. Remizov: Cometopause revisited. *Advances in Space Research* 16/4 (1995) 435–439.

EGY ÜSTÖKÖS HÁBORGÓ PLAZMAKÖRNYEZETE

– ROSETTA-EREDMÉNYEK

Németh Zoltán, Timár Anikó
Wigner Fizikai Kutatóközpont

Az üstökösök kutatásának új lendületet adott az ESA Rosetta üstökös-kutató űrmissziója, amely korábban elérhetetlen megfigyelésekkel és felfedezésekkel gazdagította ismereteinket. Az űrszondát 2004-ben indították és 2014-ben érte el célját, a 67P/Churyumov–Gerasimenko üstökösöt (röviden 67P), majd egészen 2016 őszéig követte azt. A Rosetta-küldetés előtt csak úgynevezett „flyby” missziók látogattak meg üstökösöket. Ezek esetében az űrszonda nem fékez le és áll pályára az égitest körül, hanem óriási sebességgel halad el mellette, így egy ilyen űrszonda mindössze néhány perces pillanatfelvételt tud készíteni egy üstökös-mag környezetéről. A Rosetta-űrszonda ezzel elmentben a világon elsőként pályára állt egy üstökös-mag körül, és elsőként követte végig az üstökös fejlődését, az aktivitási ciklus kezdetétől a végéig. Ez lehetőséget biztosított arra, hogy részleteiben és az időbeli fejlődést is követhetjük vizsgáljuk egy üstökös-magnetoszféra szerkezetét, valamint a szerkezetet kialakító és befolyásoló kölcsönhatásokat. Hétköznapi analógiával megvilágítva ez olyan, mintha korábban csak onnan ismertünk volna egy várost, hogy vonaton keresztül robogtunk rajta; most viszont hónapokra letelepedtünk ott, azzal a kifejezett céllal, hogy minden titkát részleteiben megismerjük. A Rosetta bejárta az üstökös-magnetoszféra különböző tartományait, hogy feltérképezze annak térbeli szerkezetét. Mi több, hosszan, illetve ismétlődve vizsgálta az egyes tartományokat, hogy az időbeli változásokról is képet nyer-

hessünk. Ugyancsak a Rosetta-küldetéshez kötődik az emberiség történetének első landolása egy üstökös-mag felszínén. A Philae leszállóegység a különleges leszállási manőverrel, majd az azt követő egyedülálló felszíni mérőszorozattal szintén történelmet írt. Jelen írásban az üstökös magnetoszférájával kapcsolatos új felfedezésekbe igyekszünk rövid betekintést nyújtani, bemutatva néhány érdekes plazmatartományt és azok űridőjárási hatásokra adott válaszát, a Rosetta megfigyeléseinek tükrében.

A Rosetta egy komplett plazmaműszer-csomagot (magnetométert, ion-, elektron- és plazmahullám-detektorokat [1]) vitt magával, és nagy időbeli felbontású helyszíni méréseket szolgáltatott az üstökös környezetéről. Az eredmények egyfelől erre az egyedülállóan átfogó és pontos adathalmazra támaszkodnak, amelynek felhasználásával egymással párhuzamosan elemezhető a mágneses tér, termikus plazma, energikus ionok és energikus elektronok eloszlása és tulajdonságai az üstökös környezetében. Az adatbázis kiegészül továbbá a semleges gáz tulajdonságait vizsgáló [2] műszer méréseivel, valamint a szonda pozíciójára és orientációjára vonatkozó kiegészítő adatokkal is. Mindezen adatsorok együttes vizsgálata természetesen lényegesen bonyolultabb, mintha csak egy-egy műszer adataira támaszkodnánk, de így sokkal teljesebb képet kaphatunk az üstökös környezetében lezajló plazmajelenségekről.

Az üstökös-magnetoszféra a bevezetőben említett indukált magnetoszférák egyik altípusa, de ezen a kategórián belül több szempontból is különleges. Egyfelől az aktív üstökös légköre rendkívül kiterjedt; különösen a többnyire kisméretű üstökös-maghoz képest. Másfelől ez a légkör rendkívül sok port is tartalmaz, amit az üstökös felszínéről feltörő gázok magukkal ragadnak, és a szökési sebességnél nagyobb sebességre gyorsítanak. Harmadik furcsaságában az üstökös-légkör leginkább a Nap légkörére hasonlít, amennyiben nem sztatikus, hiszen a mag rendkívül gyenge gravitációja nem képes megtartani a körülötte kifejlődött légkört. Ehelyett a mag közelében a magból kiinduló, folyamatos, nagy sebességű radiális kiáramlás a jellemző, azaz a légkör dinamikus. Míg a sztatikus légkörökre az jellemző, hogy a felszíntől távolodva a sűrűség nagyon gyorsan csökken, eltűnik (lecsengése exponenciális jellegű), addig ebben a radiális áramlásban a sűrűség viszonylag lassan, a távolság négyzetével csökken. Ez annak felel meg, hogy egy gömb alakú héjban található gázmennyiség ugyanannyi



Németh Zoltán 1995-ben végzett az ELTE fizikus szakán, doktori fokozatát 2000-ben szerezte meg. 1998-tól az MTA KFKI RMKI munkatársa, jelenleg a Wigner FK Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának vezetője. Az óriásbolygók és az üstökösök magnetoszféráját, valamint az űridőjárás egyes kérdéseit kutatja. Részt vett a Cassini- és a Rosetta-űrmissziók tudományos együttműködésében.



Timár Anikó, geofizikus, doktori fokozatát az ELTE-n szerezte 2021-ben, disszertációjában a napszél eredetű hatásokat vizsgálta a 67P/Churyumov–Gerasimenko-üstökös környezetében, a Rosetta-űrszonda méréseinek alapján. Jelenleg a Wigner FK Részecske és Magfizikai Intézetének tudományos munkatársa, kutatása során a napszél és a naprendszerbeli égitestek közti kölcsönhatást vizsgálja. Emellett a napszél tulajdonságait modellek segítségével elemzi, és jelzi előre az égitestek környezetében.

marad akkor is, amikor a gömb a kiáramlás során többszörösére fúvódik föl. Ehhez az szükséges, hogy a sűrűség a gömbhéj felszínével fordított arányosságban álljon – innen a négyzetes lecsengés. (A radiális függést némileg módosítják még egyéb hatások is, de a négyzetes lecsengéstől való eltérés a legtöbb üstökös esetében elhanyagolható a mag közelében.) A 67P-üstökös esetében a gáz kiáramlásának sebessége jellemzően 700–1300 m/s (2500–4700 km/h) között volt, ami a mindennapjainkban tapasztalt sebességekhez képest igen magas, kozmikus körülmények között viszont inkább lassúnak számít.

Az üstökös légkörének furcsaságai jelentősen befolyásolják az üstökös magnetoszférájának szerkezetét. A legérdekesebb hatást talán az állandó radiális gázkiáramlás hozza létre: egy, a Naprendszerünkben egyedülálló képződményt, a diamágneses üreget. Mint a bevezetőben említettük, a változó mágneses tér nem szeret behatolni a vezető közegekbe. Ez ugyanaz a jelenség, ami egy villanymotor forgó mágneses terében megforgatja a forgórész tekercseit; az erővonalak, ahelyett, hogy behatolnának a huzalokba, inkább maguk előtt tolják azokat. Ha azonban a vezető nem teljesen ideális (azaz elektromos ellenállása van), a mágneses tér lassan, de mégis áthalad a vezetőn. Ez a villanymotor esetében energiavesztést jelent, az indukált magnetoszférák esetében pedig azt, hogy a napszél által hordozott bolygóközi mágneses tér el tudja érni az égitest felszínét. Így még a saját mágneses tér nélküli égitestek felszínén is (sőt mindenütt a Naprendszerben) jól mérhető mágneses teret találunk. Ezalól az egyetlen kivételt az aktív üstökösök diamágneses ürege jelenti. (Laboratóriumokban, nagy nehézségek árán mesterségesen létre lehet hozni hasonlóan alacsony tereket, de természetes körülmények között sehol máshol nincs ilyen.) Egy diamágneses üregegen belül a mágneses tér mérési hibán belül nulla. Felmerül a kérdés, hogyan jöhet létre ilyen tartomány a természetben?

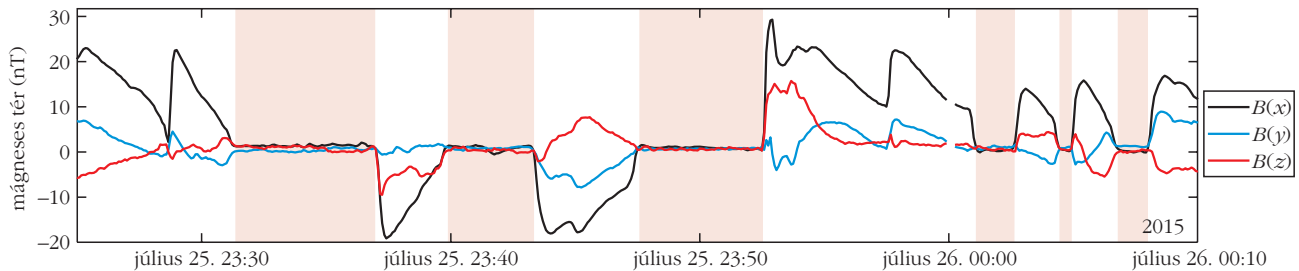
A jelenség megértésének kulcsát az üstökös-légkör folyamatos radiális kiáramlása jelenti. Mivel a kiáramló gáz részlegesen ionizált, vagyis elektromosan vezető, kölcsönhatásba lép a napszél mágneses terével, kifelé tolja azt. Annak ellenére, hogy a mágneses tér lassan bediffundál a vezető közegbe, a mágneses erővonalak mégsem jutnak közelebb a maghoz, mivel a vezető közeg eközben folyamatosan távolodik az üstökös-magtól. Az erővonalak befelé mozognak a kifelé mozgó anyaghoz képest. Egy bizonyos távolságban a két hatás kioltja egymást, és kialakul egy határfelület, amelyen a mágneses tér nem tud áthaladni. A képet bonyolítja, hogy az üstökös-légkör ionizált részének kiáramlási impulzusa önmagában nem lenne képes egyensúlyt tartani a mágneses teret befelé kényszerítő erővel. Mintha egy ejtőernyőst egy hajszártó légsugarával szeretnénk a levegőben tartani – ez egyszerűen nem elég erős. Szerencsére az ionoknak csak közvet-

tő szerepe van, azért kellene, hogy mintegy „beleakadjanak a mágneses erővonalak hálójába”, a szükséges impulzust valami más biztosítja. A mágneses térrel való kölcsönhatás miatt az üstökös irányából érkező ionok a határfelületnél lelassulnak. Mivel a lelassult ion már nem mozog együtt a kifelé áramló semleges légkörrel, megnő annak esélye, hogy a továbbra is kifelé haladó semleges atomok összeütközzenek az ionokkal. (Hasonlóan ahhoz, mintha egy autó hirtelen állóra fékezne egy nagy sebességgel haladó forgalomban.) A semleges atomokkal való ütközések kifelé kényszerítik az ionokat, míg a mágneses tér befelé nyomja őket. E két hatás egyensúlya az, ami meghatározza a diamágneses üreg méretét.

A diamágneses üreget először a Halley-üstökös körül figyelték meg, amikor a Halley legutóbbi, 1986-os visszatérésekor űrszondák serege haladt el a közelében. A feltucat szondából azonban csak egy jutott olyan közel az üstökös magjához, hogy felfedezze a diamágneses üreget. Az óriási relatív sebesség miatt mindössze 2 percig tudta megfigyelni, mielőtt túlságosan eltávolodott volna a magtól [3]. A Rosetta-misszió egyik fontos célja volt annak eldöntése, hogy a Halley-üstökösnél lényegesen alacsonyabb aktivitású 67P üstökös körül is kialakul-e diamágneses üreg, és ha igen, kiemelt feladat volt annak alapos tanulmányozása is. Sokáig félő volt azonban, hogy ez nem fog sikerülni, mivel a Rosetta nem tudta tetszőleges mértékben megközelíteni a magot. Ennek egy nem várt nehézség volt az oka, ugyanis az aktivitás növekedtével a mag közelében a porszemcsékről visszaverődő fény annyira zavarta a Rosetta navigációt segítő csillagkövető rendszerét, hogy a szondát a magtól viszonylag távol kellett tartani. Az előzetes elméleti és numerikus modellek többsége azt jósolta, hogy a diamágneses üreg határa ennél a távolságnál beljebb, a maghoz közelebb húzódik.

A tudományos közösség nagy meglepetésére és örömére azonban az űrszonda magnetométerének 2015 nyarán mért adatait elemezve a kutatók találtak egy majdnem félórás időszakot, amikor a mágneses tér minden komponensének értéke nullára esett. A felfedezést követő pontosabb elemzések azt mutatták, hogy ebben az időszakban a Rosetta valóban a diamágneses üregegen belül tartózkodott [4]. Az első feltételezések szerint az aktivitás hirtelen, lokális megnövekedése (egy robbanásszerű felszíni gázfelszabadulás) miatt az üreg rövid időre felfúvódott, és így vált lehetségessé a megfigyelés.

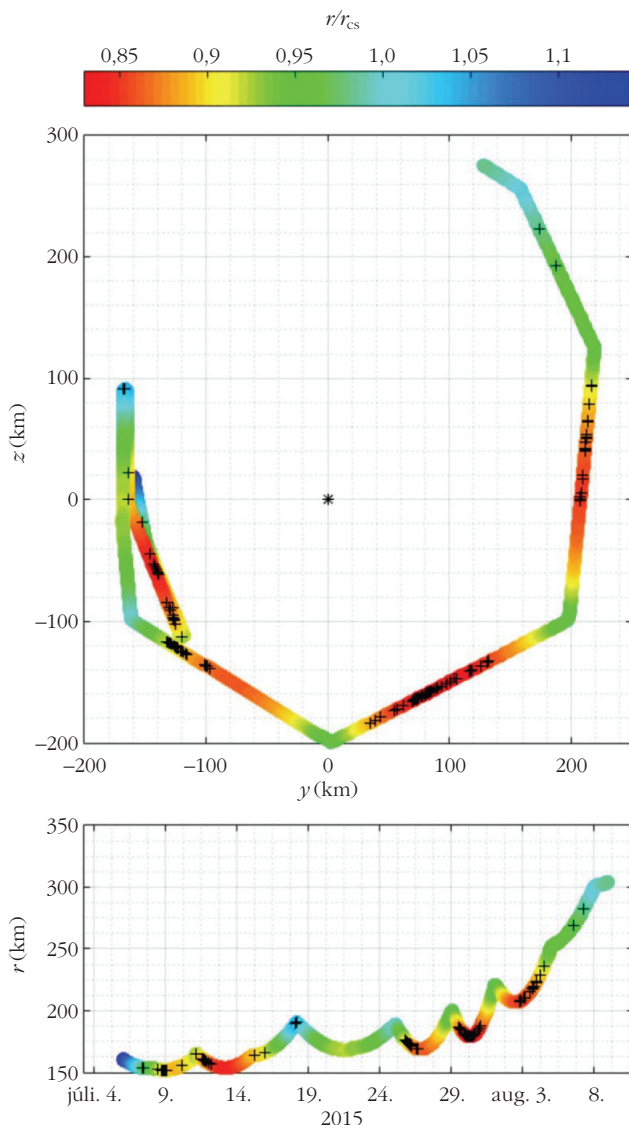
Habár a magnetométer e rövid időszakot eltekintve nem mutatott nulla közeli értéket, kollégáinkkal tanulmányozni kezdtük a diamágneses üreg egyéb (nem mágneses) jellemzőit, például, hogy a megfigyelt ion- és elektronpopulációkban milyen eltérések látszanak az üreg határán áthaladva. Éles, jól elkülöníthető változásokat találtunk, és azt, hogy a 2015 nyarán végzett mérések tele vannak olyan rövid, néhány perces idő-



1. ábra. A Rosetta űrszonda magnetométerének mérései a diamágneses üreg környezetében. A fekete, kék és piros vonalak a mágneses tér kalibrált x , y és z komponensét mutatják. Az ábrán látható, ahogy a mágneses tér komponenseinek értéke a diamágneses üreg belsejében (halványpirossal árnyékolt időszakok) nullára csökken.

szakokkal, amelyekben a részecskeadatok a diamágneses üregre jellemző tulajdonságokat mutatják. Alaposan megvizsgálva a mágneses térre vonatkozó adatokat,

2. ábra. A Rosetta-űrszonda pályájának egy szakasza (színes vonal) a 67P-üstökös (fekete csillag) körül. A vonal színe azt mutatja, hogy a modell szerint a Rosetta mekkora valószínűséggel tartózkodott a diamágneses üregben: minél pirosabb a vonal, a valószínűség annál nagyobb. A fekete + jelek a diamágneses üregeken történt, a Rosetta által észlelt áthaladásokat jelzik.



ezekben a rövid időszakokban azt találtuk, hogy a tér minden komponense egy állandó értékre áll be (eltűnik a mágnesestér-mérésekre egyébként jellemző változékonyság), és ez az állandó az egymáshoz közeli események esetében lényegében megegyezik. Azaz, ezekben a közeli tartományokban a magnetométer ugyanazt az állandó értéket mutatja!

Egy mélyűri kutató űrszonda magnetométere rendkívüli pontosságú, érzékeny műszer. Az űrszonda elektromos berendezéseinek áramai által keltett terek, vagy akár a legkisebb mágneses szennyeződés is megzavarhatja a jeleket. Ezekre a zavarokra a műszer kalibrálni kell. Az űrszonda mágneses konfigurációja azonban megváltozhat a hőmérséklet eloszlásának változásai miatt, a fedélzeten bekövetkező elmozdulások, vagy akár a berendezések működési módjának megváltozása miatt. Így a műszer nulla szintjének megállapítása nagyon komoly modellezést és számításokat igénylő feladat. Kiderült, hogy a részecskeadatok vizsgálata alapján megtalált 127 furcsa esemény során mért mágneses tér ilyen, lassan változó zavar volt [5]. Gondos újrakalibrálás után bebizonyosodott, hogy az űrszonda ezen események során is a diamágneses üregben tartózkodott. Az újrakalibrált adatok segítségével további eseményeket lehetett azonosítani, és a Rosetta a teljes misszió során több mint 600 diamágnesesüreg-áthaladási eseményt talált [6]. Az 1. ábra azt mutatja, hogyan jelennek meg ezek az események a már kalibrált mágnesestér-mérésekben. A halványpirossal árnyékolt időszakok jelzik az eseményeket; látható, hogy ezekben a mágneses tér mindhárom komponensének értéke nullára csökken.

A Rosetta megfigyeléseiből két nagyon meglepő eredményre derült fény: egyrészt, a diamágneses üreg nagyobb a vártnál, másrészt pedig rendkívül dinamikus. Ahelyett, hogy csak egyszer haladt volna át a határán, a Rosetta sok százszor és nagyon gyorsan (akár másodpercek alatt) keresztezte a határfelületet. Felmerül a kérdés: mi okozza ezt a rendkívül dinamikus viselkedést?

Amit azonnal meg lehet válaszolni, az az, hogy mi nem. Nem okozhatta az űrszonda mozgása. A Rosetta a kérdéses időszakban nagyon lassan haladt (mindössze néhány m/s volt a sebessége a maghoz viszonyítva), hosszú ballisztikus pályáíveken, amiket időn-

ként korrigáltak, mert a szonda sebessége még így is túl nagy volt ahhoz, hogy stabil pályára álljon. Ezt a meg-megtörő pályát illusztrálja a 2. ábrán látható színes vonal. A színek a magtól való távolság és az üreg kiterjedését leíró legelső, csupán az üstökös gáztermelési rátáját figyelembe vevő elmélet [5] szerint várt határtávolság arányát mutatja. A vonal mentén fekete „+” jelekkel jelöltük az üregen történt áthaladási eseményeket. Látható, hogy a régi elmélet jóslata abban az üregben, ott nagyobb az esélye az áthaladási eseményeknek. Ez a modell azonban még mindig nem magyarázza meg az üregáthaladások szaggatott jellegét. Tehát a viszonylag lassan változó gáztermelési ráta mellett kellett, hogy legyen egy gyorsan fluktuáló hatás, amely képes lehet kialakítani a pár perces üregáthaladásokat. Kiderült, hogy ez a hatás az űridőjárás, a gyorsan változó paraméter pedig az üstökös körüli napszél dinamikus nyomása. A jelenségkör alapos vizsgálata így arra mutat, hogy a diamágneses üreg folyamatosan lüktet, felfúvódik, illetve leereszt a napszél külső nyomásának változásai hatására. Míg a határfelületre belülről, az üstökös felől ható erő csak lassan változik az üstökös aktivitásával arányosan, a külső napszél tulajdonságai nagyon gyorsan megváltozhatnak (az űridőjárás változékony). Az üreg tehát úgy viselkedik, mint egy lezárt lufi viselkedne, ha a külső nyomást erőteljesen és gyorsan változtatnánk körülötte. A napszél nyomást is figyelembe vevő modell már pontosan leírta a diamágneses üreg kiterjedését és annak gyorsan változó jellegét [7]. A határtávolság kiszámításának nehézsége ezek után csupán az üstökös körüli napszél nyomás pontos meghatározásában rejlett.

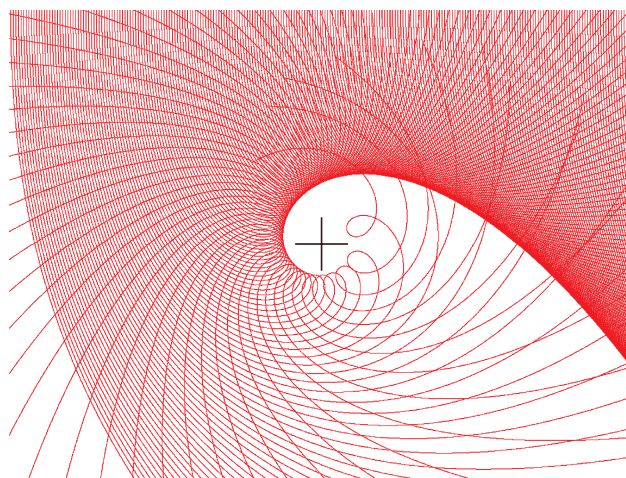
A napszél tulajdonságai, mint a sebesség, sűrűség vagy a nyomás, meghatározó jelentőségű tényezők az űrfizikában, ismeretükkel egy égitest magnetoszférájában bekövetkező változások könnyebben megérthetőek és megmagyarázhatóak. Mivel a Rosetta mélyen az üstökös indukált magnetoszférájában haladt, így ezeket a fontos paramétereket nem tudta közvetlenül megfigyelni. Távoli űrszondák mérései alapján azonban ezek a tulajdonságok hozzávetőleg meghatározhatók, amiből nyilvánvalóvá vált, hogy a diamágneses üreg határán feltorlódott mágneses tér erőssége arányos az üstökös körül jelen lévő napszél nyomásával. Az elkészült pontos modell lehetővé tette, hogy az összefüggést megfordítva is használhassuk, azaz a mágneses tér – Rosetta által, a diamágneses üreg közelében mért – értékeiből a külső nyomást visszafejtsük. Ez a módszer részletes napszél nyomás adatokat szolgáltat az üstökös körül, azokra az időszakokra is, amikor a napszél nem érte el a Rosetta műszereit. A napszél nyomásának ismerete segítséget nyújt különböző űridőjárás-függő hatások vizsgálatához az üstökös magnetoszférájában [8].

Mint láttuk, az üstökös körül létezik egy különleges tartomány, egy olyan üreg, ahova a mágneses tér nem

tud behatolni. Érdekes módon, létezik egy másik üreg is a diamágneses üreg határán kívül, ahová a mágneses tér még igen, azonban a napszél részecskéi már nem tudnak behatolni. Ez az üreg azért alakul ki, mert a diamágneses üreg körül feltorlódott mágneses tér eltéríti a napszél töltött részecskéit. Habár ez az eltérés nagyon nagy is lehet, a szimulációk kimutatták, hogy létezik egy tiltott térrész, amibe az eltérült részecskék közül egyik se juthat be. A Rosetta műszerei kimutatták az eltérült részecskéket, és megtalálták a napszélrészecskéktől mentes üreget is (3. ábra) [9].

Még egy határfelületet érdemes megemlíteni, amely az űridőjárás változásainak hatására szintén felfúvódó-leeresztő (lélegző) mozgást végez. Ez egy meglehetősen vastag héj az üstökös körül, amiben az üstökös eredetű anyagból képződött „visszaszórt” ionok a mag felé haladnak. Ezek az ionok a magtól távol néhány száz km/s sebességre gyorsulnak fel, és kezdik meg visszaújtjukat az üstökös felé. A gyorsítási tartomány valószínűleg a napszélmentes üreg határán helyezkedik el, ahol az üstökös-napszél kölcsönhatás 1000 V nagyságrendű feszültséget hoz létre. (Sajnos ezt a tartományt nem lehetett alaposan megvizsgálni a Rosetta méréseiben, ezért a gyorsítási tartomány mibenléte még kérdéses.) Azonban ezen folyamat eredményét, a mag felé száguldó felgyorsított ionokat jól megfigyelhettük. Ezek nagyon érdekes mintázatként jelennek meg a mérési adatokban, energiájuk folyamatosan változik – előbb megnő, majd lecsökken, megnő, majd lecsökken. Az űrszonda pályájának volt egy olyan szakasza, amikor a magtól távolodó felderítő úton járt. Az ezen időszakban végzett ionmérésekből jól látszik, hogy a felgyorsult ionok energiája a magtól távolodva nő. Alaposabb vizsgálatok – és az űridőjárás változásaival való összevetés – azt mutatják, hogy az ionenergiának a többi időszakban tapasztalt növekvő-csökkenő mintázata annak eredménye, hogy az űridőjárás hatásai az egész

3. ábra. Az ábrán felülről érkező napszélionok eltérülése a (középen + jellel jelzett) üstökös körül feltorlódott mágneses térben. A középen fehérén maradó tartományba a napszél nem juthat be.



magnetoszférát össze tudják nyomni, így a gyorsítási tartomány, ezzel a gyorsabb ionokat tartalmazó térrész a maghoz közelebb kerülhet. Ezen időszakokban a Rosetta nagyobb energiájú ionokat mért. Amikor a külső nyomás lecsökkent, a magnetoszféra kitágult, és az űrszonda újra olyan tartományba került, ahol már csak alacsony energiájú ionok találhatók. Az is érdekes kérdés, hogy a maghoz közeledve miért csökken ezen ionok energiája. Erre többféle magyarázat lehetséges, a legvalószínűbb, hogy a mag felé közeledve az egyre sűrűbb semleges légkör hatásai lassítják vissza a kívül felgyorsult ionokat.

Láthatjuk tehát, hogy a Rosetta-űrszonda egy nagyon változékony, dinamikus magnetoszférát talált a 67P-üstökös körül, ami gyors és látványos változásokkal reagál az űridőjárás változásaira. Az aktív üstökös körül olyan tartományokat és kölcsönhatásokat volt lehetőségünk vizsgálni, amelyek a Naprendszerben sehol máshol nem léteznek, továbbá olyanokat is, amelyek másutt is fontosak, de az üstökös környezetében sokkal erőteljesebb hatással járnak, és ezért lehetőség nyílik a különböző befolyásoló tényezők világos elkülönítésére. Az üstökös vizsgálatával jobban megérthetjük a plazma, por és semleges gáz kölcsönhatásait. Mint a tudományban mindig, az új megfigyelések a megtalált válaszok mellett új kérdéseket szültek, ezért a tudományos közösség izgatottan várja az újabb üstököskutató űrmissziók lehetőségét.

Irodalom

1. Carr, C., Cupido, E., Lee, C. G. Y. et al.: RPC: The Rosetta Plasma Consortium. *Space Sci. Rev.* 128 (2007) 629–647. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9136-4>

2. Balsiger, H., Altwegg, K., Bochsler, P. et al.: Rosina – Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis. *Space Sci. Rev.* 128 (2007) 745–801. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-8335-3>
3. Neubauer, F., Glassmeier, K., Pohl, M. et al.: First results from the Giotto magnetometer experiment at comet Halley. *Nature* 321 (Suppl 6067) (1986) 352–355. <https://doi.org/10.1038/321352a0>
4. C. Goetz, C. Koenders, I. Richter, K. Altwegg, J. Burch, E. Cupido, A. Eriksson, C. Güttler, P. Henri, P. Mokashi, Z. Nemeth, H. Nilsson, M. Rubin, H. Sierks, B. Tsurutani, C. Vallat, M. Volwerk, K.-H. Glassmeier: First detection of a diamagnetic cavity at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Astron. & Astrophys.* 588 (2016) A24. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527728>
5. Zoltan Nemeth, J. Burch, C. Goetz, R. Goldstein, P. Henri, C. Koenders, H. Madanian, K. Mandt, P. Mokashi, I. Richter, A. Timar, K. Szego: Charged particle signatures of the diamagnetic cavity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462 Suppl 1, November 2016, S415–S421. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3028>
6. C. Goetz, C. Koenders, K. C. Hansen, J. Burch, C. Carr, A. Eriksson, D. Frühauff, C. Güttler, P. Henri, H. Nilsson, I. Richter, M. Rubin, H. Sierks, B. Tsurutani, M. Volwerk, K. H. Glassmeier, Structure and evolution of the diamagnetic cavity at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462 Suppl 1, November 2016, S459–S467. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3148>
7. Aniko Timar, Z. Nemeth, K. Szego, M. Dosa, A. Opitz, H. Madanian, C. Goetz, I. Richter: Modelling the size of the very dynamic diamagnetic cavity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469 Suppl 2, July 2017, S723–S730. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2628>
8. Timar, A., Nemeth, Z., Szego, K., Dosa, M., Opitz, A., Madanian, H.: Estimating the solar wind pressure at comet 67P from Rosetta magnetic field measurements. *Journal of Space Weather and Space Climate* 9 (2019) A3.
9. E. Behar, H. Nilsson, M. Alho, C. Goetz, B. Tsurutani: The birth and growth of a solar wind cavity around a comet – Rosetta observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469 Suppl 2, July 2017, S396–S403. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx1871>

A COMET INTERCEPTOR KÜLDETÉS

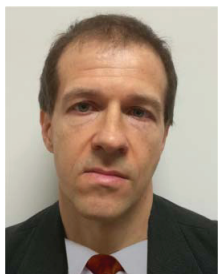
Kereszturi Ákos

ELKH CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Első alkalommal indul űrszonda egy olyan égitest vizsgálatára, amelyet a start idején még nem fedeztek fel. Egy olyan üstökös a célpont, amely az óriásbolygók közötti keletkezését és a távoli üstökösfelhőbe

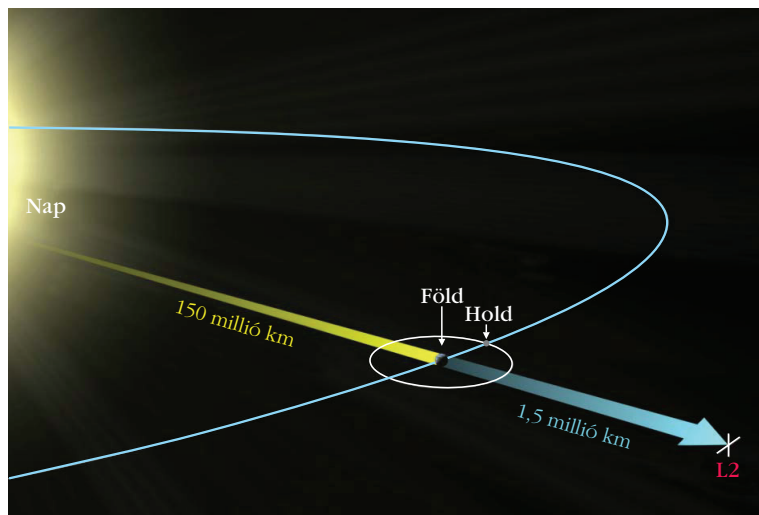
történő kilökődését követően először kerül a Nap közelébe. Mivel eddig a legtöbb időt a Naptól távol, inaktívan töltötte, kivételes lehetőséget nyújt az ősi állapotok elemzésére. Felszínének jellemzői a Naprendszer őszanyagáról minden korábbinál érdekesebb ismereteket adhatnak.

Egy ilyen objektum felfedezése után alig egy év állna rendelkezésre az űreszköz elkészítésére és felbocsátására, ezért a szondát már előbb pályára helye-



Kereszturi Ákos (PhD) bolygókutató, a CSFK CSI főmunkatársa. Kutatási területe a Naprendszer szilárd égitestjeinek elemzése, a felszín morfológiája, fejlődéstörténete, ásványtani és kőzettani jellemzői; valamint a meteoritok elemzése, továbbá földi Mars-analógia területek terepi kutatása, kapcsolódó műszerek fejlesztése és tesztelése, valamint űrszondatervek kidolgozása. A Földön kívüli élet lehetőségének kutatásával az asztrobiológia témakörében foglalkozik. A kutatás mellett az ELTE TTK-n oktat.

A Comet Interceptor űrszonda CoCa műszeréhez kapcsolódó DPM magyar fejlesztését egy PRODEX pályázaton keresztül a Külügy- és Külügyminisztérium támogatja. A munkában folytatott közreműködésért köszönet illeti még Diós Tibor, Gross Péter, Gutay Gergely, Magari Zoltán, Makkai Hunor, Sódor Bálint, Tróznai Gábor és Zábó Balázs szakembereket.



1. ábra. A Comet Interceptor várakozási helye.

zik, és az űrben kell várakoznia a megfelelő célpont-ra. Az ESA Comet Interceptor szondája ezért startja után az L2 Lagrange-pontban fog várakozni (1. ábra), amíg a Vera C. Rubin Observatory Legacy Survey in Space and Time (LSST) távcső fel nem fedez egy kedvező pályán mozgó ilyen üstököst, amit a szonda is elérhet. A statisztikák alapján 1-2 éven belül reális esély van ilyen üstökös felfedezésére.

A szonda jellemzői

A Comet Interceptor űrszonda több magyar részegységet is tartalmaz, többek között a kamera digitális feldolgozó (és adatrögzítő) egységét, amelynek tervezése és készítése itthon történik a REMRED és SGF Kft. révén, a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének közreműködésével. További magyar vonatkozás, hogy a hőszigetelés tervezésében és készítésében az ADMATIS Kft., valamint a plazmafizikai műszerekében a Wigner Fizikai Kutatóközpont (ELKH) működik közre.

Az F-kategóriájú, vagyis gyors (F: fast) Comet Interceptor küldetés a felbocsátást kivéve 150 millió euró költségű szonda, amely az Ariel-űrtávcsővel együtt 2028-ban vagy 2029-ben indul egy Ariane hordozórakétával (2. ábra). A szonda tervezésének nehézsége, hogy a célpont és a találkozó paraméterei még nem ismertek, noha már most ki kell választani a műszerezettséget és a megfigyelési rutinokat. A találkozóra akár 70 km/s relatív sebesség mellett is sor kerülhet, a műszereknek ekkor is pontosan kell követniük és a közelítés során a látómezőben tartani a célpontot. A fő egységet két cubesat-kategóriájú (japán és európai) kis-műhold egészíti ki, amelyek a kóma eltérő tartományán áthaladva annak térbeli szerkezetéről nyújtanak ismertetést és lehetővé teszik a mag vizsgálatát is több irányból. A szonda a várakozással legfeljebb 5 évet tölthet az űrben, ha ezalatt nem akad számára ideális célpont,

akkor egy korábban ismert üstököst látogat meg. Viszont szerencsés esetben a célpont akár egy csillagközi üstökös is lehet, amely éppen áthalad a Naprendszeren.

Az űrszonda számára ideális üstököst az LSST-rendszer várhatóan +22 magnitúdós fényesség körül veszi észre. A Comet Interceptor főleg olyan égitestet képes meglátogatni, amelyik az ekliptikát (a Föld Nap körüli keringése által kijelölt síkot) a Föld naptávolsága közelében metszi – az a térség lesz a találkozó várható helyszíne. Az L2 pontból a találkozó előtt fél-egy évvel indul a szonda, mozgását feltehetően a Földdel végrehajtott hintamanőver is segíti.

A szonda teljes tömege 800 kg az üzemanyaggal együtt, energiaellátását napelemtáblák biztosítják. Az „A” fő szonda műszerei:

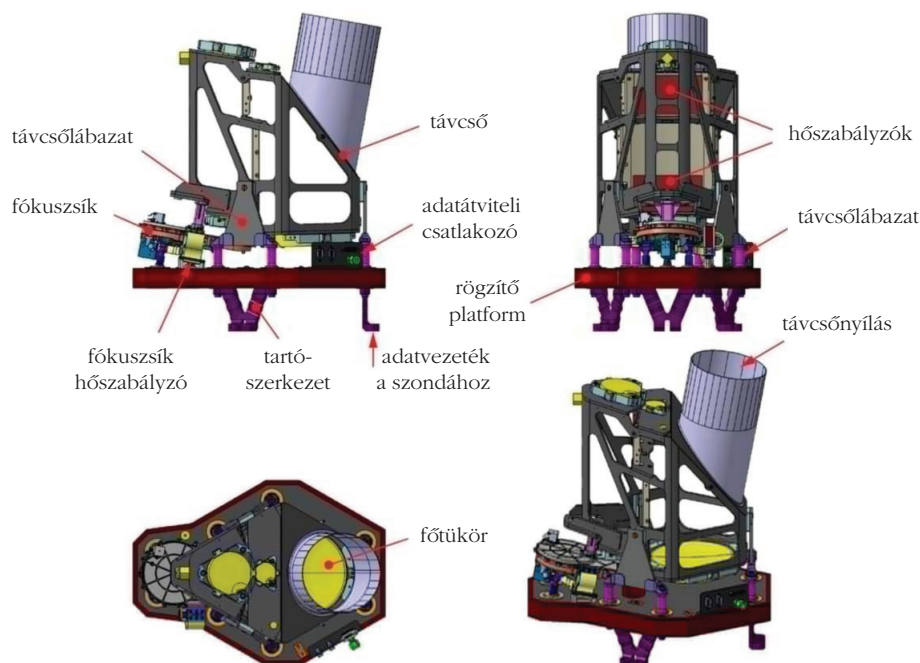
- CoCa – optikai kamera (az ExoMars TGO Mars-szondán lévő CaSSIS-kamera átalakításával készült);
- MANIaC – tömegspektrométer (ez a Rosetta-szonda Rosina-műszerének átalakításával készült);
- MIRMIS – infravörös kamera;
- Por- és mágneses érzékelő (DFP műszercsomag), amelynek része: DISC – porbecsapódás-érzékelő, COMPLIMENT plazma- és mágnesesmező-érzékelő, FGM – magnetométerek, LEES – elektrondetektor, SCIENA – ion- és semlegesrészecske-detektor.

A CoCa kamera (3. ábra) részei: CSU (távcső, detektor, szűrők), ELU (elektronikus egységek, szűrő, hőszabályozás), PEU (támogató elektronikus egység). A kamera jellemzői:

- 135 mm átmérő, 875 mm fókusztávolság;
- 2000×1504 pixel E2V CMOS-detektor, 14 bites adat kódolás;
- látómező: 0,69°×0,92°;
- forgó szűrőtárcsa: 475 nm, 670 nm, 775 nm, 900 nm hullámhosszakhoz;

2. ábra. A kutatási program logója, amin a három űrszonda („A”: fő egység, „B1” és „B2” cubesat) áthalad a kómán (ESA).





3. ábra. A CoCa-műszert magába foglaló Camera Supporting Unit egység (ESA).

- expozíciós idő: 220 μ s – 15 perc között;
- belső memória: 256 Gb (~120 Gb redundancia);
- adattárolás: raw (16 bit/pixel + HK);
- korai nyers képek gyors hazaküldésre.

Várható mérési eredmények

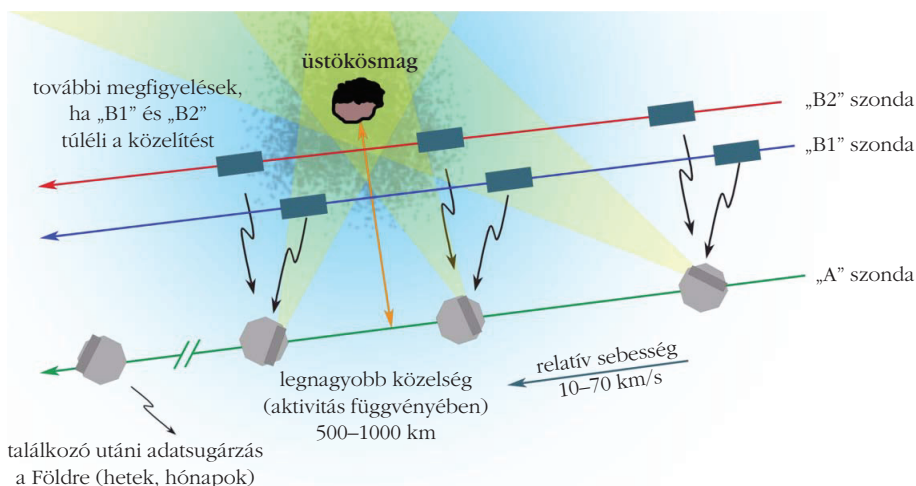
A tervezett mérések révén meg lehet majd határozni az üstökös mag méretét, alakját és forgási sebességét, felszínének morfológiáját, esetleges ősi kráterezettségét, valamint a mag összetételét. Adatok születnek majd a mag termikus tulajdonságairól, a felszíni törmelék-takaró jellemzőiről és természetesen magáról az üstökösaktivitás mikéntjéről, valamint a kómában a por, a gáz és a plazma viselkedéséről.

A legrészletesebb képek várhatóan ~10 m/pixel felbontásúak lesznek, ami hasonló a korábban üstökösökhöz küldött szondák felvételeiéhez. A legnagyobb felbontású képek a fő szonda („A” egység) fent említett CoCa-műszerétől származnak majd. A „B1” kis szondának mind keskeny, mind széles látószögű, a látható tartományban működő kamerája lesz, ami a mag környezetét is megőrökíti, amiből az anyagiáramlás jellemzője érthető meg, és az a felszíni forrásokhoz is kapcsolható. Az OPIC-műszer a „B2” szon-

dan részéről pedig hőalapú képalkotással nyerhető információ. A semleges gázok kómában való eloszlásának feltérképezése a mag összetételéről és esetleges inhomogenitásairól is árulkodik. A kóma összetételének a magtól különböző távolságokban történő mérése pedig pontosítja a kóma fejlődésének kémiai modelljét. Itt is kiemelten fontos lesz az összehasonlítás a korábban vizsgált üstökösök, főleg a Rosetta-űrszonda részletes megfigyeléseivel.

Comet Interceptor 1 km-nél kisebb méretű struktúrákat is fog keresni a kómában a poráramlás (DISC-érzékelő az „A” és a „B2” szondán) és a gázsűrűség (MANiC-műszer) méréseivel. A por- és semleges gáz-sugarak feltérképezése mind a mag közelében, mind attól távol feltárja a kilökődés aktívabb helyeit és periodicitását. A gáz-sugarak összetétele pedig rámutat az

4. ábra. Az „A” fő egység és a két kisebb, „B1” és „B2” cubesat üstökös-mag melletti elhaladásának tervezett geometriája (ESA/Comet Interceptor Science Study Team).



aktív régiók jellemzőire, esetleges eltéréseire. Az infravörösben végzett megfigyelések segítenek elkülöníteni a H_2O -, CO_2 - és CO -molekulákat, de akár például metánt, etánt és metanolt is azonosíthatnak. A semleges hidrogén nagyléptékű térbeli eloszlása pedig az üstökös tevékenységének időbeli történetére utal.

A MANiaC tömegspektroszkópiai adatai a kóma D/H izotóparányait is feltárják, ami az üstökös mag keletkezési térségére vonatkozó becslést teszi lehetővé. A fentiekkel átfedésben az EnVisS-kamera a kóma fényességét és polarimetriás adatait rögzíti, amiből a porrészecskék fizikai tulajdonságaira lehet követke-

zetni. A plazmakörnyezet jellemzéséhez a mágneses és elektromos térerősség és irány, az elektron- és ioneloszlás jellemzői kerülnek vizsgálat alá, valamint az ionösszetételt a különböző üstökös-napszél kölcsönhatási régiókban lehet összehasonlítani a három szonda adatai alapján.

A Comet Interceptor tervezését és fejlesztését részben lefedő A–B fázisok 2022-ben befejeződtek, és a főleg tesztelést és összeállítást tartalmazó C–D fázisok 2023-ban elkezdődtek. További információk a program <https://www.cometinterceptor.spac.honlapjan> olvashatók.

MIT TUDTUNK MEG AZ ÜSTÖKÖSMAGOKRÓL AZ EDDIGI HELYSZÍNI ŪRMISSZIÓKBÓL? – RÖVID ÁTTEKINTÉS

Tóth Imre

ELKH CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Az üstökösök a Naprendszer őseredeti, egyszerű felépítésű kis égitestjei, amelyek szinte még érintetlenül őrzik bolygórendszerünk kialakulása fizikai-kémiai viszonyainak lenyomatát. Az üstökösök jeges-poros magja, gáz- és poranyaga így szinte „időkapszulák” a Naprendszer kialakulásának megismerésében. Tanulmányozásuk tehát betekintést nyújthat az ősi Naprendszer fizikai és kémiai viszonyaiba.

A üstökösök kutatásában a Halley-üstökös magjának közvetlen közeli tanulmányozása jelentett lényeges áttörést 1986-tól kezdve (VEGA- és Giotto-űrprogramok). A Whipple-féle üstökös mag-modell (1950) [1] kidolgozása után annak közvetlen ellenőrzésére tehát három és fél évtizedet kellett várni. A VEGA-program előkészítésében, valamint a kutatások szervezésében és az elért eredményekben *Szegő Károlynak* hazai és nemzetközi szinten is kimagasló szerepe volt, továbbá később az ESA Rosetta-üstökösmisszió Philae leszállóegységével kapcsolatos magyar részvételben [2, 3], illetve a napszél-üstökös kölcsönhatás vizsgálatában is. A Rosetta-üstökösprogram előtt azonban még

több NASA *in situ* üstökösprogramja is megvalósult, amelyeket röviden ismertetünk, mielőtt a Rosetta-program eredményeiből válogatunk.

Üstökös magok közelről a Halley-szondák után és a Rosetta-szonda előtt

A Halley-üstökös után 15 évet kellett várni, amikor a NASA Deep Space–1 ionmeghajtású űrszondája a 19P/Borrelly-üstökös magját 2001. szeptember 21-én 2200 km-re közelítette meg [4]. A Borrelly-üstökös elnyúlt „kuglibábu” alakú, $4,4 \text{ km} \times 1,8 \text{ km} \times 1,8 \text{ km}$ fél nagytengelyű ellipszoiddal közelíthető magja régen elhagyta a Naptól távoli Kuiper-övet, így már hosszú ideje aktív, sok gázt és port vesztett és erősen erodálódott, fejlődési értelemben „idős” a felszíne (1. ábra).

A NASA Stardust-szondája 2004. január 2-án a 81P/Wild 2 üstökös magját 248 km-re megközelítve a kómán átrepülve pormintát gyűjtött be, és egy kapszulákban azt a Földre továbbította laboratóriumi elemzésre. Az üstökös magja szivarra hasonlító, háromtengelyű ellipszoiddal közelíthető alakú, mérete: $5,5 \text{ km} \times 4,0 \text{ km} \times 3,3 \text{ km}$. A mag felszíne kevésbé erodált, „fiatalabb”, mint a Borrelly-üstökösé.

A NASA Deep Impact egy aktív űrkísérlet volt: egy 370 kg-os réztömböt navigáltak a 9P/Tempel 1 üstökös magjába 10 km/s sebességgel, hogy az ütközés következtében kidobódott üstökösanyagot és a becsapódási alakzatot (krátert vagy mélyedést) tanulmányozzák. A becsapódás 2005. július 4-én történt. Ez



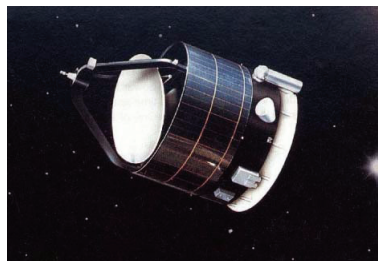
Tóth Imre csillagász (1981, ELTE) 1981–1992-ig az MTA KFKI RMKI-ban a VEGA-szondák képfellevő rendszere fejlesztésében és a magról, porkómáról készített felvételek kiértékelésében vett részt az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetből. 1992–2014 között a Hubble-űrtávcsővel és űrszondákkal közelről vizsgált üstökös megfigyelésekből azok tulajdonságainak meghatározásában vett részt a CNRS és CNES-sel együttműködve. 2003–2020: a Rosetta képfellevő rendszer kutatócsoportjának tagja.



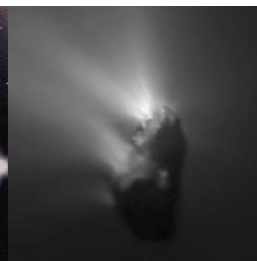
VEGA-1, -2, 1986



1P/Halley



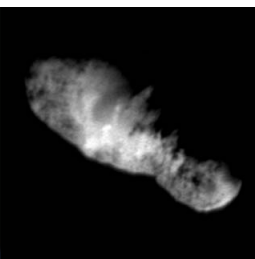
Giotto, 1986



1P/Halley



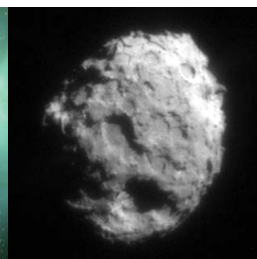
DS1, 2001



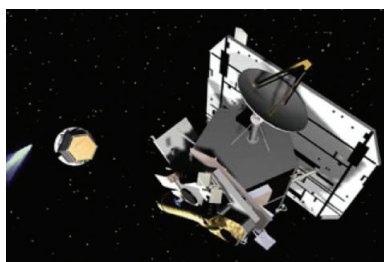
19P/Borrelly



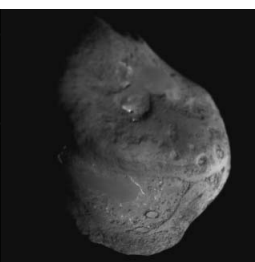
Stardust, 2004



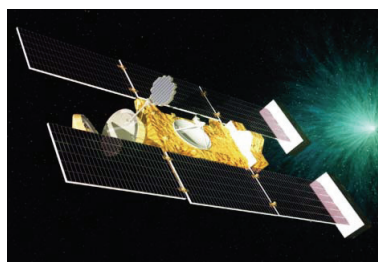
81P/Wild 2



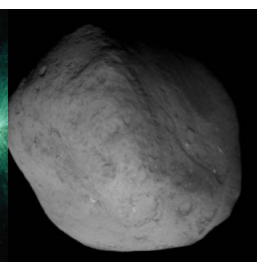
Deep Impact, 2005



9P/Tempel 1



Stardust, 2011



9P/Tempel 1



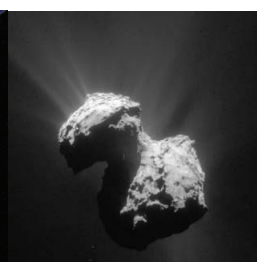
DIXI/EPOXI, 2010
(Deep Impact eXtended Investigation)



103P/Hartley 2



Rosetta és Philae, 2014–2016



67P/Churyumov-Gerasimenko

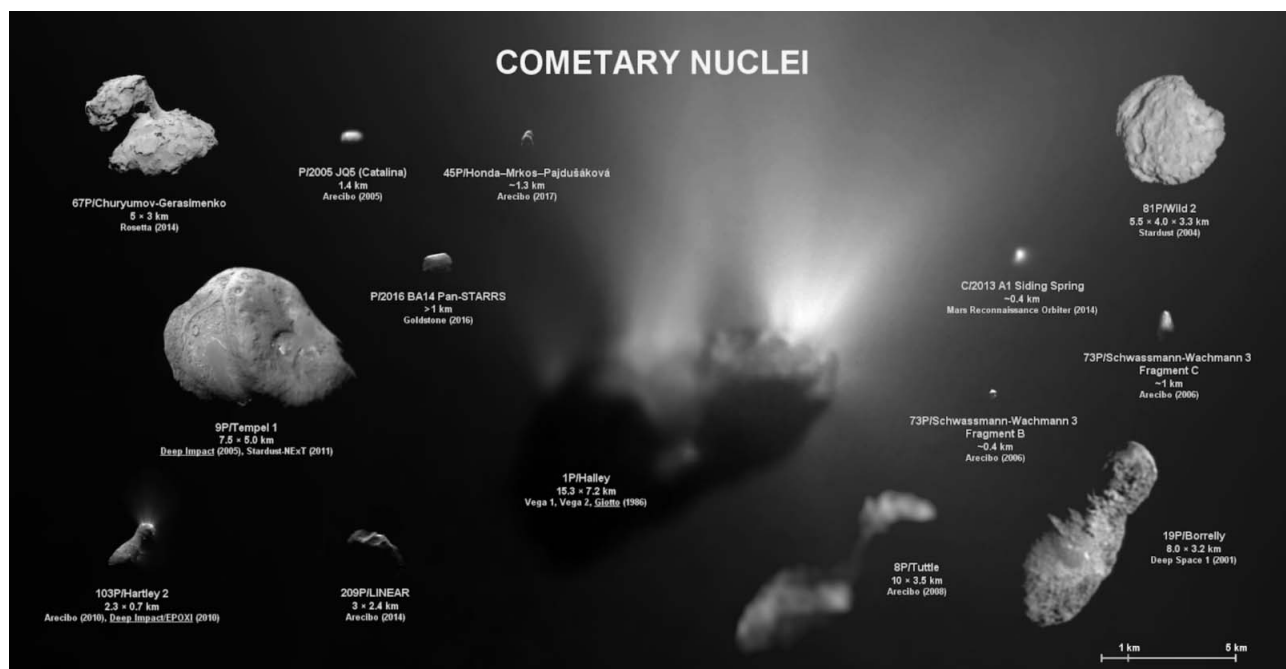
1. ábra. Helyszíni űrszondákkal megfigyelt űstökösök a Halley-től a Rosetta-szonda célűstököséig, a 67P/Churyumov-Gerasimenko űstököséig. Az űrszonda képe az adott űstökös mellett látható. Időrendi sorrend: felső sor bal felső képtől az alsó sor jobb alsó képig (IKI, NASA, ESA).

volt az első, ember készítette tárgy, amely egy űstökös magjának felszínét elérte. A szonda továbbrepülő része 500 km-re közelítette meg az űstökös magját. A kido-bott anyagfelhő elemzése lehetővé tette a mag felszín alatti rétegéből származó anyag összetételének meghatározását. A 9P/Tempel-űstökös magja 7,6×4,9 km-es méretű, piramisra emlékeztető tömb, ami kivételnek számít a gyakoribb kuglibábu alakú, két tömbből összetett űstökösökhöz képest.

A mesterséges becsapódással keletkezett kráter csak a Tempel 1 űstökös következő napközelségekor a magtól 181 km-es távolságban elrepült Stardust-szonda (Stardust-NExT program) felvételei mutatták meg 2011. február 15-én. A 150 méter átmérőjű és lapos aljzatú mesterséges kráter, amelynek alján fé-

nyes, visszahullott anyag halmozódott fel. Ez megerősítette, hogy a Tempel 1 magja laza, porózus szerkezetű. A 9P/Tempel 1 magja volt az első, amit két egymást követő napközelsége idején is űrszonda látogatott meg. Ezzel – egyedülálló módon – az űstökös felszínén bekövetkezett változásokat is ki lehetett mutatni.

A Deep Impact űrszonda új, EPOXI elnevezésű programja keretében a 103P/Hartley 2 űstökös magjától 700 km-re repült el 2010. november 4-én. A mag egy 2,25 km hossz tengelyű földimogyoró vagy aszimmetrikus cérnaguriga alakú, egy nagyobb és egy kisebb komponensből összetett test. A mag bonyolult forgó mozgást végez, vagyis nem a legnagyobb tehetlenségi nyomaték tengelye körül forog. A Hartley 2



2. ábra. Űrszondákkal közvetlen közelről tanulmányozott üstökös magok, valamint a földfelszíni rádióteleszkópokkal radarszondázati módszerekkel megfigyelt üstökös magok, amelyekre a felszíni felbontás jobb mint 25 méter (NASA, JPL, Caltech, NRAO, Arecibo, GSSR, UMD, ESA, JAXA, MPAE, IKI, Bruce Murray Space Image Library, E. Lakdawalla).

hiperaktív üstökös, amelynek magjából nagy mennyiségű és nagy sebességű gáz áramlik ki a napközelség környékén. Az is bizonyossá vált, hogy az aktivitásnak nemcsak a felszín közeli vízjég szublimációja a hajtómotorja, hanem a felszín alatt kis mélységben lévő szén-dioxid-jégnek a mag éjszakai oldalán is fellépő heves szublimációja is elősegíti azt, az aktivitás különösen a terminátor közelében erős.

Az űrszondákkal, valamint nagy felbontású földfelszíni radarszondázati megfigyelések alapján az eddig végzett helyszíni vizsgálatokból is meglepő, hogy mennyire sokfélék az üstökös magok. A diverzitás a magok méretének, alakjának, felszínének és más fizikai jellemzőinek nagyfokú eltéréseiben nyilvánul meg (2. ábra).

A Rosetta–Philae-üstökösprogram magyar részvétellel

Az üstökös magok közvetlen közelről történő kutatásának következő mérföldköve az ESA Rosetta-programja. A tudományos célok elérését a Rosetta keringő egységen 11, a Philae leszállóegységen pedig 9 műszer szolgálta. A Rosetta-program sikere nagymértékben köszönhető a Philae magyar fővállalkozásban, illetve részvétellel készült műszereinek, berendezéseinek (lásd Szalai Sándor és Nagy János cikkét e számunkban). A Rosetta 2004. március 2-án indult útnak és több mint tízévi bolygóközi út után 2014. augusztus 6-án a szonda sikeresen pályára állt a 67P/Churyumov–Gerasimenko (röviden 67P) üstökös magja körül.

A 67P üstökös magjának „gumikacsa” vagy „torz kuglibábu” alakja igencsak nagy meglepetést okozott (3. ábra). Az ilyen, két komponensből összetett kis égitest nem ismeretlen a Naprendszerben, ugyanis az ilyen bifurkált, befűződéssel érintkező komponensek-

3. ábra. A 67P-üstökös magja a Rosetta-szonda navigációs kamerája (NavCam) 2015. március 17-én R (vörös), G (zöld) és B (kék) szín-szűrővel készített felvételeiből összeállított színes képen. A szonda a mag középpontjától 85 km távolságban volt. Az üstökös mag forgástengelye a képen függőleges irányú. (ESA / Rosetta / NavCam, / MPS for OSIRIS Team, MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / IDA / Justin Cowart).



ből álló kisbolygók és üstökös-magok gyakoriak a Naprendszerben. A 67P magjának két kisebb komponense nem katasztrófális ütközéssel tapadt össze, ha az ütközés és összetapadás magyarázza a mag alakját.

Felmerül a kérdés: hogyan alakulhatott ki a Rosetta üstökösének ilyen alakú magja? Erre számítógépes szimulációs modellek készítésével lehet választ adni. Még 2015-ben *Martin Jutzi* (Berni Egyetem) poszt-doktori hallgató és *Erik Asphaug* (Kaliforniai Egyetem Santa Cruz és Arizonai Állami Egyetem) vezető kutatója egy gondosan előkészített számítógépes szimulációval előállították a 67P üstökös magjának térbeli modelljét [5]. A modellben a kis relatív sebességgel egymásnak ütköző két test méretét, összetételét, sűrűségét, rugalmassági paramétereit a 67P ismert tulajdonságainak figyelembevételével választották meg. Eredményük szerint a 67P magját, illetve hasonló kis égitesteket a lágy ütközéssel történt összeállás alakította ki, és nem a gáz- és porkibocsátás miatt történt anyagvesztés esztergálta ki a két összetevő közötti keskenyebb részt. Az 1-2 kilométer átmérőjű összetevők 1-1,5 m/s (legfeljebb néhány méter másodpercenkénti) sebességgel ütköztek (ami egy kocogó vagy bicikliző ember sebessége), kissé deformálódva összetapadnak, majd szétválnak, és rövid időn, mintegy egy napon belül ismét összetapadnak. Innentől kezdve már tartósan együtt maradnak (4. ábra). Az ütközések – a lágy ütközések is – anyagot emelnek fel és rendeznek át a felszínen, különösen a két összetevőt elválasztó nyaki részen, ahol a Rosetta kamerái – a felszín többi részétől eltérően – nagy mennyiségű finom por jelenlétét és sok méteres, tízméteres jegesporos tömböt mutattak meg.

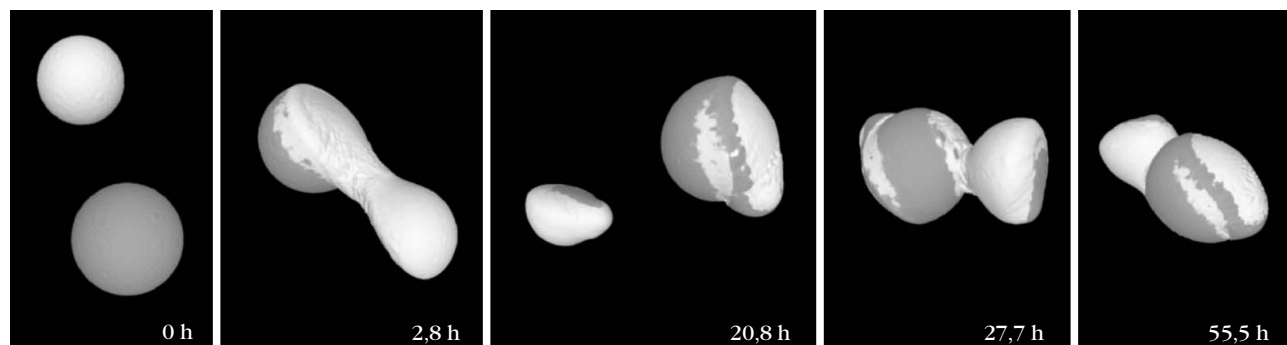
Később *Jutzi* és *Benz* 2016-ban [6] nagyobb ütközési sebességgel való találkozásokat modellezett a 67P-üstökös alakjának magyarázatára. Az új modellben 200-300 m/s sebességgel ütközik a 67P magjának két összetevő teste. Eredményül azt kapták, hogy az ütközés után egy nap alatt a kettévált eredeti üstökös-mag újra összeáll, és kialakul a ma megfigyelhető „kuglibábú” formájú égitest. Ilyen értelemben lehet fiatalabb a 67P üstökös magja az eredetileg régebben ki-

alakult testhez képest, ugyanis időközben egy ütközés átfurmálhatta. *Jutzi* és *Benz* modellszimulációiban a viszonylag gyenge nyaki rész is kiadódik, amelynél a két összetevő test lágyan összetapad, ami ma is megfigyelhető, tehát hosszú időn keresztül fennmaradó konfiguráció alakulhat ki az ütközés következtében. A kis sebességű (néhány m/s) és a nagyobb sebességű (200-300 m/s) ütközések is kiadják a 67P-üstökös magjának ma megfigyelhető alakját, illetve ezek az ütközések nem alakítják át a mag eredeti kémiai összetételét, mert nem jön létre magas hőmérséklet, ami az eredeti molekulákat és anyagszerkezetet átalakítaná. Ugyanakkor több, egymásnak ellentmondó modell is van a 67P-üstökös magja mai formájának kialakulásáról, és ez is mutatja, hogy még további vizsgálatok szükségesek a kérdés megválaszolásához, de mindenesetre figyelemre méltó, hogy a nagy sebességű ütközések is kialakíthatják a mag megfigyelt alakját.

A Rosetta-program fő célja volt az üstökös-mag aktivitási mechanizmusainak megismerése, azaz hol vannak aktív területek a magon, ahol a különböző jegek – elsősorban a vízjég – szublimációja és a porkibocsátás végbemegy, illetve milyen az aktivitás időbeli lefolyása. Ebből a célból a szonda már a Nap felé közeledő üstökös magja közelében 2014 tavaszán, közel egy évvel a napközelség előtt megkezdte a megfigyeléseket és méréseket, majd az aktivitás alakulásának megfigyelését a 2015. augusztus 13-án bekövetkezett napközelség után még jó egy évig folytatta. A Rosetta-szonda előre tervezett módon az üstökös-mag felszínére leszállva lágy ütközéssel fejezte be működését 2015. szeptember 30-án.

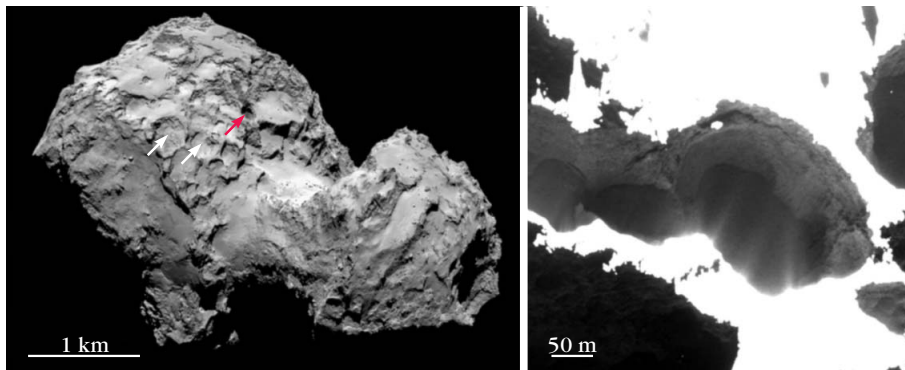
Az első, váratlan felfedezés a mag felszínén levő lyukak, gödrök szublimációja és belőlük a porki-áramlás volt [7]. A 67P magján az OSIRIS (Optical, Spectroscopic and Infrared Remote Imaging System) felvételein megfigyelhető, szabályos kör alakú peremű, lényegében henger alakú lyukat, „kütszerű” mélyedéseket aljzatáról és a faláról is kiáramlik a gáz (szublimált vízjég) és por (porsugarak, porjetek). Egyébként a 67P-üstökös magjának felszíni alakzatait ősi egyiptomi mitológiai alakokról, történelmi szemé-

4. ábra. A 67P magja és más, hasonló kis égitestek két összetevőből lágy ütközéssel történő kialakulásának folyamata: 1) a két kis test lassan közelíti egymást és összetapad, 2) egy elnyúlt testet alkot, ami 3) szétválk, majd rövid időn belül 4) ismét összetapad, majd kialakul az 5) gumikacsalak (ESA Rosetta, *Jutzi* és *Asphaug*, 2015 [5]).



lyekről, földrajzi helyekről és építményekről nevezték el (5. ábra).

Egy másik, addig nem ismert típusú aktivitási forrást is sikerült váratlanul felfedezni. Kiderült, hogy szirtfal leomlása is okozhat kitörést egy üstökös-magon [8]. Csaknem egy hónappal az üstökös napközelsége előtt, 2015. július 10-én a Rosetta Navigációs Kamerateája (NavCam) az üstökös-mag Aswan elnevezésű területe felett egy korábban nem látott porfelhőt és porsugarat figyelt meg, ami egy hirtelen végbement anyagkidobás por-anyaga volt. Öt nappal később, 2015. július 15-én az OSIRIS nagyfelbontású kamerája (NAC) részletes felvételein pontosabban azonosítani lehetett a kitörés helyét. A részletes felvételeken az Aswan meredek szakadékfalán egy addig nem látott fényes perem tűnt fel. Ami korábban csak sejtés volt, most beigazolódott: a meredek szirtfalak is forrásai lehetnek az üstökös-mag aktivitásának (6. ábra). A leomlott függőleges szirtfal teljes magassága 134 m. A leomlott szirtfal a felszíni peremen 57 m hosszú, a fal alján 81 m széles, és a felszíni peremtől számítva 65 m magasságban omlott le. A meredek szirtfalak alatt poros-jeges törmelékanyagot találunk, amely az üstökös-mag szinte érintetlenül meg-

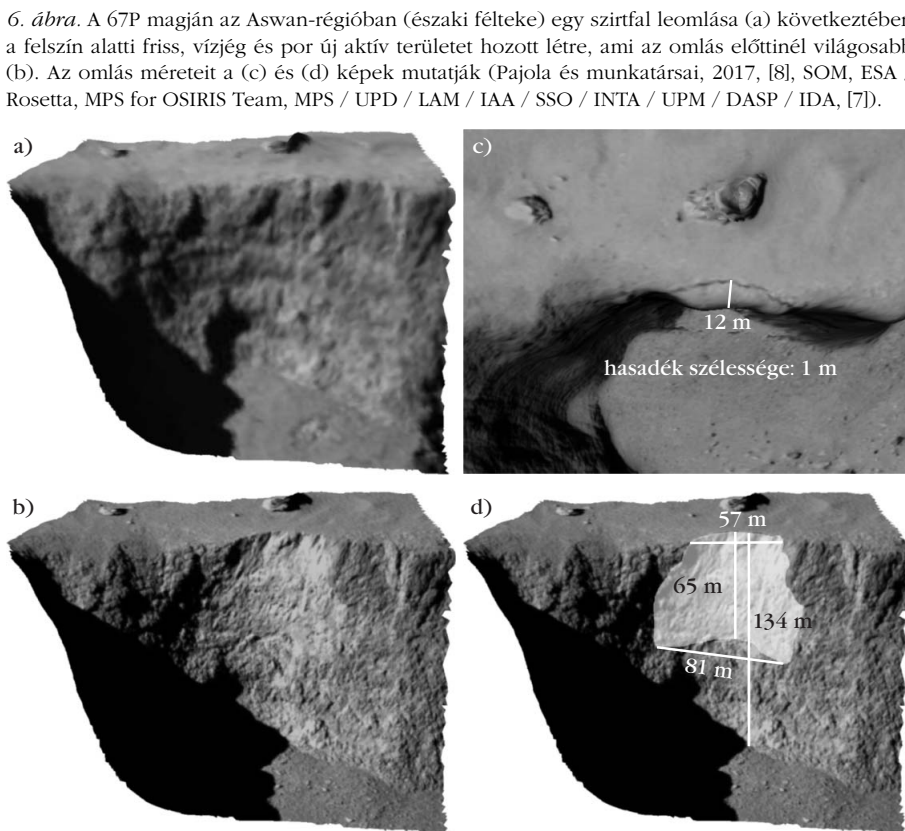


5. ábra. A 67P magja északi féltékéjén a mag nagyobbik összetevőjén levő Seth-régióban (balra) van egy aktív lyuk (nyílal jelölve), amelynek belső oldaláról is kiáramlik a por (jobbra), ha besüt a Nap (Vincent és munkatársai, 2015, [7], ESA / Rosetta, MPS for OSIRIS Team, MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / IDA).

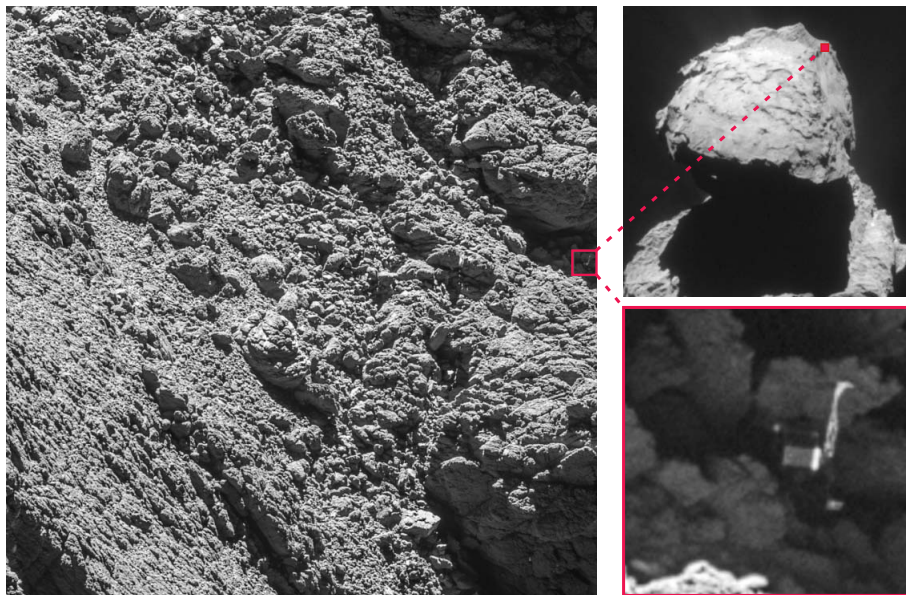
tikus repülés után az üstökös-mag egy meredek faláról is visszapatant, és csak ezután állapotodott meg az Abydos elnevezésű leszállóhelyén egy árnyékos mélyedésben, összesen mintegy kétórás kalandos pattogás és repülés után (7. ábra). A jelentős magyar részvétellel készített eszköz körülbelül 57 órán keresztül – amíg az akkumulátorai le nem merültek – vizsgálta műszereivel az üstökös-magot, mérte az addig ismeretlen égitest felszíni fizikai és kémiai tulajdonságait.

A Philae visszapatantásainak elemzésekor kiderült, hogy az üstökös-mag felszínén vannak olyan helyek, ahol nagyobb a nyomási ellenállás, vagyis „keményebb” a jeges-poros anyag. Erre a következtetésre Heinisch és munkatársai (2019) [9] jutottak: a maximá-

6. ábra. A 67P magján az Aswan-régióban (északi féltéke) egy szirtfal leomlása (a) következtében a felszín alatti friss, vízjég és por új aktív területet hozott létre, ami az omlás előttinél világosabb (b). Az omlás méreteit a (c) és (d) képek mutatják (Pajola és munkatársai, 2017, [8], SOM, ESA / Rosetta, MPS for OSIRIS Team, MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / IDA, [7]).



Mérföldkő volt a tudomány történetében, amikor 2014. november 12-én az ESA Rosetta-programja keretében a Philae leszállóegység viszontagságos útja végén viszonylag simán leszállt a 67P magjának felszínére. A Philae az eredetileg kijelölt Agilkia nevű leszállóhelyről, majd lassú, a felszín feletti ballisz-



7. ábra. A Philae leszállóegység a 67P Abydos-régiójában a mag kisebb összetevőjének jobb felső peremén a NavCam 2015. április 15-én készült felvételén (jobb felső kép), A Philae helyzete a bal oldali képen, a körülbelül 1 méter kiterjedésű leszállóegység és lábai kinagyítva a jobb alsó képen láthatók az OSIRIS NAC 2016. szeptember 2-án a mag felszínétől 2,7 km-re készült felvételén. A bal alsó képen a felbontás 5 cm. (ESA / Rosetta, MPS for OSIRIS Team, MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / IDA, [8]).

lis nyomási ellenállás 800 Pa lehet. Általában a 67P-mag felszínének legfelső 10-20 cm-es rétege keményebb, mint az alatta levő rétegek. A beépített rögzítő szigony azokon a helyeken nem is tudott volna behatolni a felszínbe, hogy rögzítse a leszállóegységet, illetve a fedélzeti fűróberendezése (MULTI-PURPOSE Sensors for Surface and Sub-Surface Science, röviden MUPUS) működését is akadályozta a kemény felszín a végső leszállóhelyen. Ez meglepő volt, mert lazább, porózusabb felszínre számítottak a Philae tervezői.

2020-ig azonban nem voltak ismertek a Philae talajt érési és visszapattanásai, különösen pedig második talajérintésének részletei. Erre *Laurence O'Rourke*, az Európai Űrügynökség ESAC-részlegének (European Space Astronomy Centre, Madrid, Spanyolország) munkatársa által vezetett nemzetközi kutatócsoport derített fényt a Philae mágneses teret mérő műszerei által a leszállás alatt gyűjtött mérési adatokat elemezve [10].

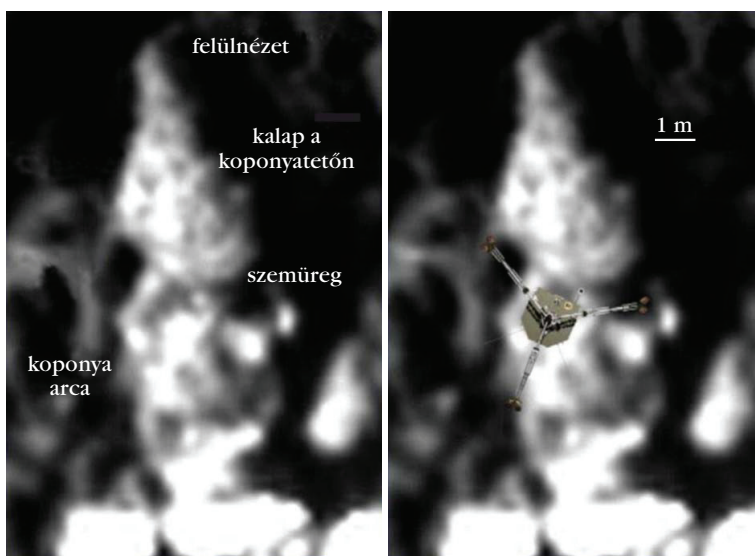
A Philae mágneses tér mérésére hivatott fedélzeti műszerei, a ROMAP (Rosetta Lander Magnetometer and Plasma Monitor) és a Rosetta-nyaszonda RPC-MAG (Rosetta Plasma Consortium Fluxgate Magnetometer) a leszállás és a felszínről történt többszöri visszapattanás közben is tudta mérni az üstökös környezetében a mágneses tér erősségét és irányát. Mivel a 67P-üstökös gázkibocsátási aktivitása a leszállás idején még nem volt elég erős ahhoz, hogy plaz-

mafizikai folyamatok által megakadályozza a napszél-plazma és az abban szállított mágneses tér lehatolását egészen az üstökös felszínéig, ezért a mágneses tér mérési adataiból a leszállóegység testének térbeli helyzete és annak időbeli változásai is meghatározhatók. Az is szerencsés körülmény volt, hogy az üstökös magjának nem volt saját belső mágneses tere, így az nem befolyásolhatta ezeket a méréseket. O'Rourke és munkatársai 2020-ban tehát új megvilágításba helyezték a Philae második talajérintési eseményét: ez tulajdonképpen négy különböző érintkezés volt az üstökös felszínével, amelyek jelölése TD2a, TD2b, TD2c és TD2d (TD: Touch-Down esemény). A mágneses tér mérési eredmé-

nyeit kiegészítette a Rosetta-nyaszonda OSIRIS NAC nagyfelbontású felvételeinek elemzése a Philae útvjáról, valamint felszíni érintkezési helyeiről.

A felszínt érintve a Philae teste, talpai, illetve kiálló műszerei (például SD2 pordetektor) is felszántották az üstökös felszínét, 10-20 centiméter mélységben besüppedtek. Ezekből a felszín alatti anyag mechanikai tulajdonságaira és összetételére lehet következtetni, mert az érintkezések rövid idő alatt megváltoztatták a Philae sebességét és helyzetét (for-

8. ábra. A Philae a TD2c elnevezésű érintkezési területen a „koponyatető” alakzat egyes részeit formázta meg: a talp és a test a „szemeket” alakították ki. A jobb oldali képen a leszállóegység rajza érzékelteti az érintkezést és a méreteket (O'Rourke és munkatársai, 2020, [10]).



gás, bukfencezés), amit a mágnesestér-mérések jeleznek. A TD2c érintkezés helyén a Philae teste és talpai furcsa, emberi fejre emlékeztető nyomot hagytak, aminek van két „szeme” (a leszállóegység teste és egyik talpa), van „szája” is (egy természetes hasadék), valamint kúpos „süvege, sapkája”, ez utóbbi egy természetes kiemelkedés, kis domb az üstökös-magon (8. ábra).

A Rosetta VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer) műszerének képfelvételei megerősítették, hogy vízjég került napfényre, amikor a Philae leszállóegység teste, illetve talpa belevált az üstökös-mag felszínébe, így a legfelső sötét, poros-jeges keveréket eltávolította, és az alatta levő friss jeges-poros anyagot láthatóvá tette. O'Rourke és munkatársainak vizsgálatai megerősítették, hogy az üstökös-mag felszíne alatt nagyon porózus jeges-poros anyag van, a mag belseje laza szerkezetű vagy vattaszerű, aminek porozitása $75\pm 7\%$. A vízjég mellett szerves anyagokból álló jég és por is van. A por/jég tömegaránya 2,3:1, ami megfelel a 67P-üstökös korábbi kitöréseikor kiszabadult por és jég arányának, valamint a felszín árnyékos területein megfigyelt por/jég arálynak. A Philae teste és talpa mintegy 25 cm mélyen hatolt be az üstökös-mag felszínébe, ez 12 Pa kompressziós erősségű, vagyis gyenge jeges-poros keverék nyomószilárdságának (nyomási ellenállásának) felel meg, ami a frissen hullott, laza szerkezetű porhóénál is gyengébb.

Az, hogy milyen szerkezetű a 67P-üstökös magjának belseje, a Rosetta-anyaszonda és a Philae leszállóegység közötti rádiószondás kísérlet segített tisztázni. Ugyanis a Philae és a Rosetta műszerei között volt egy fedélzeti rádióantenna is: a CONSERT (COmet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission ~ üstökös-mag-vizsgálat rádióhullám-terjedési kísérlettel). A CONSERT rádióadója a Philae és a keringő egység által kibocsátott 90 MHz frekvenciájú, 8 MHz sáv szélességű, mintegy 3 m hullámhosszú rádióhullámok magon keresztüli terjedésének vizsgálatával végezte a mag tomográfiáját, amellyel meghatározható volt az üstökös-mag szerkezete, és az összetételére is következtetni lehetett (9. ábra).

A rádióhullámok terjedéséből francia kutatók megtudták állapítani a mag belsejében a dielektromos állandót és ebből azt, hogy a hullámok milyen hosszú úton, milyen sűrűségű anyagon haladtak keresztül, illetve a felszíntől milyen mélyen vezetett az útjuk [11, 12]. A radarjelek elemzéséből az a meglepő eredmény adódott, hogy az üstökös-mag felszínétől mintegy 25 méteres mélységig kevésbé porózus, vagyis tömörebb, mint annál mélyebben a test belsejében, ahol 73–76%-os a porozitás, ami nagyon porózus, szinte szivacsos szerkezetet jelent. Ez a nagy porozitás nem azt jelenti, hogy nagyobb üregek vannak az üstökös-mag belsejében, hanem a jeges-poros szemcsék között az összes mikroszkopikus üreg térfogata

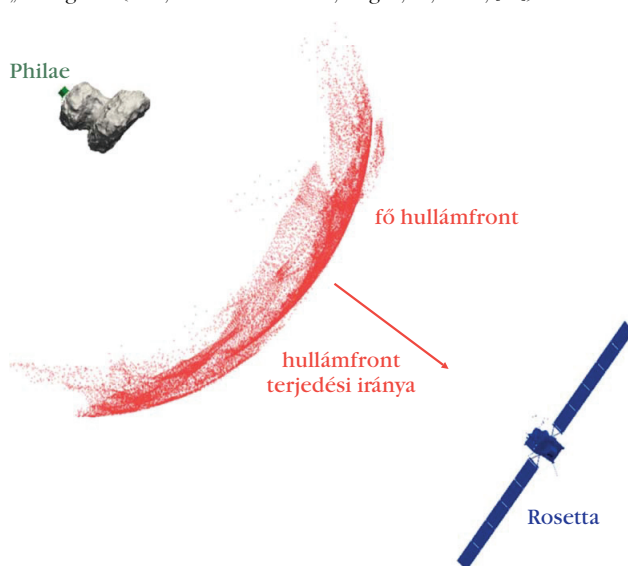
jelentős az egybefüggő szilárd jeges-poros szemcsé-ananyag térfogatához képest.

Az üstökös-mag felső rétegének kevésbé porózus voltát a mag aktivitása során a kigázosodás, valamint a nagyobb porszemcsék és poros-jeges tömbök felszínre való visszahullása és összegyűlése okozhatja. Egyébként erre utal az is, hogy a Philae leszállásakor történt többszöri visszapattanás során volt olyan is, amelynek ütközési mechanikája elég kemény, összetömrődött jeges-poros anyagra utalt. Továbbá a Philae fűróberendezésének is nagyon kellett küzdenie a felszín kemény, kevésbé porózus anyagával. Ehhez képest a radarmérések szerint a felszíntől 25 méter alatt már az eredeti laza szerkezetű üstökös-mag-anyag van, ami az üstökös-mag képződése óta eltelt 4,6 milliárd év alatt lényegében változatlanul megőrződött a külső Naprendszerben. Ezért is érvényes, hogy az üstökös-magok, de főleg azok belseje őseredeti, vagyis őrzi a kialakulásuk idejéből fennmaradt ősi Naprendszer-anyagot és az akkor fennállt fizikai és kémiai állapotok lenyomatát. Így tehát az üstökös-magok „idő kapszulák” a korai Naprendszerből.

Az üstökös-mag nagy belső porozitása a kialakulási folyamatokra ad majd korlátot, tehát a Naprendszer kialakulási modelljeinek az ilyen nagy belső porozitású kis égitestek formálódási mechanizmusát is meg kell tudni magyarázniuk. Eredményeivel az ilyen vizsgálatokhoz segített hozzá az egyedülálló Rosetta-üstökösprogram.

Az űrkutatás egyetemes történetében egyedülálló magyar mérnöki teljesítményükért, az Európai Űrügynökség Rosetta-űrszondája leszállóegységén megépült műszerek, berendezések elkészítése során végzett, kiemelkedő munkájuk elismeréseként megosztva kapta *Apáthy István, Balázs András és Bánfalvi An-*

9. ábra. A 67P-üstökös magjának kisebbik összetevőjére szállt Philae és a rádiójelei áthatoltak a mag testén. A szonda CONSERT rádiójeleit a Philae is képes volt fogni, azaz mindkét irányban működött az „átvilágítás” (ESA, Acta Astronautica, Rogez, Y., 2016, [11]).





10. ábra. A 2015. március 15-én Széchenyi-díjjal kitüntetett Bárfalvi Antal, Balázs András és Apáthy István (fotó: Koszticsák Szilárd, MTT).

tal a magyar állam legmagasabb tudományos kitüntetését, a Széchenyi-díjat a 2015. március 15-i nemzeti ünnep alkalmából (10. ábra).

Magyar részvétel a jövőbeli helyszíni üstökösmissziókban

Az ESA Comet Interceptor szondája a tervek szerint 2029-ben indulna és jelentős magyar részvétellel valószínűleg meg. A missziót *Kereszturi Ákos* tanulmánya ismerteti részletesebben e cikkgyűjteményben.

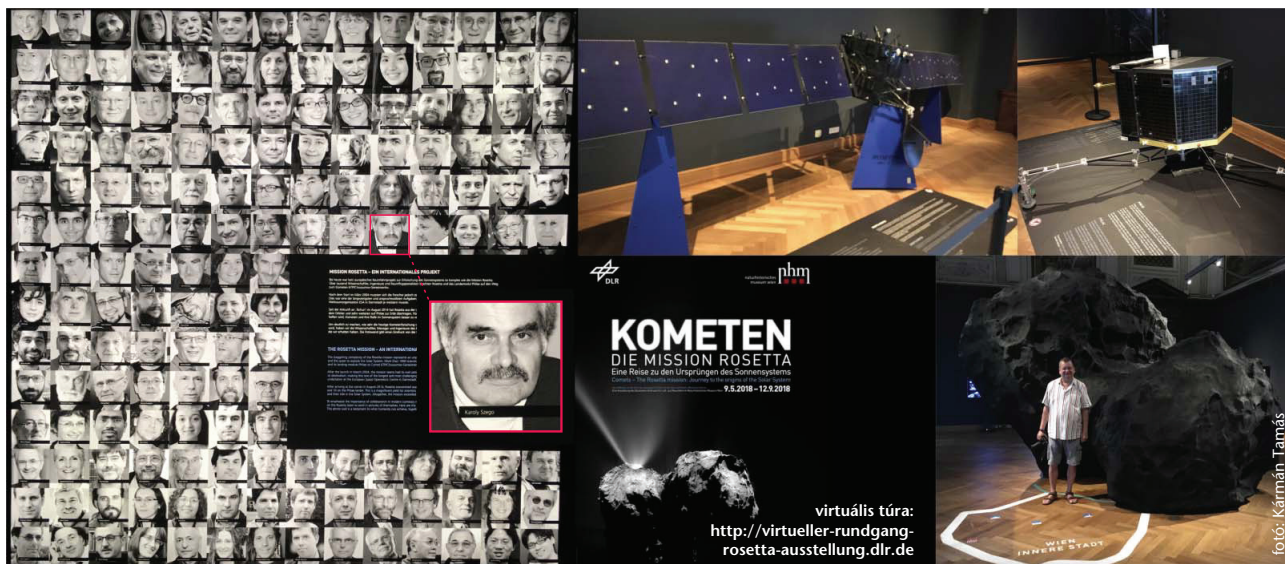
Az üstökösök megismerése közeli űrszondákkal a Halley-üstökössel indult, amelynek sikerével a magyar kutatók és mérnökök részvétele állandósult a Naprendszer kutatására irányuló űrmissziókban. E fo-

lyamat megalapozásában kiemelkedő szerepe volt Szegő Károly munkásságának. Új lehetőség a híres Halley-üstökös meglátogatására, amikor legközelebb 2061. július 28-án ismét napközben lesz. A Halley-üstökös újbóli közeli tanulmányozása is szerepel a NASA és ESA terveiben – nagy valószínűséggel magyar részvétellel is.

Irodalom

1. Whipple, F. L.: A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. *Astrophys. J.* 111 (1950) 376–394.
2. Szegő, K.: A Rosetta-űrmisszió. *Magyar Tudomány* 111 (2004) 879–885.
3. Szalai, S.: A Rosetta–Philae sikere magyarok részvételével. *Fizikai Szemle* 66/10 (2016) 322–327.
4. Tóth, I.: Mekkora az üstökösök? *Fizikai Szemle* 55/12 (2005) 432–441.
5. Jutzi, M., Asphaug, E.: The shape and structure of cometary nuclei as a result of low-velocity accretion. *Science* 348 (2015) 1355–1358.
6. Jutzi, M., Benz, W.: Formation of bi-lobed shapes by sub-catastrophic collisions. A late origin of comet 67P's structure. *Astron. Astrophys.* 597 (2016) A62, 10pp.
7. Vincent, J.-B., és mások: Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse. *Nature* 523 (2015) 63–66.
8. Pajola, M., és mások: The pristine interior of comet 67P revealed by the combined Aswan outburst and cliff collapse. *Nature Astronomy* 1 (2017) id. 0092, 8pp.
9. Heinisch, P. és mások: Compressive strength of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko derived from Philae surface contacts. *Astron. Astrophys.* 630 (2019) id. A2, 8pp.
10. O'Rourke, L. és mások: The Philae lander reveals low-strength primitive ice inside cometary boulders. *Nature* 586 (2020) 697–701.
11. Rogez, Y. és mások: The CONSERT operations planning process for the Rosetta mission. *Acta Astronautica* 125 (2016) 212, 22pp.
12. Kofman, W. és mások: The interior of Comet 67P/C–G; revisiting CONSERT results with the exact position of the Philae lander. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 497 (2020) 2616–2622.

A BÉCSI TERMÉSZETTUDOMÁNYI MÚZEUM KIÁLLÍTÁSA, 2018.



JEGES ÉGITESTEK IONOKKAL BOMBÁZOTT FELÜLETÉN ZAJLÓ FOLYAMATOK ÉS LABORATÓRIUMI MODELLEZÉSÜK

Sulik Béla,¹ Herczku Péter,¹ Juhász Zoltán,¹ Duncan V. Mifsud,¹ Kovács T. S. Sándor,¹ Sergio Ioppolo,² Rácz Richárd,¹ Biri Sándor,¹ Robert W. McCullough,³ Rahul Kumar Kuswaha,¹ Zuzana Kaňuchová,⁴ Vajda István,¹ Lakatos Gergő,¹ Nigel J. Mason^{1,5}

¹Atommagkutató Intézet, Debrecen

²Aarhus University, Dánia

³Queen's University Belfast, Észak-Írország

⁴Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, Szlovákia

⁵University of Kent, Anglia

Miért van szükség laboratóriumi asztrokémiára?

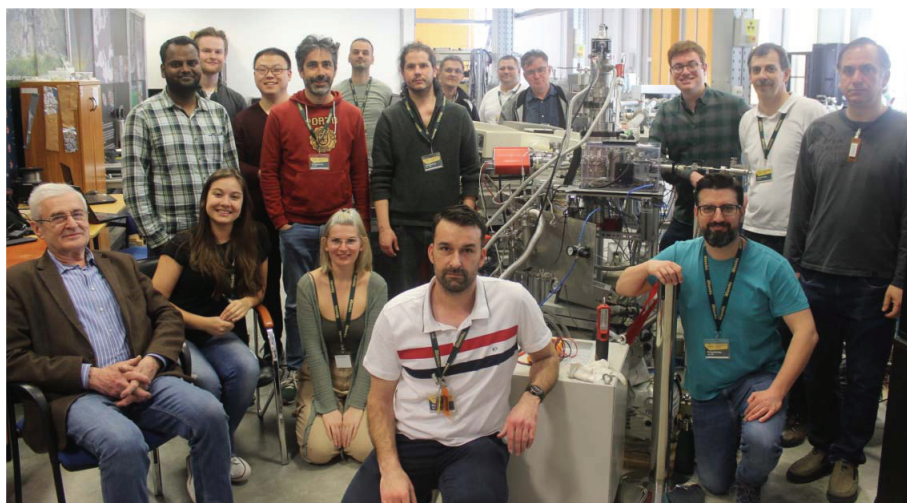
Naprendszerünk kutatása során abban a szerencsés helyzetben vagyunk, hogy a kiküldött szondákkal a helyszínen mérhetjük a vizsgált objektumok anyagösszetételét. Észlelhetjük a „gyorsan” lezajló – a kémiai folyamatok 10^{-15} szekundumos skálájától a néhány éves időléptékben érvényesülő – folyamatokat is, és ez rendkívül gazdag információforrást jelent. A reakciók megértéséhez azonban laboratóriumi kísérletekre van szükség, és ugyanilyen fontos szerep jut az elméleti modellszámításoknak is. Az évezredek, évmilliók alatt akkumulálódó hatások megismeréséhez, megértéséhez még inkább szükség van a modellezésre. Ilyen lassú folyamatok lehetnek például a különböző sugárzások (töltött részecskék és fotonok) által kiváltott kémiai átalakulások. A sugárzások egyedi becsapódásainak, eseményeinek energiája igen nagy lehet, kozmikus sugárzások esetén extrém, földi gyorsítókkal meg sem közelíthető energiaértékeket is felvehet. Ám az események tér- és időbeli sűrűsége alacsony, a felhalmozódó termékek közötti kölcsönhatások csak nagyon hosszú idő alatt eredményeznek makroszkopikus változásokat. Ezek megértésében – az elméleti modellek megalakítása mellett – fontos szerepet kap a laboratóriumban végzett kísérleti munka.

A Naprendszerben nagyon sok a jéggel borított objektum, a mikrometeoroidoktól az üstökösökön át a külső jeges bolygókig és azok holdjaiig. Az eddigi missziók meg-

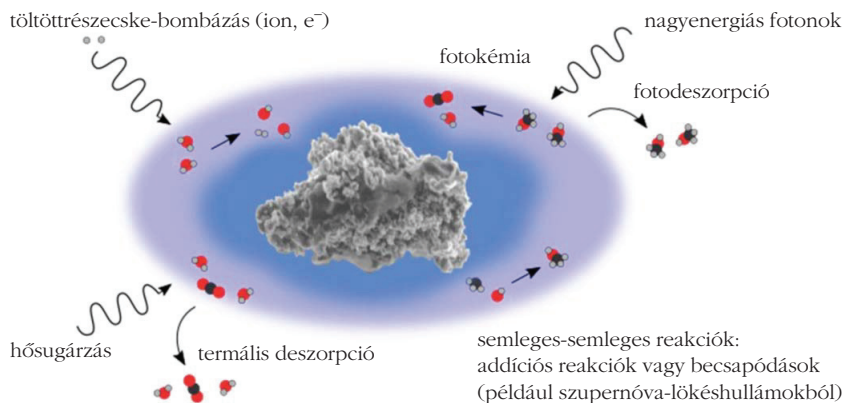
mutatták, hogy ezen jeges égitestek felszínén és légkörében igen sokrétű kémiai folyamatok zajlanak. Jó példa erre a Titan légkörében talált folyamatok gazdagsága, amelyet a Szaturnuszt és környezetét vizsgáló Cassini–Huygens-misszió tárt fel. Ezek megértéséhez szintén elkerülhetetlen a reakciók laboratóriumi modellezése.

Az űrbéli jeges objektumok felszínén és belsejében zajló folyamatok nem csak a csillagászat számára fontosak. Ma már általánosan elfogadott feltételezés, hogy a világűr kémiai fejlődése, evolúciója túlnyomórészt a kozmikus térben található porszemcsékre évmilliók alatt lerakódó, atomokból és egyszerű molekulákból álló jégrétegekben történik. A gáz- és plazmafázisban lévő atomok és ionok sűrűsége még a sűrű molekulafelhőkben sem elegendő ahhoz, hogy pusztán ütközések révén létrejöjjenek az ott észlelhető bonyolultabb molekulák. A hidrogén mellett többnyire szén-dioxid-, víz-, metán- és ammóniamolekulákból álló jeges azonban sűrű anyagok. Hídegek ugyan, de sokféle hatás érheti őket, amelyek kémiai változásokat eredményezhetnek. Ezt illusztrálja az 1. ábra.

A cikk szerzői (bár nem mindenki) a mérésekre érkezett vendégkutatókkal az ATOMKI Tandetron-gyorsítójának munkatársaival az ICA-mérőkamra körül 2023 márciusában.



Ez a cikk a 2022. november 14-én a Magyar Tudomány Ünnepe alkalmából az MTA Székházban tartott Szegő Károly-emlékülésen elhangzott előadás rövidített változata.



1. ábra. A csillagközi porszemek jeges köpenyében lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok vázlatos áttekintése [1] alapján.

A zömükben valószínűleg szupernóva-robbanások során keletkező, vas, szén és szilikát anyagú porszemcsék többsége mikron alatti méretű, és sűrűségük a csillagközi térben igen kicsi: egy száz méter élhosszúságú kockában átlagosan két porszemcse található. Az atomok, molekulák sűrűsége sem túl nagy, köbcentiméterenként átlagosan egy található belőlük. Sűrűségük a csillagközi ködökben persze ennél nagyobb, a molekulafelhőkben pedig lényegesen nagyobb lehet. A porszemcsék tömege a gázokénak 1-2 százalékát teszi ki.

A változatos összetételű jégekkel borított porszemcséket igen alacsony hőmérsékleten is sokféle olyan hatás éri, amely kémiai változásokat eredményezhet. A gázrészecskék lerakódása addíciós reakciókkal építhet molekulákat. A csillagokhoz közeledve a hőhatás, valamint a fotonok és a töltött részecskék (a „csillagszél” elektronjainak és ionjainak) becsapódásai kapnak egyre nagyobb szerepet. A nagy energiájú kozmikus sugárzás pedig még a sűrű anyagfelhők belső régióiban is létrehozhat kémiai változásokat.

A csillagközi térben molekulák sokasága észlelhető rádióteleszkópokkal és az infravörös tartományban adatokat gyűjtő űrszondák segítségével. A 2021-ig észlelt molekulákat mutatja be az 1. táblázat.

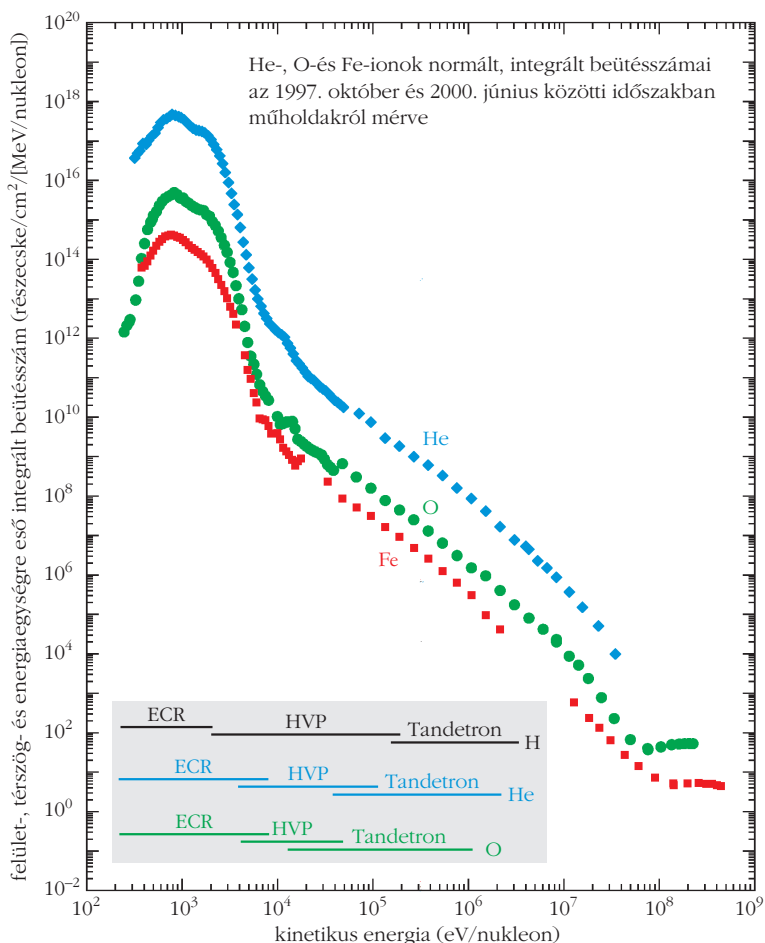
A listában nagyon sok szerves molekula szerepel, és ezek elég jelentős része biomolekulának vagy biomolekulák építőkövének tekinthető. Könnyen belátható, hogy az élet eredetének kutatásában az asztrokémiának jelentős szerepe van.

Mind a Naprendszerben zajló folyamatok, mind a távoli molekulafelhőkben lejátszódó kémiai átalakulások megértéséhez szükség van azok laboratóriumi és elméleti modellezésére. A laboratóriumi modellezés során hasonló anyagok számára terem-

tünk hasonló feltételeket, és ellenőrzött körülmények között vizsgáljuk a folyamatokat. Ez a kutatási irány rendkívül szerteágazó [3, 4]. Ezen belül a nagy energiájú becsapódások laboratóriumi vizsgálata is igen kiterjedt, az elektron- és fotonindukált folyamatokat széles energiatarományban vizsgálják a világ számos laboratóriumában. Meglepően kevés kutatóhelyen vizsgálják az ionbombázás hatását az asztrofizikai és asztrokémiai szempontból releváns jég- és más alacsony hőmérsékletű mintákon. Európában a franciaországi

GANIL nehézion-gyorsítónál, Darmstadtban a GSI-ben és az olaszországi INAF-Osservatorio Astrofisico di Catania intézetben. Az Atommagkutató Intézet (ATOMKI) bekapcsolódását e kutatásokba az tette lehetővé, hogy a gyorsítói által szolgáltatott ionok vá-

2. ábra. Nagy energiájú részecskék (He-, O- és Fe-atommagok) 33 hónapos időszakra integrált hozama a napszéltől a galaktikus kozmikus sugárzás energiájáig [5, 6]. A protonadatok az ábrán nem jelennek meg, ezek körülbelül egy nagyságrenddel nagyobbak mint a He-adatok, és lefutásuk hasonló azokhoz. Az ATOMKI gyorsítóinak (ECR, Nagyfeszültségű Platform (HVP) és Tandetron) ionenergiatarományai a szürke betétben láthatók. Ezek 9-10 nagyságrend intenzitástartományban fedik a spektrumok intenzív részét.



A csillagközi térben detektált molekulák listája a 2021-es állapot szerint [2].

2 atom		3 atom		4 atom		5 atom		6 atom	7 atom
CH	NH	H ₂ O	MgCN	NH ₃	SiC ₃	HC ₃ N	C ₄ H ⁻	CH ₃ OH	CH ₃ CHO
CN	SiN	HCO ⁺	H ₃ ⁺	H ₂ CO	CH ₃	HCOOH	CNCHO	CH ₃ CN	CH ₃ CCH
CH ⁺	SO ⁺	HCN	SiCN	HNCO	C ₃ N ⁻	CH ₂ NH	HNCNH	NH ₂ CHO	CH ₃ NH ₂
OH	CO ⁺	OCS	AlNC	H ₂ CS	PH ₃	NH ₂ CN	CH ₃ O	CH ₃ SH	CH ₂ CHCN
CO	HF	HNC	SiNC	C ₂ H ₂	HCNO	H ₂ CCO	NH ₃ D ⁺	C ₂ H ₄	HC ₅ N
H ₂	N ₂	H ₂ S	HCP	C ₃ N	HOCN	C ₄ H	H ₂ NCO ⁺	C ₅ H	C ₆ H
SiO	CF ⁺	N ₂ H ⁺	CCP	HNCS	HSCN	SiH ₄	NCCNH ⁺	CH ₃ CN	c-C ₂ H ₄ O
CS	PO	C ₂ H	AlOH	HOCO ⁺	HOOH	c-C ₃ H ₂	CH ₃ Cl	HC ₂ CHO	CH ₂ CHOH
SO	O ₂	SO ₂	H ₂ O ⁺	C ₃ O	l-C ₃ H ⁺	CH ₂ CN	MgC ₃ N	H ₂ C ₄	C ₆ H ⁻
SiS	AlO	HCO	H ₂ Cl ⁺	l-C ₃ H	HMgNC	C ₅	HC ₃ O ⁺	C ₅ S	CH ₃ NCO
NS	CN ⁻	HNO	KCN	HCNH ⁺	HCCO	SiC ₄	NH ₂ OH	HC ₃ NH ⁺	HC ₅ O
C ₂	OH ⁺	HCS ⁺	FeCN	H ₃ O ⁺	CNCN	H ₂ CCC	HC ₃ S ⁺	C ₅ N	HOCH ₂ CN
NO	SH ⁺	HOC ⁺	HO ₂	C ₃ S	HONO	CH ₄	H ₂ CCS	HC ₄ H	HC ₄ NC
HCl	HCl ⁺	SiC ₂	TiO ₂	c-C ₃ H	MgCCH	HCCNC	C ₄ S	HC ₄ N	H ₃ HNH
NaCl	SH	C ₂ S	CCN	HC ₂ N	HCCS	HNCCC	CHOSH	c-H ₂ C ₃ O	c-C ₃ HCCH
AlCl	TiO	C ₃	SiCSi	H ₂ CN		H ₂ COH ⁺		CH ₂ CNH	
KCl	ArH ⁺	CO ₂	S ₂ H					C ₅ N ⁻	
AlF	NS ⁺	CH ₂	HCS					HNCHCN	
PN	HeH ⁺	C ₂ O	HSC					SiH ₃ CN	
SiC	VO	MgNC	NCO					MgC ₄ H	
CP		NH ₂	CaNC					CH ₃ CO ⁺	
		NaCN	NCS					H ₂ CCCS	
		N ₂ O						CH ₂ CCH	

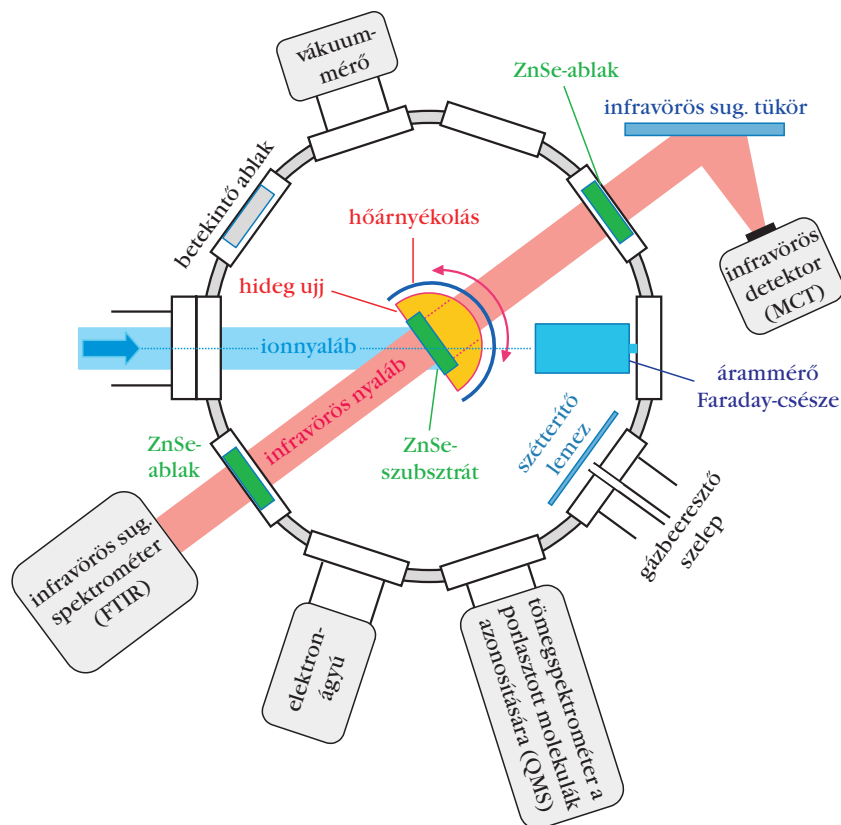
8 atom	9 atom	10 atom	11 atom	12 atom	13 atom	PAH ¹	fullerének
HCOOCH ₃	CH ₃ OCH ₃	CH ₃ COCH ₃	HC ₉ N	C ₆ H ₆	C ₆ H ₅ CN	1-C ₁₀ H ₇ CN	C ₆₀
CH ₃ C ₃ N	CH ₃ CH ₂ OH	HOCH ₂ CH ₂ OH	CH ₃ C ₆ H	n-C ₃ H ₇ CN	HC ₁₁ N	2-C ₁₀ H ₇ CN	C ₆₀ ⁺
C ₇ H	CH ₃ CH ₂ CN	CH ₃ CH ₂ CHO	C ₂ H ₅ OCHO	i-C ₃ H ₇ CN		C ₉ H ₈	C ₇₀
CH ₃ COOH	HC ₇ N	CH ₃ C ₅ N	CH ₃ COOCH ₃	1-C ₅ H ₅ CN			
H ₂ C ₆	CH ₃ C ₄ H	CH ₃ CHCH ₂ O	CH ₃ COCH ₂ OH	2-C ₅ H ₅ CN			
CH ₂ OHCHO	C ₈ H	CH ₃ CH ₂ OH	C ₅ H ₆				
HC ₆ H	CH ₃ CONH ₂						
CH ₂ CHCHO	C ₈ H ⁻						
CH ₂ CCHCN	CH ₂ CHCH ₃						
NH ₂ CH ₂ CN	CH ₃ CH ₂ SH						
CH ₃ CHNH	HC ₇ O						
CH ₃ SiH ₃	CH ₃ NHCHO						
NH ₂ CONH ₂	H ₂ CCCHCCH						
HCCCH ₂ CN	HCCCHCHCN						
CH ₂ CHCCH	H ₂ CCHC ₃ N						

¹sokgyűrűs aromás szénhidrogének

lasztéka és energiatartománya kiegészíti a többi kutatóhelyét. Szerencsés módon nemcsak kiegészíti, hanem ki is bővíti. Egy rövidesen üzembe helyezendő kis gyorsító (nagyfeszültségű platform, HVP) segítségével a napszél ionválasztékát és teljes energiatartományát, valamint a galaktikus eredetű kozmikus sugárzás alacsony energiás tartományát is szolgáltatni

tudjuk. „Napszélgenerátorunk” képességeit a 2. ábra mutatja be, ahol a napszél ionjainak hosszabb időn át mért adatait vetjük össze az ATOMKI gyorsítói által nyújtott lehetőségekkel.

A továbbiakban röviden ismertetjük az ATOMKI új asztrofizikai/asztrokémiai laboratóriumát, és az ott végzett kutatásokba is némi bepillantást nyújtunk.



3. ábra. A jeges mérőkamra (Ice Chamber for Astrophysics/Astrochemistry, ICA) felépítése a Tandetron-gyorsítónál [1].

Az ATOMKI asztrofizikai/asztrokémiai laboratóriuma

Az új laboratórium ötlete 2018-ban született, amikor *Nigel J. Mason*, az Europlanet Society elnöke, az Intézet Atom- és Molekulafizikai Laboratóriumába látogatott. Az ötlet gazdája Mason professzor, az ATOMKI ion-molekula ütközéseket vizsgáló kísérleti molekulfizikai csoportjának tagjai és az ATOMKI Gyorsítóközpontjának munkatársai voltak. Hamarosan több intézmény vezetése is felkarolta az ügyet, és kialakult egy többoldalú együttműködés az ATOMKI és Egyesült Királyság-beli egyetemek, úgymint a University of Kent (UoK), a Queen Mary University of London (QMUL) és a Queens University of Belfast (QUB) között, amelyhez később a dániai Aarhushi Egyetem is csatlakozott. Itthon az ELTE, a Miskolci Egyetem és az Energiakutató Központ kutatócsoportjaival működünk együtt. Az együttműködők három év alatt két komplett mérőállomást hoztak létre, egyet a 2 MV-os terminálfeszültségű Tandetron-gyorsító [7], egyet pedig az elektronciklotron-rezonanciás ionforrás (ECR ionforrás [7]) mellé telepítve.

Az ATOMKI elektrosztatikus Tandetron-gyorsítójának terminálfeszültsége 0,085–2,0 MV tartományban változtatható. Két multicusp ionforrással rendelkezik a proton- és hélium-ionnyalábokhoz, és egy céziumporlasztós ionforrással a nehezebb ionokhoz. Pro-

tonokra az ionenergia-tartomány 0,2–4,0 MeV, 200 μ A-nál nagyobb nyalábáram mellett. Nehezebb ionlövédékeknél (héliumtól aranyig) legalább néhány μ A ionáram lehetséges a céltárgyakon, az energiát a V_t terminálfeszültség és a gyorsított ion q töltésállapota határozza meg az

$$E_{\text{nyaláb}} = V_0 + V_t(q+1)$$

összefüggés szerint, ahol V_0 az ionforrás kivonófeszültsége. A Tandetron nyalábenergia-tartománya a napszél nagyenergiás részének felel meg (2. ábra).

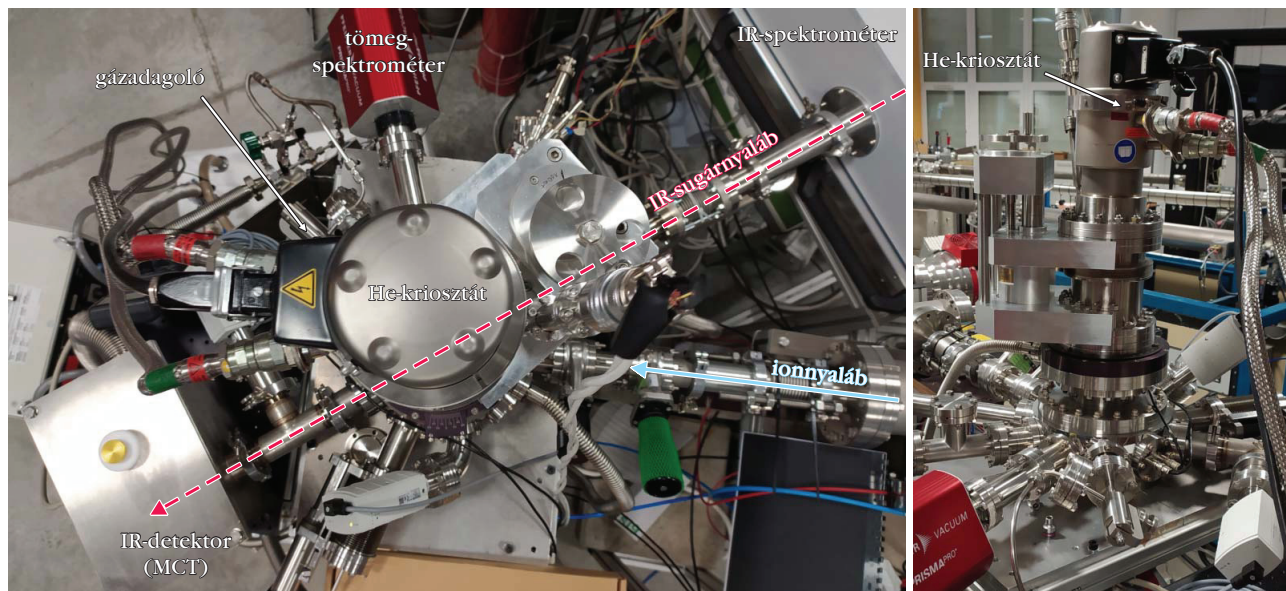
Miután az így létrehozott infrastruktúra bekapcsolódott abba a konzorciumba, amely elnyerte a 2020 januárjában induló H2020-as Europlanet 2022 RI infrastruktúra-projektet [8], a további fejlesztések és a kutatások jórészt ennek keretében folytak. A projekt nemzetközi hozzáférést biztosító (transnational access, TA) alprogramja keretében eddig nyolc, egyenként kéthetes

méréssorozatot hajtottunk végre Debrecenben, és a programtanács még ugyanennyire elfogadta a vendégkutatók javaslatait.

Az elsőként telepített, a Tandetron-gyorsító mellett működő ICA-mérőkamra (jeges mérőkamra asztrofizikai és asztrokémiai vizsgálatokra, Ice Chamber for Astrophysics/Astrochemistry, [9]) felépítését és fontosabb funkcióit a 3. ábra mutatja be, felül- és oldalnézeti képét a 4. ábra. A mintatartó és a mintahordozó felépítése pedig az 5. ábrán látható.

Az ICA vákuumkamrájának közepén egy hőárnýékolalt réz mintatartó helyezkedik el, amelyben akár négy, infravörös sugárzásra átlátszó (tipikusan cinkszelenid, ZnSe) mintahordozó (szubsztrát) rögzíthető. Ezek felületén asztrofizikai jéganalógok állíthatók elő (5. ábra). A mintatartó a kamra függőleges tengelye mentén mozgatható, és e tengely körül el is forgatható. Ez a kialakítás lehetővé teszi azonos módon felépített asztrofizikai jéganalógok négy független besugárzását. A ZnSe-szubsztrátok egy részére jó áteresztőképességű, hálószerű aranymintázat került (5. ábra). Ezeket nagy ionáramok esetén használjuk, hogy elkerüljük a minta felületének olyan mérvű feltöltődését, amely szikrázást eredményez. A kamrában a nyugalmi vákuumszint $5 \cdot 10^{-9}$ mbar. Ez elegendően kicsi ahhoz, hogy a maradékgázokból ne rakódjon le a méréseket zavaró mennyiség a hűtött mintatartóra.

A mintatartó zárt ciklusú héliumkriosztát segítségével 20 K-re hűthető, és hőmérséklete – egy fűtőblokk



4. ábra. Az ICA jeges mérőkamra felül- és oldalnézetben [1].

segítségével – a fűtés és a hűtés közötti egyensúly beállításával szabályozható. Ez 20–300 K működési hőmérséklet-tartományt tesz lehetővé.

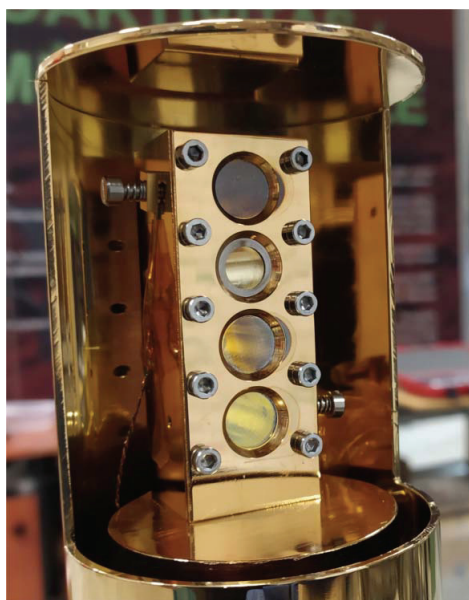
A jéganalógokat pontosan adagolt gázok vagy gőzök keverékének a hideg felületre történő lerakódásával állítjuk elő a szubsztrátokon. Ez vagy a kamra egyenletes elárasztásával, vagy egy, a szubsztráthoz közel tolt fűvókán át történhet. A gázokat és gőzöket – egy szelepes keverőrendszer segítségével – először egy keverőtartályba vezetjük. Miután itt egyensúlyba kerültek, egy finomszabályzó tűszelepen keresztül engedjük be azokat a fő vákuumkamrába. A jégretek vastagsága a néhányszor tíz nanométertől a néhány mikronig terjedő tartományba esik.

A kamra számos vákuumátvezetővel, nyílással van ellátva (3. ábra). Ezek a Tandetron-gyorsító által kibocsátott ionnyaláb fogadására, a vizsgálandó gázok bevezetésére, valamint a mérőeszközök (vákuummérő, Infravörös (IR) spektrométer, kvadrupól tömegspektrométer (QMS)) csatlakoztatására szolgálnak. A kvadrupól tömegspektrométert a maradékgázok és az ionnyaláb által porlasztott molekulák analíziséhez használják. Elektronágyúval történő, az ionnyalábbal egyidejű vagy attól független besugárzásra is lehetőség van. Két, egymással szemben elhelyezett kamranyílás az infravörös (IR) sugárzást áteresztő cink-szelepid (ZnSe) ablakokkal van el-

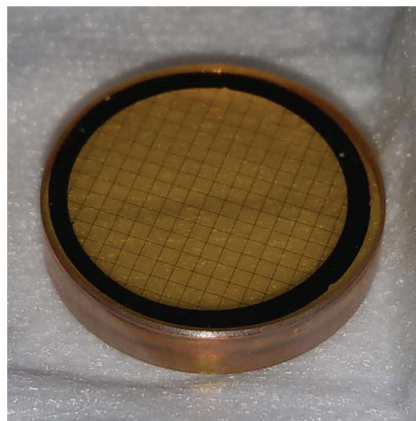
látva, hogy be- és kilépőnyílásként szolgáljanak a spektroszkópiai megfigyelés számára.

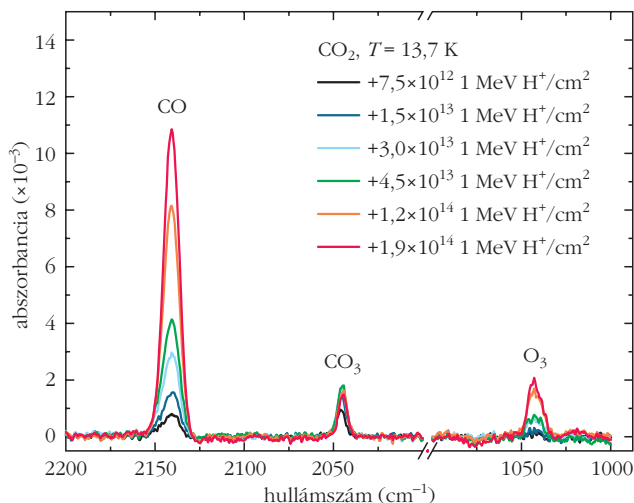
Az asztrofizikai jéganalóg minták fizikai-kémiai tulajdonságait elsősorban infravörös (Fourier Transform Infrared, FTIR) abszorpciós spektroszkópiával [11] követjük nyomon, a 3. ábrán látható módon. A mintán áthaladó infravörös sugarat a fő vákuumkamrán kívül elhelyezett, cseppfolyós nitrogénnel hűtött detektor érzékeli. A spektrumok a jéglerakódás és a besugárzás során folyamatosan felvehetőek, ezzel segítve a teljes mérési idő lerövidítését.

Az FTIR-spektroszkópiát nem csak a jéganalógokban jelen lévő molekulafajták azonosítására használjuk, hanem mennyiségi meghatározásukra is [1]. Lehetőség van a jégretek programozott felmelegítésével történő, fokozatos deszorpciójára is.



5. ábra. Bal oldalon a több minta besugárzására alkalmas mintatartó, körülötte a hőárnyékolással. Minden felület aranyozott. A jobb oldali képen az egyik, aranyhálóval ellátott ZnSe-mintahordozó (szubsztrát) látható, átmérője 15 mm, vastagsága 3 mm.



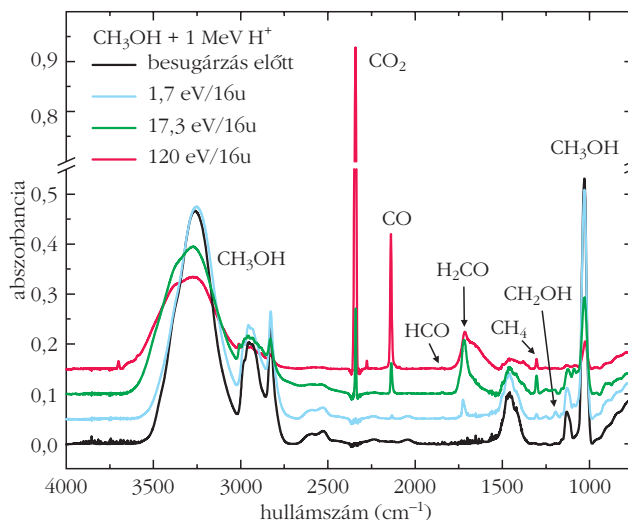


6. ábra. Egy korai (2019) mérés és egy demonstratív (bár kvalitatív) eredmény: az ábrán a szén-dioxid-jég besugárzásakor keletkező termékek abszorpciós vonalainak tartományát látjuk. A koncentrációval arányos csúcsok nagysága a növekvő besugárzási szinttel növekszik. Jól látható, hogy a besugárzással növekvő mennyiségű CO-fragmentum mellett megjelennek a szintetizált molekulák is. Ezen a hőmérsékleten a CO₃ is molekulaként létezik. Megjegyzés: az abszorbanca (vagy abszorpciós tényező) az elnyelő anyag által előidézett relatív intenzitáscsökkenés negatív logaritmus, amely az anyag koncentrációjával arányos [10].

Kvantitatív mérések végzéséhez pontosan kell ismernünk a minta felületét érő ionnyaláb áramát. További követelmény, hogy a besugárzás homogén kell legyen, az áramsűrűség nem változhat a minta felülete mentén. Mindezt a nyaláb – a katódsugárcsőves tévékészülékekben és monitorokban alkalmazott eltérítéshez hasonló – szétterítésével és a minta felületére eső tényleges áram folytonos monitorozásával érjük el.

Nem célunk, hogy mindazon méréseket bemutassuk, amelyeket eddig, többnyire a mérési javaslatokat benyújtó együttműködő partnereinkkel közösen végeztünk. Ezek egy része egyszerű molekulákból álló jegek viselkedését vizsgálja besugárzás hatására, más részük komplex szerves molekulák (sokgyűrűs aromás szénhidrogének és aminosavak) degradációját méri különböző besugárzási paraméterek mellett.

A kísérletek jellegét érzékeltetendő, két példát mutatunk be első méréseinkből. A 6. ábra szén-dioxid-jég besugárzásának hatását mutatja az elérhető legalacsonyabb mintahőmérsékleten. Csak azt a tartományt mutatjuk, amelyben a besugárzás hatására megjelenő



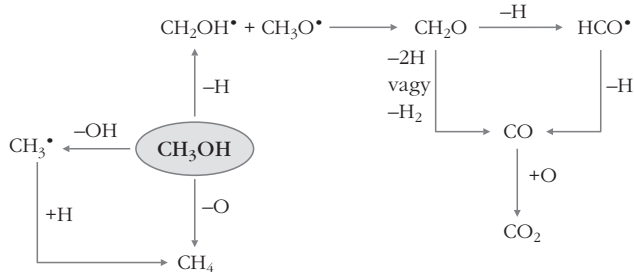
7. ábra. Koncentrációváltozások 20 K hőmérsékletű metanoljégben az 1 MeV energiájú protonok dózisának növekedésével. A dózisteljesítmény különös egysége (eV/oxigénatom-tömeg) a sugárkémia-ban széles körben használatos. Itt a 120 eV/16u dózis $4 \cdot 10^{15}$ ion becspódásának felel meg négyzetcentiméterenként [1].

termékek abszorpciós vonalai láthatók, maga a szén-dioxid-csúcs ezeknél sokkal nagyobb amplitúdójú. A csúcsok területe (közelítőleg amplitúdója is) a termékek koncentrációjával arányos. Az ábra nagyon jól demonstrálja, hogy a besugárzás hatására létrejövő molekulaszintézis, amely gázokban nagyon kis valószínűségű folyamat, jegekben nem valami különleges, ritka kivétel, hanem szabályszerűen megjelenik. Az ábra három csúcsa közül csak a CO-csúcs felel meg az eredeti CO₂-molekula szétbontásának, *fragmentációjának*. A másik két csúcs már olyan molekulákat jelez, amelyek csak fragmentumok egyesülésével jöhetnek létre.

A 7. ábrán a 20 K hőmérsékletű metanoljégben létrejövő változásokat követhetjük az 1 MeV energiájú protonok dózisának növekedésével, a 8. ábrán pedig a reakciócsatornák térképét az ionokkal bombázott metanoljégben. Itt a fragmentumok keletkezése a domináns folyamat. Az is megfigyelhető, hogy a kis dózisoknál megjelenő termékek egy része nagyobb dózisoknál maga is fogyni kezd (például CH₄).

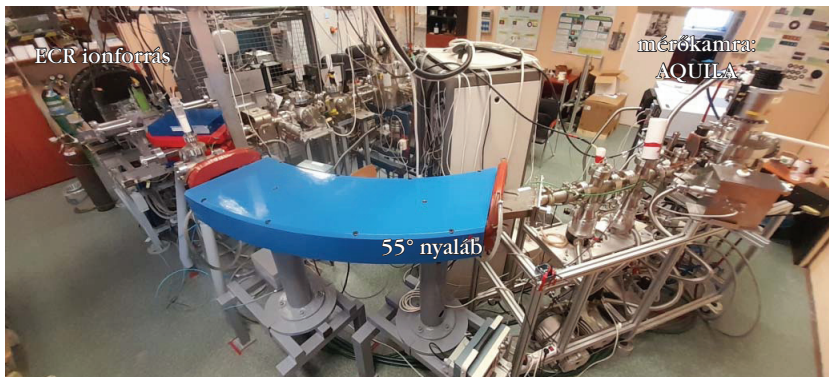
A 2. ábrából jól látható, hogy az ECR-ionforrás energiatartománya oda esik, ahol a Napból áramló ionok intenzitása, a napszél a legintenzívebb. Ezért az ECR mellett 2022 szeptemberében üzembe helyeztük az eredetileg a QUB-ban, a jegek ionbombázással történő porlasztásának vizsgálatára kifejlesztett és az ATOMKI-ban komplex mérőállomássá alakított mérőegyttest. AQUILA nevet (ATOMKI – Queens University Ion-beam Laboratory for Astrochemistry) kapta, és különösen nagy szerepet szánunk neki a Naprendszeren belül zajló folyamatok laboratóriumi modellezésében. Végleges felépítése az ICA-kamrához nagyon hasonló, ezt is ugyanazok a besugárzási és detektálási funkciók jellemzik (9. ábra). A következő másfél évre az AQUILA-mérőegyttesre már 9 progra-

8. ábra. Reakciócsatornák az ionokkal bombázott metanoljégben [1].



munk van előjegyezve, ebből 6 külső felhasználókkal közös projekt.

A következő cikkben azokról a mérésekről lesz szó, amelyeket az Európai Űrügynökség (ESA) által 2023 áprilisában indított JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) misszió [13] tervei ihlettek. A Jupiter környezetét vesszük majd szemügyre, és olyan, már publikált méréseinket ismertetjük, amelyek eredményei értékesek lehetnek a JUICE-misszió számára.



9. ábra. A napszél ionenergia-tartományában végzett besugárzások mérőhelye (AQUILA), az ECR-ionforrásnál [12].

Irodalom

1. Herczku P., Mifsud D. V., Ioppolo S., Juhász Z., Kaňuchová Z., Kovács S. T. S., Traspas Muña A., Hailey P. A., Rajta I., Vajda I., Mason N. J., McCullough R. W., Paripás B., Sulik B.: The Ice Chamber for Astrophysics-Astrochemistry (ICA): A new experimental facility for ion impact studies of astrophysical ice analogs. *Rev. Sci. Instr.* 92 (2021) 084501.
2. Brett A. McGuire: 2021 Census of Interstellar, Circumstellar, Extragalactic, Protoplanetary Disk, and Exoplanetary Molecules. *ApJS* 259 (2022) 30, DOI 10.3847/1538-4365/ac2a48
3. Arumainayagam, C. R. et al.: Extraterrestrial prebiotic molecules: photochemistry vs. radiation chemistry of interstellar ices. *Chem. Soc. Rev.* 48 (2019) 2293.
4. Rothard, H. et al., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 50 (2017) 062001.
5. Mewaldt, R. A. et al.: Long-term fluences of energetic particles in the heliosphere. *AIP Conference Proceedings* 598 (2001) 165; <https://doi.org/10.1063/1.1433995>
6. <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/fluences/HeOFeFluences.jpg>
7. Biri S., Rácz R., Gyürky Gy., Fülöp Zs., Juhász Z., Sulik B., Mifsud D.: Astrophysics, astrochemistry and laboratory space research with particle accelerators. *Giants – Gruppi Italiani di Astrofisica Nucleare Teorica e Sperimentale* 13 (2021) 9–12.
8. <https://www.europlanet-society.org/europlanet-2024-ri-facts-and-figures/>
9. <https://www.europlanet-society.org/europlanet-2024-ri/ta2-dplf/ta2-facility-11-atomki-ice-chamber-for-astrophysics-astrochemistry-ica/>
10. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Lambert-Beer-törvény>
11. https://hu.wikipedia.org/wiki/Fourier-transzformációs_infravörös_spektroszkópia
12. <https://www.europlanet-society.org/europlanet-2024-ri/ta2-dplf/ta2-facility-12-atomki-ecri-laboratory/>
13. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice

LABORATÓRIUMI ASZTROKÉMIAI VIZSGÁLATOK A JUPITER JEGES HOLDJAIT FELDERÍTŐ JUICE-MISSZIÓ JEGYÉBEN

Juhász Zoltán,¹ Duncan V. Mifsud,¹ Herczku Péter,¹ Zuzana Kaňuchová²

¹Atommagkutató Intézet, Debrecen

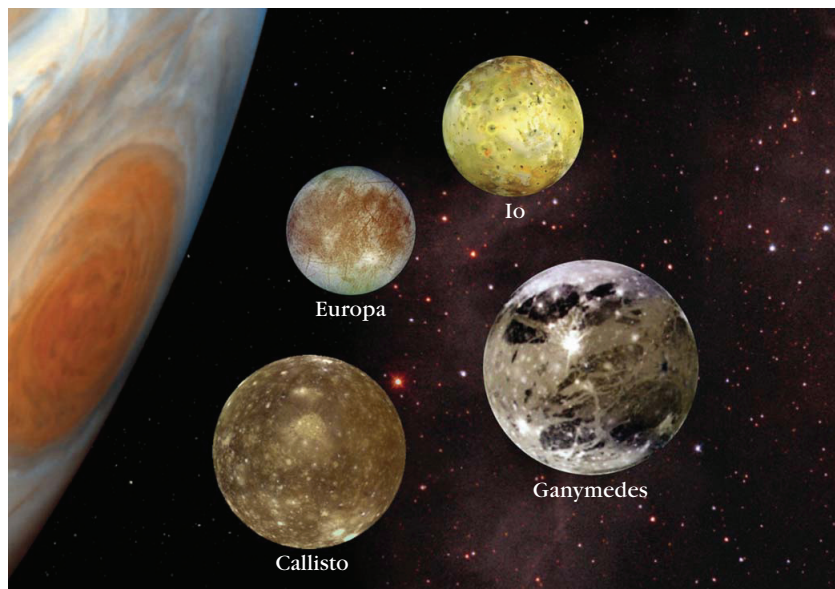
²Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, Szlovákia

A cikkben olyan laboratóriumi mérésekről lesz szó, amelyeket az Európai Űrügynökség (ESA) által nemrég indított JUICE-misszió (Jupiter Icy Moons Explorer [1]) tervei ihlettek. A méréseket az ATOMKI Tandetron-laboratóriumában végeztük, az előző cikkben leírt ICA (Ice Chamber for Astrophysics/Astrochemistry) nevű jeges mérőkamrában [2, 3]. A különböző összetételű jegeket kénionokkal, kéntartalmú jegeket

pedig elektronokkal bombáztuk, és az ennek hatására lezajló kémiai változásokat vizsgáltuk. A méréseket elsősorban az tette lehetővé, hogy a Tandetron-gyorsító kiválóan alkalmas nagy intenzitású kénionnyalábok előállítására széles energia- és töltésállapot-tartományban.

A következő részben először a Jupiter környezetét vesszük szemügyre, majd két olyan, már publikált, mérést ismertetünk, amelyek eredményei értékesek lehetnek a JUICE-misszió számára. A Jupiter jeges holdjain számos olyan folyamat zajlik, amely a Naprendszer kémiai fejlődését, evolúcióját meghatározza,

Ez a cikk a 2022. november 14-én a Magyar Tudomány Ünnepe alkalmából az MTA Székházban tartott Szegő Károly-émlékülésen elhangzott előadás rövidített változata.



1. ábra. A Jupiter és a Galilei-holdak (forrás: NASA/JPL).

és amelyet mi is vizsgálni tudunk. A Jupiter holdrend-szerét olyan laboratóriumnak is tekinthetjük, ami modellül szolgál más holdrendszerekhez, illetve az exobolygók leírásához. A következőkben röviden ismertetjük a Jupiter nagy holdjainak felszínén lejátszódó folyamatokat.

A Jupiter Galilei-holdjai

A Naprendszer legnagyobb bolygójaként talán nem meglepő, hogy a Jupiter körül számos természetes hold kering. A mintegy 80 ismert holdja közül a legjobban tanulmányozott a négy Galilei-hold: az Io, az Europa, a Ganymedes és a Callisto (1. ábra). E holdak a Naprendszer legnagyobbjai közé tartoznak, a Ganymedes kiterjedésben nagyobb (bár lényegesen

kisebb tömegű), mint a Merkúr bolygó. A Galilei-holdak mindegyikének tengely körüli forgása kötve van a Jupiter körüli keringéshez, ami azt eredményezi, hogy mindig ugyanazzal az oldalukkal fordulnak a bolygó felé. Ezenkívül az Io, az Europa és a Ganymedes között 4:2:1 pályarezonancia áll fenn. E holdakat *Galileo Galilei* tiszteletére nevezték el Galilei-holdaknak, aki a 17. század elején, elsőként azonosította őket egyértelműen.

A legbelső hold, az Io a Naprendszer geológiailag legaktívabb objektuma, felszínén több mint 400 aktív vulkán található. Ezt az extrém vulkanizmust a holdat érő nagy árapályerők váltakozásai – ahogyan a hold a Jupiter körüli pályáján halad

– okozzák. Az árapályerők eltorzítják alakját, és a belső súrlódás okozza felmelegedését. A pályarezonancia és az ebből eredő gravitációs kölcsönhatások az Európával és a Ganymedesszel az Iót ellipszis alakú pályán tartják, így biztosítva alakjának folyamatosan változó mértékű torzulását és a felszín alatti szilikátközetek tartós olvadását [4]. Az Io vulkanizmusa jelentős mértékben hozzájárul a Jupiter magnetoszférájának ionösszetételéhez [5]. A molekuláris vulkáni kilövellések által kilökött gázmolekulák, például az SO_2 és H_2S hatékonyan disszociálódnak és ionizálódnak a magnetoszférában, így azt energikus protonokkal, oxigénionokkal, kénionokkal és elektronokkal népesítik be.

A többi Galilei-holddal ellentétben az Io nem jeges világ. Sokkal inkább egy nagy sűrűségű égitest, amelynek vas- vagy vas-szulfid (FeS_2) magját szilikát-



Jubász Zoltán fizikus (Szeged), PhD (Hollandia, Groningen) az ATOMKI Kísérleti Molekulafizikai Kutatócsoportjának vezetője. Kutatási területe útkutatáshoz kapcsolódó ion-molekula ütközések kísérleti vizsgálata. Modellszámításokat is végez, például üstökösök sugárzása, ionkeltési folyamatok leírása a kísérletileg vizsgált ütközésekben. Kutatócsoportjával – az Europlanet 2024 RI nemzeti együttműködés tagjaként – bekapcsolódott az űrbéli jegek laboratóriumi megfelelőinek kísérleti vizsgálatába.



Herczku Pétera Debreceni Egyetemen szerzett fizikusi diplomát, majd doktori fokozatot. Jelenleg az ATOMKI Kísérleti Molekulafizikai Kutatócsoportjának tudományos munkatársa. Kutatásai során az asztrofizika és az asztrokémia határterületének kérdéseit boncolgatja. Vizsgálatainak középpontjában a külső Naprendszerben, illetve a mélyűrben megtalálható jegekben az ionizáló sugárzások hatására bekövetkezett fizikai, kémiai változások folyamatainak megértése, felderítése áll.



Duncan V. Mifsud 2023-ban szerzett PhD-fokozatot fizikából a Kenti Egyetemen. Az ATOMKI Kísérleti Molekulafizikai Kutatócsoport tudományos munkatársa, ahol kísérleti kutatásokat végez az ionizáló sugárzások hatásának vizsgálatára asztrokémiai szempontból releváns jegekben. Ezen kutatásain túl Duncant a fák évgyűrűinek környezet- és régészeti tudományokban való felhasználása, valamint a kozmikus jelenségek, például a szupernóvák kormeghatározása is szakmai szinten érdekli.



Zuzana Kaňuchová csillagászat és asztrofizika szakon végzett 2003-ban a Pavol Jozef Šafárik Egyetemen, Kassán. 2008-ban doktorált csillagászatból a pozsonyi Comenius Egyetemen. Kutatásait elsősorban az szilárd fázisban lejátszódó asztrokémiai folyamatok laboratóriumi vizsgálatának területén végzi, szakterülete a Naprendszer kis testjeinek és a csillagközi anyag kémiaja.

kéreg és köpeny veszi körül, amelynek mintegy 10%-a az árapályhatás miatt olvadt. Az Io felszínét a vulkáni kilövellésekből származó kifagyott kén-dioxid (SO_2) és különböző atomszámú kénmolekulákból (S_x) álló réteg borítja, kisebb mennyiségben H_2S és SO_2Cl_2 is feltehető. Az Io felszínére fagyott SO_2 -réteg napi kondenzációs és szublimációs ciklusai vélhetően egy ritka, kiterjedt légkört hoznak létre.

Annak ellenére, hogy az Europa a Galilei-holdak közül a legkisebb, vitathatatlanul ő váltotta ki a legnagyobb izgalmat a bolygótudományi közösségben. Ennek oka, hogy a holdon – feltehetően – egy szilikátköpeny felett fekvő, ásványi sókban gazdag, folyékony vízből álló globális óceán található a felszín alatt [6, 7]. Ezt az óceánt az árapályfűtés tartja folyékony fázisban, ami esetleg aktív hidrotermális nyílásokat is működtethet az óceán és a köpeny határfelületén. A különböző ásványi sókat és hőforrásokat tartalmazó meleg óceán jelenléte az Európát a földön kívüli élet kialakulásának és folyamatos fennmaradásának elsődleges jelöltjévé tette. Az Europa felszín alatti globális óceánja lakhatóságát a jeges felszínnel való kölcsönhatásai még valószínűbbé teszik. Az Europa pályája a Jupiter óriási magnetoszféráján belül van, így a hold felszínét folyamatosan nagyenergiájú töltött részecskék (ionok és elektronok) bombázzák. Mivel a felszín nagyrészt vízjégből áll, a besugárzás hatására nagy mennyiségű oxidálószer, például OH és O_2 képződik. Ezek a felszín alatti óceánba jutva, hozzájárulhatnak a kémiai egyensúly eltolódásához, és részt vehetnek biológiai folyamatokban. A felszínt ért sugárzás gáz fázisú molekulák kilökődését is eredményezi a jégből, és egy nagyon ritka oxigénatmoszférát is fenntart.

A Ganymedes – a Galilei-holdak közül a legnagyobb (ami egyben a Naprendszer legnagyobb holdja is) – egy teljesen differenciált égitest, amelynek saját aktív magnetoszférája van. Ezt vasban gazdag folyékony magja hozza létre. A hold felszíne főként vízjégből áll, amely elszórtan más kisebb összetevőket is tartalmaz, például szén-dioxidot és kén-dioxidot. Az ásványi sók, mint például az MgSO_4 és esetleg a Na_2SO_4 megfigyelése a felszínen egy felszín alatti óceán létezésére utal, ahonnan ezen anyagok származnak, hasonlóan az Európához. Ezzel szemben azt feltételezik, hogy a Ganymedesen óceánok több rétegben elhelyezkedő sorozata lehet, amelyeket különböző fázisú vízjégrétegek választanak el egymástól, és a legalsó folyékony réteg érintkezik a szilikátos köpennyel. Az Europa óceánjához hasonlóan a Ganymedes felszín alatti óceánjait is a földön kívüli élet egyik legígéretesebb lehetséges lelőhelyeként tartják számon.

A Galilei-holdak közül a legkülső és az egyetlen, amely nem vesz részt a rendszerre jellemző pályarezonanciában, a Callisto. A Callisto felszíne igen erősen kráteresedett kőzet és vízjég keveréke, amelyben kisebb mennyiségben szén-dioxid és kén-dioxid is

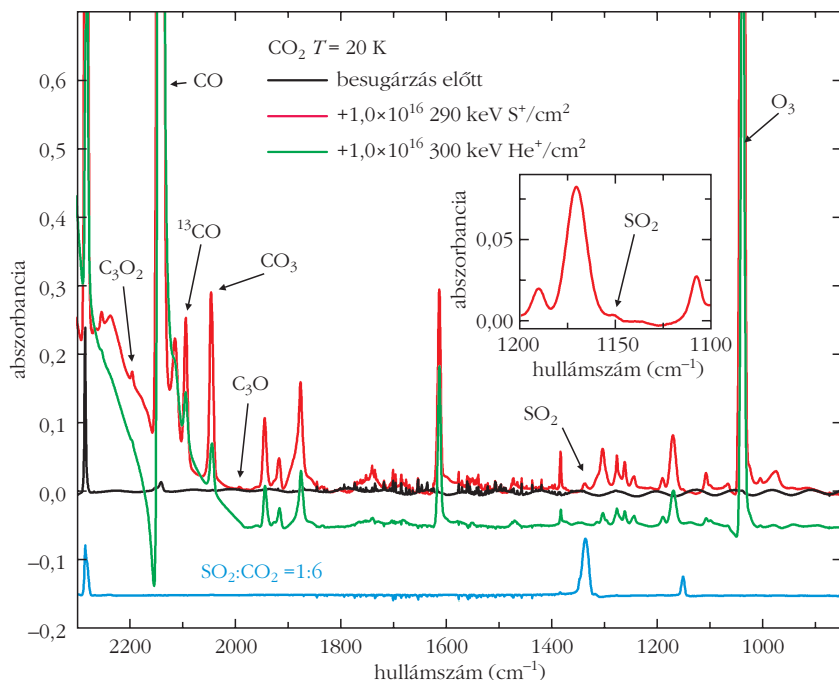
jelen van. Úgy gondolják, hogy a jeges felszín alatt sós óceánok léteznek. Ezen túlmenően a Callisto belső szerkezetéről kevés biztosat tudunk. A Galileo Orbiterrel végzett tehetetlenségnyomaték-mérések arra utalnak, hogy belseje nagyrészt kőzet és jég differenciálatlan tömege, amely egy kis szilikátmag körül egyesül. Azonban nagy kihívást jelent azon elképzelés igazolása, hogy egy olyan nagy hold, mint a Callisto, a kialakulása során bekövetkezett globális olvadás következtében nem tud differenciálódni, és ezt a numerikus szimulációk sem igazolták. Így a Hold belső szerkezetével kapcsolatos számos kérdés jelenleg megválaszolatlan.

A Galilei-holdak rendszere vitathatatlanul az egyik legérdekesebb naprendszerbeli helyszínt kínálja a szilárd jég sugárzási asztrokémiájának tanulmányozására. Mind a négy hold a Jupiter óriási magnetoszférájában kering, amelyet az Io molekuláris vulkáni kilövellések disszociációjából és ionizációjából származó töltött részecskék népesítenek be. Ezért e holdak jeges felszínét folyamatosan bombázzák e töltött lövedékek, ami különféle fizikai és kémiai változásokat eredményez. Ilyen változások lehetnek például a felszíni jég eróziója vagy porlasztása, a ritka légkör kialakulása és fenntartása, a jég tömörödése és amorfizálódása, a radiolitikus kémiai folyamatok eredményeként új molekulák képződése és a beágyazódott reaktív ionok beépülése a jég molekuláiba.

Kén-dioxid az Europa felszínén

A kén-dioxid azon oxigénben gazdag molekulák egyike (a többiek az O_2 , CO_2 , H_2O_2 és az SO_4^{2-} gyök), amelyekről ismert, hogy léteznek az Europa felszínén [8], és így fontos szereplői lehetnek a feltételezett felszín alatti óceánban előforduló életfenntartó redoxi kémiának. Így fontos, hogy megértsük miként jön létre az SO_2 az Europa jeges felszínén. Feltételeztük, hogy az SO_2 az óceánon belül a folyamatos hidrotermális tevékenység eredményeként szabadulhat fel, majd felfelé szállva a felszínre kiáramlik, lecsapódik és jéggé alakul. Egy ilyen mechanizmus azonban elméletileg az SO_2 viszonylag egyenletes eloszlását eredményezné az Europa felszínén. Ezzel szemben a kén-dioxid a hold haladási irányával ellentétes félgömbjén sokkal nagyobb mennyiségben figyelhető meg [9].

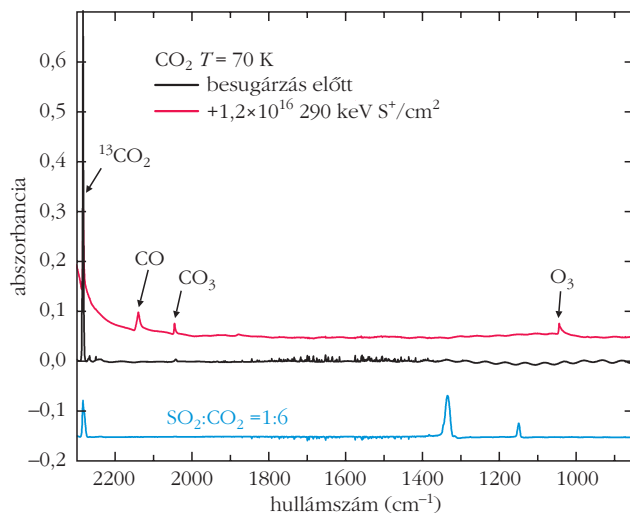
Az SO_2 eloszlása olyan képződési mechanizmussal utal, amelyben a Jupiter magnetoszférájának ionjai játszik fő szerepet. Az Europa keringési ideje körülbelül 85 óra; ez lényegesen hosszabb, mint a Jupiter forgási ideje, amely körülbelül 10 óra. A magnetoszférikus ionok és elektronok a Jupiter forgását követik, és gyorsabbak, mint az ott haladó hold, így többnyire az Europa hátsó félgömbjére csapódnak be. Ezért talán nem meglepő, hogy az elmúlt évtizedek-



2. ábra. CO₂-jég infravörös spektruma ionbesugárzás előtt 20 K hőmérsékleten (fekete vonal) és kénionokkal történt besugárzás után (piros vonal), a keletkező SO₂ azonosítása céljából. Összehasonlításul a SO₂ – CO₂ keverékspektrumában (kék vonal) tisztán megfigyelhetők az SO₂ spektrális sávjai. Héliumionokkal történt besugárzás után (zöld vonal) ezek a vonalak – ellentétben a kénionok esetével – nem jelennek meg. Megjegyzés: az abszorbancia (vagy abszorpciós tényező) az elnyelő anyag által előidézett relatív intenzitás-csökkenés negatív logaritmusával, amely az anyag koncentrációjával arányos [13].

ben számos kutató az SO₂ jelenlétét az Europa felszínén a magnetoszférából származó kénionok implantálódásának tulajdonította. Azt feltételezték, hogy ezek a becsapódott kénionok reakcióba lépnek az Europa felszínén lévő jégben található oxigéntartalmú molekulákkal, és ezekből a reakciókból jön létre az SO₂. A laboratóriumi kísérletek azonban nem támasztják alá ezt a feltételezést. Főként vízjégben, ami az Europa felszínét is borítja, a laboratóriumi kísérletek azt mutatták, hogy SO₂ helyett H₂SO₄ és annak

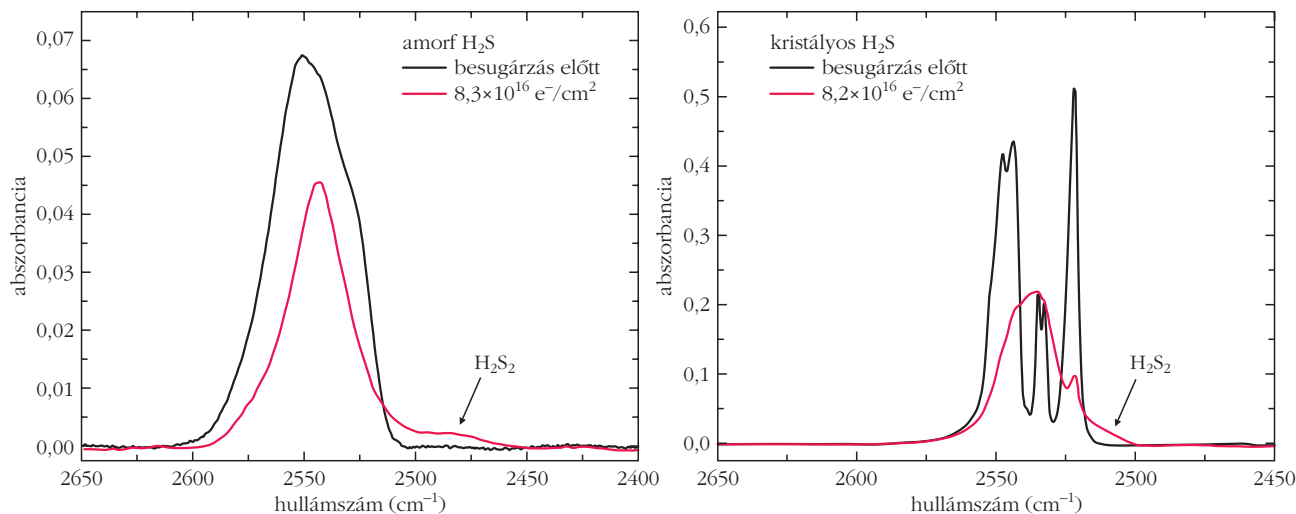
3. ábra. Ugyanaz, mint a 2. ábra, csak 70 K hőmérsékletű CO₂-jég esetében.



hidrátjai keletkeznek. Továbbá megfigyelték, hogy ezen H₂SO₄-hidrátok hozama a lövedék kénion energiájának növekedésével nő. A reaktív potenciálon alapuló molekuladinamikai szimulációkat alkalmazó elméleti vizsgálatok szintén nem találtak bizonyítékot olyan hatékony reakciómechanizmusra, amelynek révén a kénion-implantáció elsődleges termékeként SO₂ keletkezne.

Az Europa felszínén számos más oxigéntartalmú jég is található, mint például fagyott állapotú CO₂ és O₂. Ez újabban motiválta azokat a kísérleteket, amelyekben kénionok ilyen anyagokba történő implantálódását az SO₂ lehetséges alternatív forrása-ként vizsgálták. Lv és munkatársai [10] kimutatták, hogy 15 K hőmérsékleten a tiszta, fagyott CO- és CO₂-rétegekbe történő ilyen implantációk valóban SO₂-t eredményeznek, és arra jutottak, hogy egy geológiai évszázad, 2 · 10⁴ éves időskála elegendő az Európán megfigyelt SO₂-mennyiség előállításához. Ez a becs-

lés azonban azon a feltételezésen alapult, hogy a 15 K-en végzett kénion-implantációs kísérletek reprezentatívak az Europa felszínén lejátszódó folyamatokra, azonban az Europa felszínét lényegesen magasabb hőmérséklet jellemzi. Boduch és munkatársai [11] utóvizsgálatai nem mutattak ki SO₂-t a 16 K hőmérsékleten tiszta szén-dioxid-jégbe történő kénion-implantációt követően, ami egyértelműen ellentétben áll Lv és munkatársai [10] korábbi eredményeivel. Azonban meg kell jegyezni, hogy Boduch és munkatársai [11] a termék kimutatására ultrabolya-abszorpciós spektroszkópiát használtak, ezért lehetséges, hogy az esetleges SO₂ képződését elfedte más kénion-tartalmú vegyületek erősebb abszorpciója, amelyet a kénion-implantáció után detektáltak. Mindazonáltal nyilvánvaló, hogy az SO₂ eredetének kérdését az Europa felszínén ezek a vizsgálatok nem zárták le. Az ATOMKI laboratóriumaiban ezért újabb kísérletekben vizsgáltuk az SO₂-képződés lehetőségét CO- és CO₂-, valamint az O₂-molekulákból álló jegekben nagyszámú kénion becsapódása után (> 10¹⁶ ion/cm²) [12]. A kísérleteket 20 K és 70 K hőmérsékleten is elvégeztük, hogy meghatározzuk a hőmérséklet esetleges hatását a SO₂ képződésre. Ezek a vizsgálatok csak 20 K hőmérsékleten mutatták ki egyértelműen kén-dioxid keletkezését infravörös spektroszkópiával (2. ábra). Az Europa felszínére jellemző hőmérséklet közelében, 70 K-en egyáltalán nem tapasztaltunk SO₂-keletkezést (3. ábra). Az eredet kérdése ezért nyitott marad, bár a mole-



4. ábra. A H_2S -jég infravörös abszorpciós spektrumai 20 kelvin hőmérsékleten elektronokkal történő besugárzás előtt (fekete vonalak) és $8,3 \cdot 10^{16}$ elektron/ cm^2 besugárzás után (piros vonalak). A bal oldali ábrán az amorf fázisú, a jobb oldalin a kristályos fázisú jegek spektrumi láthatók. Jól észrevehető, hogy az amorf jég széles, szerkezet nélküli abszorpciós sávjával szemben a kristályos jég a szabályos szerkezetekre jellemző éles csúcsokat mutat, jól meghatározott frekvenciáknál nyeli el a sugárzást. A besugárzás utáni spektrumban mindkét esetben megjelenik az annak hatására létrejövő H_2S_2 -molekula abszorpciós sávja is.

kulák holdfelszíni eloszlása továbbra is arra utal, hogy magnetoszférikus ionok becsapódásával magyarázható a molekulák keletkezése. Könnyen lehet, hogy ionbesugárzás hatására a – jégben korábban felhalmozódott – kénsavmolekulák, vagy a felszínen szintén kimutatott magnézium-szulfát alakul át kén-dioxidá.

A molekulák sugárzástűrésének összehasonlítása amorf és kristályos jegekben

Laboratóriumi kísérleteink megerősítették, hogy a jegeket alkotó molekulák radiolitikus bomlási sebessége a jég kristályszerkezetétől függ, és néhány kristályos szerkezetű jég jobban ellenáll a sugárzásnak, mint amorf társaik. A kristályos jégfázisok sugárzástűrésének mértéke a szilárd szerkezetüket jellemző molekulák közötti kölcsönhatások természetétől, erősségétől és a molekularácsban való kiterjedésüktől függ. Kimutattuk például, hogy a kristályos metanol (metil-alkohol) 20 K-en 2 keV-os elektronokkal való besugárzáskor lényegesen lassabban bomlik, mint az amorf fázisú, ami a több, erős hidrogénkötés stabilizáló hatásnak köszönhető [14]. Ezen eredményeknek fontos következményei vannak a csillagközi jég és a külső naprendszerbeli égitestek asztrokémiájára nézve, mivel azt jelentik, hogy az amorf jég besugárzásakor keletkező kémiai termékek (amelyek között lehetnek a biológia szempontjából fontos prebiotikus molekulák is) nagyobb mennyiségben kell előfordulniuk, mint a kristályos fázisok hasonló besugárzásaakor keletkező termékek.

Egy másik kísérleti tanulmányunkban H_2S - és SO_2 -jég amorf és kristályos fázisainak összehasonlító és szisztematikus elektronbesugárzását végeztük el 1,5 és 2 keV-os elektronokkal [15]. Amorf jeget úgy tudunk

létrehozni, hogy igen alacsony hőmérsékletű felületre (20 K) fagyasztjuk le a vizsgált gáz fázisú anyagot a mérőkamrában. A vizsgálathoz szükséges kis mennyiségű gáz beeresztése csak kismértékű nyomásnövekedéssel jár a kamrában, például az $5 \cdot 10^{-9}$ mbar alap vákuumszint helyett $5 \cdot 10^{-7}$ mbar nyomás alakul ki a lerakódás folyamán. Ilyen alacsony hőmérsékleten a molekulák úgy tapadnak a felülethez, hogy nincs módjuk szabályos alakzatba rendeződni, ezért amorf szerkezetű jég keletkezik. Ha a lerakódás magasabb hőmérsékleten történik, a molekulák kristályos struktúrát kialakítva ülnek a felületre. Az ehhez szükséges „magas” hőmérséklet H_2S esetén 60 K, SO_2 esetén 90 K. Ha ezután a kialakult jeget 20 K-re hűtjük, a jég kristályos szerkezete megmarad. Az amorf és a kristályos fázis infravörös sugárzást elnyelő képessége lényegesen különbözik. Jól mutatja ezt a 4. ábra H_2S esetére.

Kimutattuk, hogy a H_2S esetében az amorf jég gyorsabban bomlik, mint a kristályos, hasonlóan a metanol esetében korábban közöltekhez. Ez itt is a kristályos fázisban az amorf fázishoz képest nagyobb számú hidrogénkötésnek, azok strukturáltabb rendszerének, valamint az ezzel járó nagyobb belső rácsenergiának tulajdonítható. Mindezek a radiolitikus kémiai változás létrejöttéhez magasabb energiabevitt igényelnek a lövedékelektronoktól. A H_2S_2 képződése az elektronbesugárzás termékeként relatíve nagyobb mértékben fordul elő az amorf fázisban, mint a kristályos fázisban, részben a radiolitikusan keletkező HS-gyökök nagyobb mennyiségének köszönhetően.

A hidrogénkötéseket nem tartalmazó SO_2 -jég besugárzása váratlan eredményeket hozott. Az amorf szerkezetű jég esetében két jellemző szakasz figyelhető meg a besugárzott dózis függvényében: alacsony besugárzás esetén, amikor a jég valószínűleg ellenáll a radiolitikus bomlásnak (valószínűleg az SO_2 disszociá-

cióját követő újraképződése miatt), és magas besugárzás esetén, amikor lassú, exponenciális bomlási tendencia figyelhető meg. Ez nagymértékben eltér a kristályos jégtől, amelynél először gyors exponenciális bomlás figyelhető meg az alacsony besugárzású tartományban, majd lassabb bomlás (amely lassabb, mint az amorf fázisé) a magas besugárzású tartományban. Érdekes módon a kristályos jég besugárzása következtében az SO_3 képződése mindig nagyobb volt, mint az amorf jég besugárzása során, ami valószínűleg az amorf jég radiolitikus bomlással szembeni kezdeti ellenállásának és az ezt követő infravörös inaktív kén allotropok nagyobb mennyiségű képződésének köszönhető.

Eredményeink nemcsak a kéntartalmú asztrokémiaili jegek fázisfüggő sugárkémiaiájának további vizsgálata szempontjából fontosak, amit eddig egyébként figyelmen kívül hagytak az irodalomban, hanem a kén kozmikus környezetben zajló kémiai folyamatainak tágabb megértése szempontjából is. A fázisfüggő radiokémiaiának különösen nagy szerepe lehet az Io felszínén a lefagyott kéntartalmú jegekben lezajló folyamatokban.

Irodalom

1. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice
2. Sulik B., Herczku P., Juhász Z., Mifsud D. V., Kovács S., Ioppolo S., Rácz R., Biri S., McCullough R. W., Kuswaha R. K., Kaňuchová Z., Vajda I., Lakatos G., Mason N. J.: Jeges égitestek ionokkal bombázott felületén zajló folyamatok és laboratóriumi modellezésük. *Fizikai Szemle* 73 (2023) 256–262.
3. Herczku P., Mifsud D. V., Ioppolo S., Juhász Z., Kaňuchová Z., Kovács S. T. S., Traspas Muña A., Hailey P. A., Rajta I., Vajda I., Mason N. J., McCullough R. W., Paripás B., Sulik B.: The Ice Chamber for Astrophysics-Astrochemistry (ICA): A new experimental facility for ion impact studies of astrophysical ice analogs. *Rev. Sci. Instr.* 92 (2021) 084501.
4. Tyler R. H., Henning W. G., Hamilton C. W.: Tidal Heating in a Magma Ocean within Jupiter's Moon Io. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 218 (2015) 22.

5. Yoshikawa I., Suzuki F., Hikida R., Yoshioka K., Murakami G., Tsuchiya F., Tao C., Yamazaki A., Kimura T., Kita H., Nozawa H., Fujimoto M.: Volcanic Activity on Io and its Influence on the Dynamics of the Jovian Magnetosphere Observed by EXCEED/Hisaki in 2015. *Earth Planets and Space* 69 (2017) 110.
6. Carr M. H., Belton M. J. S., Chapman C. R., Davies M. E., Giessler P., Greenberg R., McEwen A. S., Tufts B. R., Greeley R., Sullivan R., Head J. W., Pappalardo R. T., Klaasen K. P., Johnson T. V., Kaufman J., Senske D., Moore J., Neukum G., Schubert G., Burns J. A., Thomas P., Veverka J.: Evidence for a Subsurface Ocean on Europa. *Nature* 391 (1998) 363.
7. Kivelson M. G., Khurana K. K., Russell C. T., Volwerk M., Walker R. J., Zimmer C.: Galileo Magnetometer Measurements: A Stronger Case for a Subsurface Ocean at Europa. *Science* 289 (2000) 1340.
8. Johnson R. E., Quickenden T. I., Cooper P. D., McKinley A. J., Freeman C. G.: The Production of Oxidants in Europa's Surface. *Astrobiology* 3 (2003) 823.
9. Becker T. M., Trumbo S. K., Molyneux P. M., Retherford K. D., Hendrix A. R., Roth L., Raut U., Alday J., McGrath M. A.: Mid-Ultraviolet Hubble Observations of Europa and the Global Surface Distribution of SO_2 . *Planet. Sci. J.* 3 (2022) 129.
10. Lv X. Y., Boduch P., Ding J. J., Domaracka A., Langlinay T., Palumbo M. E., Rothard H., Strazzulla G.: Sulphur Implantation in CO and CO_2 Ices. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 438 (2014) 922.
11. Boduch P., Brunetto R., Ding J. J., Domaracka A., Kaňuchová Z., Palumbo M. E., Rothard H., Strazzulla G.: Ion Processing of Ices and the Origin of SO_2 and O_3 on the Icy Surfaces of the Icy Jovian Satellites. *Icarus* 277 (2016) 424.
12. Mifsud D. V., Kaňuchová Z., Herczku P., Juhász Z., Kovács S. T. S., Lakatos G., Rahul K. K., Rácz R., Sulik B., Biri S., Rajta I., Vajda I., Ioppolo S., McCullough R. W., Mason N. J.: Sulfur Ion Implantations Into Condensed CO_2 : Implications for Europa. *Geophysical Research Letters* 49, (2022) paper: e2022GL100698.
13. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Lambert-Beer-törvény>
14. Mifsud D. V., Hailey P. A., Herczku P., Sulik B., Juhász Z., Kovács S. T. S., Kaňuchová Z., Ioppolo S., McCullough R. W., Paripás B., Mason N. J.: Comparative electron irradiations of amorphous and crystalline astrophysical ice analogues. *Physical Chemistry Chemical Physics* 24 (2022) 10974.
15. Mifsud D. V., Herczku P., Rácz R., Rahul K. K., Kovács S. T. S., Juhász Z., Sulik B., Biri S., McCullough R. W., Kaňuchová Z., Ioppolo S., Hailey P. A., Mason N. J.: Energetic electron irradiations of amorphous and crystalline sulphur-bearing astrochemical ices. *Frontiers in Chemistry* (2022) 1003163.

FEJLESZTÉSEK NAPRENDSZER-KUTATÁSI MISSZIÓKBAN

Szalai Sándor – Wigner Fizikai Kutatóközpont
Nagy János – Energiatudományi Kutatóközpont

A VEGA-misszió

A Halley-üstökös 76 évenként kerül földközeli, ezért 1986-ban egyedülálló lehetőség kínálkozott az üstökös műszeres megfigyelésére. A VEGA-misszió kombinálta a Vénusz kutatását a Halley-üstökös közvetlen vizsgálatával. 1984. december 15-én és 21-én két, azonos felépítésű űrszondát – VEGA-1 és VEGA-2 – indítottak [1], 1985 júniusában a Vénusz közelébe érve lebocsátottak egy leszállóegységet és ballont, valamint – felhasználva a Vénusz gravitációs erejét – a két szon-

dát a Halley-üstökös felé tudták irányítani. A VEGA-1 szonda 1986. március 6-án érkezett az üstökös közelébe, míg VEGA-2 három nappal később. A szondák sebessége 79,2 km/s, illetve 76,8 km/s volt a találkozáskor [2]. A Halley-üstökös retrográd pályájú, ezért a találkozáskor a szondák az üstökössel ellenkező irányban haladtak, emiatt a közeli megfigyelésre rövid idő, csak 3 óra állt rendelkezésre.

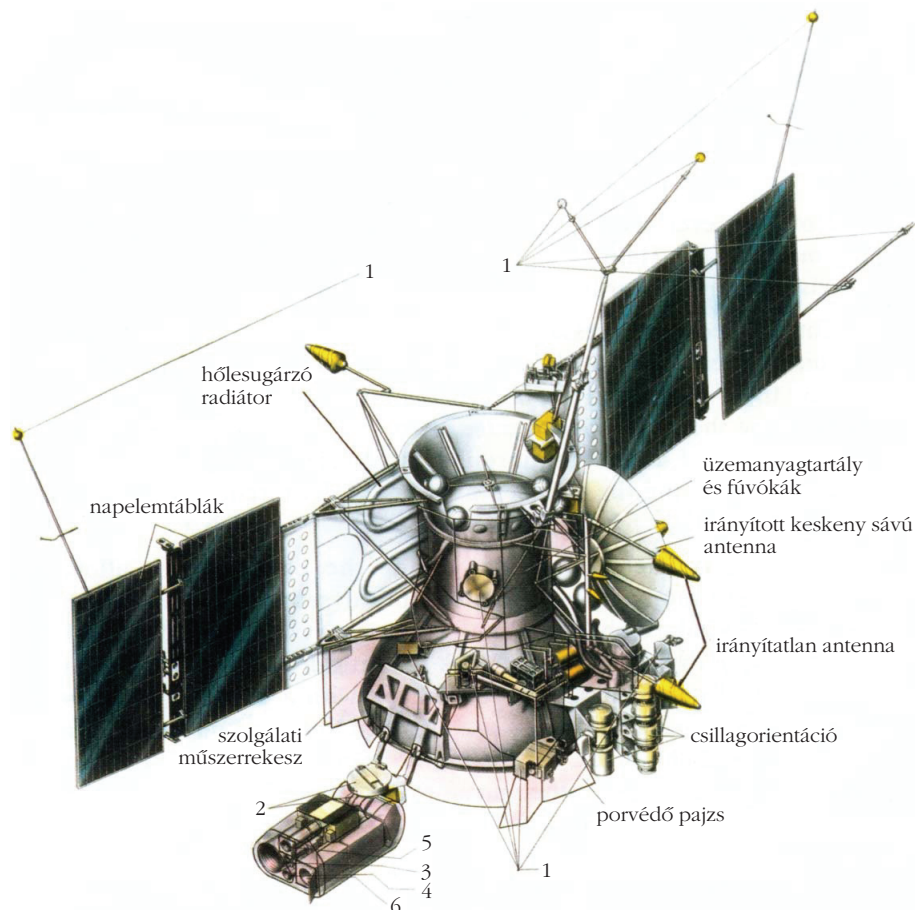
Annak ellenére, hogy a szondákat 100 km-es pontossággal lehetett irányítani, azok üstökös magjához mért távolságát csak néhány ezer km-es pontosság-

gal lehetett ismerni. Az első szonda 8889 km-re repült el a Halley-üstökös Nap felőli oldalán. A VEGA-szondák tudományos műszereit széleskörű nemzetközi együttműködésben (Szovjetunió, Ausztria, Bulgária, Csehszlovákia, Nyugat-Németország, Franciaország, Kelet-Németország, Lengyelország és Magyarország) készítették. Az űrszondák 14 műszere (1. ábra) tette lehetővé az üstökös közeli vizsgálatát, ezek között voltak optikai eszközök, mágneses teret mérő, töltött és semleges plazmarészecskék és a kóma porösszetételét vizsgáló műszerek.

Szegő Károly nem csak, mint intézetigazgató irányította a magyar részvételt a programban, de meghatározó személy volt a VEGA tudományos tanácsában is. A Halley-üstökös kapcsán jelentős személyes kapcsolatot alakított ki az ESA és NASA intézeteinek kutatóival. A személyes kapcsolataiban megismertette a VEGA-misszióban elért sikeres magyar közreműködést, ez is eredményezte az ESA és NASA későbbi űrmisszióiban a magyar kutatók meghívását új kísérletek megvalósítására.

A KFKI-ban készült egy töltött részecske-detektor (PLAZMAG) és egy nagyenergiájú töltött részecske-detektor (TÜNDE), valamint a képalkotó kamera (TVS). Az irányérzékeny optikai eszközök egy két irányban vezérelhetően elforduló platformra kerültek, hogy a megközelítés során a rajta lévő három optikai műszer (látható fény tartományú – TVS, infravörös tartományú kamera – IKS és a háromcsatornás spektrométer – TKS) a megfelelő irányba nézzen (1. ábra).

A látható fény tartományban működő kamera, a TV System (TVS) fejlesztésében a KFKI RMKI meghatáro-



1. ábra. A VEGA-űrszonda és a rajta levő berendezések, 1 – tudományos műszerek; 2 – vezérelt követő platform; 3 – TVS NAC; 4 – TVS WAC; 5 – háromcsatornás spektrométer, 6 – infravörös spektrométer.

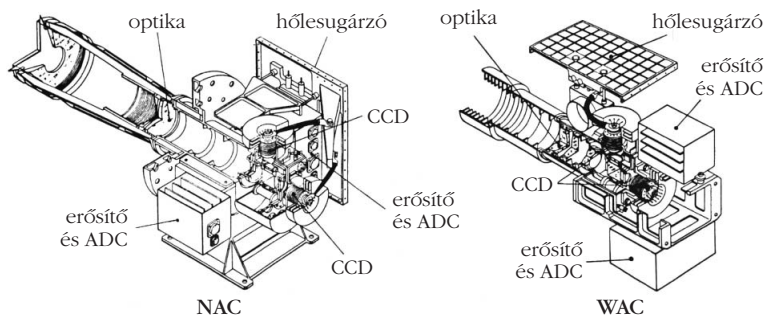
zó szerepet vállalt. A TVS [3] egy képfeldolgozó és követő rendszer (Imaging and Tracking System), amely vezérelte a két tengely körül elfordítható platformot, követve az üstökös pályáját. A TVS három egységből állt: keskeny látószögű kamera (Narrow Angle Camera – NAC), széles látószögű kamera (Wide Angle Camera – WAC) (2. ábra) és elektronikai egység. A TVS alacsony feszültségű tápellátását biztosító részét a Budapesti Műszaki Egyetem (BME) szakemberei fejlesztették. A TVS optikai részeit francia és szovjet intézetek készítették. A WAC a platformot durván irányította, míg a NAC a pontos vezérlést biztosította, hogy részletes felvételek készüljenek az üstökös magjáról és környezetéről.



Szalai Sándor az MTA doktora. A Wigner FK Űrtechnikai Osztály volt vezetője, jelenleg kutató professzor emeritus. A bolygókat és üstökösöket kutató VEGA-, Fobosz-, Cassini-, Rosetta-Philae-, Mars Express, Venus Express, ExoMars-, BepiColombo-, Solar Orbiter és JUICE-űrszondákra került nagy-megbízhatóságú műszerek hardver- és szoftver-fejlesztéseiben dolgozott. Több mint száz publikáció szerzője vagy társszerzője. Ismeretterjesztő előadásokat is tartott, az *Üstökösök nyomában* című film társszerzője.



Nagy János PhD, a Wigner Űrtechnikai Csoport vezetője 2012–2020 között. Jelenleg az Energiatudományi Kutatóintézetben dolgozik. Számos műszert tervezett a kutatómunka támogatására. Földi tesztelő műszereket fejlesztett a Vega–Halley, a Spectrum–Röntgen Gamma és a Cassini űrkutatási programok számára. Repülő hardvert fejlesztett a Rosetta-, Obsztanovka- és JUICE-projektek számára. A JUICE 2023. április 14-én indult Ariane-5 rakétán és 2031-ben áll Jupiter körüli pályára.



2. ábra. A TVS-optika egységei: a keskeny (NAC) és széles látószögű kamera (WAC).

A két szondán lévő NAC-kamerák Cassegrain-típusú tükrös teleszkópok voltak két kompenzáló lencsével, fókusztávolságuk 1200 mm, $0,5^\circ$ -os látómezővel (2. ábra). A VEGA-1-re francia gyártású, a VEGA-2-re pedig szovjet gyártású kamera volt felszerelve. A WAC pedig négylencsés optikájú volt, fókusztávolsága 150 mm, 4° -os látómezővel. A WAC szűrője 630 és 760 nm között dolgozott. A kameráknak a tudományos feladatokon kívül szolgáltatniuk kellett az üstökös helyzetét, ami lehetővé tette a pontos követést. Mindkét optika mögött féligáteresztő tükrök után a megosztott fényben egy-egy CCD-érzékelő (szovjet gyártmányú) volt. Mindkét kamera 512×576 pixeles CCD-detektorokat használt a fókuszsíkban. A két kamera együttes legnagyobb adatátviteli sebessége 48 kb/s volt, ami nem volt elég a CCD-k teljes tartalmának átviteléhez két expozíció közti időben, ezért lehetett csak egy 1/10 méretű ablakot is továbbítani a fényesség központja környezetéből. Az expozíciós időt alacsonyan kellett tartani a képhomályosság elkerülésére, ugyanakkor nem lehetett kevesebb 0,01 s-nál a CCD érzékenysége miatt. A keskeny látószögű kamera 10 000 km távolságból 200 m-es felbontással fényképezte az üstökös magját, és viszonylag nagy sáv szélességű (80 nm), 500–1500 nm határok között működő szűrőrendszerrel volt felszerelve. A tudományos képek helyes kiértékelése érdekében a CCD-érzékelők képelemei a Földön és az átrepülés idején kalibrálva lettek.

A KFKI RMKI kutatói fejlesztették ki a TVS elektronikáját, ebben két mikroszámítógép foglalt helyet: az egyik a képfelvételt irányította és a Földdel kommunikált (értelmezte a parancsokat és letöltötte az adatokat), míg a másik az üstökös felismerésével és követésével, a platform vezérlésével foglalkozott. Az űrkutatás történetében először fordult elő ez a fedélzeti képfeldolgozás mérési adatai által közvetlenül vezérelt, valós idejű szabályozás. A két számítógép kis fogyasztású 8 bites CMOS processzorra épült, és a korlátozott kiolvasási sebesség miatt 3 másodpercenként tudtak képet készíteni. Dedikált hardver áramkörök gyorsították a szerény számítóteljesítményű processzor képfeldolgozását. A két számítógép legérzékenyebb és legkritikusabb részeit (memória és óragenerátor) melegtartalékolással alakítottuk ki. A megbízhatóság növelésére a követést két tartalékrendszer támogatta.

A tartalékrendszerek műszaki megvalósításának technológiájában eltért a főrendszerben alkalmazottól annak érdekében, hogy egy esetleges tervezési vagy alkatrészhiba csak az illető alrendszert bénítsa le és ne az egész rendszert. A két kamerában a négy képérzékelő közül 3 elektromechanikus zár mögött exponált, a WAC-ban lévő negyedik CCD mechanikus zár nélkül exponált az úgynevezett TV-módban, azaz a fél érzékelő le volt fedve, és az expozálás után a másik fél részbe, mint tárolóba áttet-

te a képtartalmat, majd onnan olvasta ki az analóg „videójel” elektronika. Ez volt az egyik tartalék feldolgozó elektronika. A követés biztosítására volt kisebb pontossággal működő külön követő rendszer, amelyet szovjet kutatók készítettek. Ez a második tartalék a WAC-optikával azonos rendszerre épült és két 8 szegmensű fényérzékeny dióda volt az érzékelő, amelyek jeleit diszkrét félvezető elemekből épített híd-áramkörök értékelték ki, és analóg jellel vezérelhették a platformot az üstökös követésére. A követés tesztelésére egy olyan rendszer épült, amelyben az üstökös képe egy számítógéppel vezérelt pozíciójú üstökös diaképe kollimátoron keresztül jutott a TVS kamerájába, és az ott kiszámított vezérlőjel lett a pályaparaméterek különbségi jele, így tökéletes követés esetén a diakép mozdulatlan maradt.

A TVS áramköre különböző alacsony feszültséget, valamint az CCD-érzékelők előtt lévő elektromechanikus exponáló záruk működtetése 60 V-os feszültséget igényelt. A BME űrkutató csoportja e célra bonyolult sok kimenetű DC/DC egységet fejlesztett. Ez a tápegység a fedélzeti 28 V-ból hozta létre a TVS működéséhez szükséges nagy megbízhatóságú stabilizált feszültségeket. Szintén a BME-n készült a VEGA-szondákra a telemetria adatgyűjtő egysége, az orosz nevének kezdőbetűiből alkotott mozaik szó a BLISZI. Ennek feladata volt továbbítani két rádiórendszer felé a 12 tudományos műszer mérési, valamint minden egység szolgálati adatait, amelyek a műszerek működőképességét tartalmazzák. A tudományos adatokat 64 kbit/s sebességgel továbbította, míg a szolgálati adatok egy 20 Mbit-es átmeneti magnetofontárolóba kerültek és onnan csupán néhány bit/s átlagsebességgel továbbították a Földre.

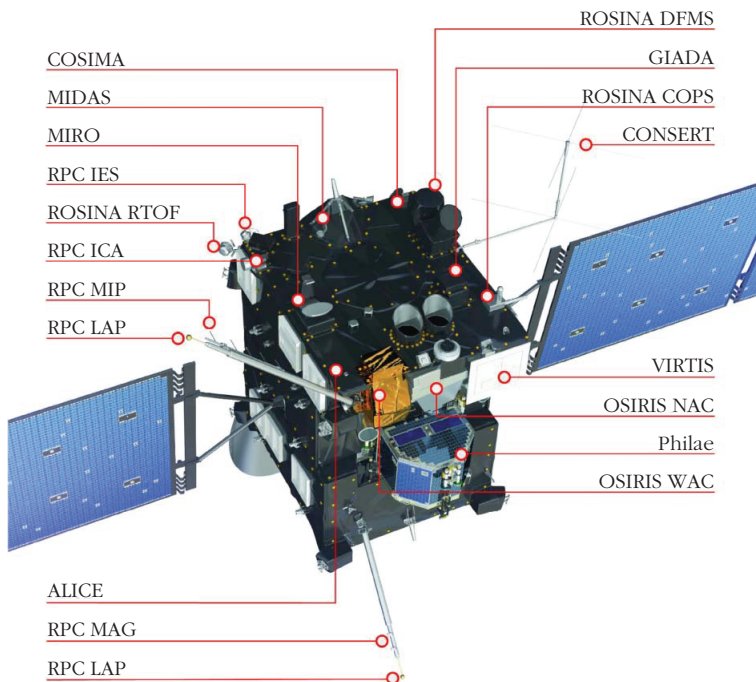
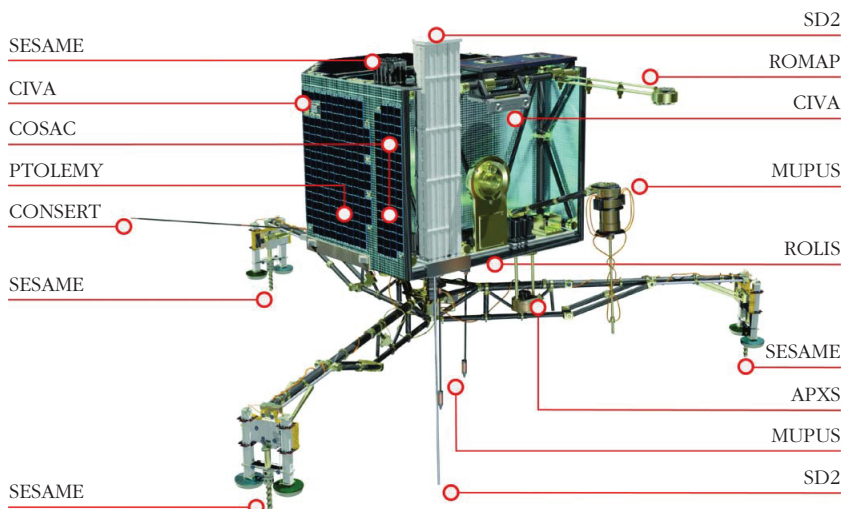
Mindkét két szondán lévő TVS – különböző szűrőkkel – több mint 1500 képet továbbított a Földre és ezzel az üstökös kutatás történetében először vált lehetővé egy üstökös magjának megfigyelése, amiből az üstökös mag alakját, felszínének tulajdonságait és aktivitását lehetett meghatározni. Az üstökösök magját a Naprendszer legősimb, legprimitívebb képződményének tartják, ezért kutatásuk jelentősen hozzájárul a Naprendszer keletkezésének megismeréséhez. A felvételek szerint a mag körülbelül 14 km hosszú, szabálytalan alakú, forgási periódusa pedig körülbelül 53 óra. A két VEGA-

szonda mérései alapján az üstökös-mag pályáját pontosítani lehetett, és az ESA később érkező Giotto-szondáját, a magot jobban megközelítő pályára lehetett irányítani.

A Rosetta-misszió

Kourouból (Francia Guyana) Ariane-5G rakétával indult 2004. március 2-án a Rosetta-Philae-űrszondapáros [4] 10 éves útjára, célja a 67P/Churyumov-Gerasimenko-üstökös (67/P) vizsgálata volt. Az űrszonda páros teljes indulási súlya 3000 kg; ebből 1670 kg pályakorrekciós hajtóanyag, a Rosetta-orbiter 11 műszere 165 kg, az orbiter teste 2,8×2,1×2 m méretű és a két 32 m²-es napelemtáblája a Naptól 2,4 csillagászati egység távolságra 850 W-ot biztosított (3. ábra). A Philae-leszállóegység 100 kg és ebből 27 kg a 10 tudományos műszer tömege, a mérete 1×1×0,8 m, és külső burkolatát hat napelemtábla borítja, amely 3 AU távolságon optimális esetben körülbelül 3,5 W teljesítményt biztosíthatott volna [5]. A Rosetta volt az első űrszonda, amelyről levált egy intelligens mérőállomás (3. ábra), majd az üstökös felszínére érve ott közvetlen méréseket végzett. Az üstököst a napközeli pályaszakaszon az orbiter követte, és közelről tudományos méréseket végzett a változásokról, a felszínről nagy felbontású fényképeket készített.

4. ábra. A tudományos műszerek a Philae-leszállóegységen. APXS: Alfa proton röntgenspektrométer, CIVA: infravörös és optikai tartományban analizátor, CONSERT: üstökös-magot átvilágító rádiórendszer, COSAC: mintavevő és elemző műszer, PTOLEMY: gázösszetétel-analizátor, ROLIS: Rosetta leszállóegység kamerája, MUPUS: az üstökös felszíni és felszín alatti tulajdonságait vizsgáló műszer, ROMAP: mágnesestér- és plazmaanalizátor, SESAME: akusztikus talajszerkezet vizsgáló és porelemző, SD2: mintavevő és mintaelosztó alrendszer; nem látható közös elektronikus egységben: CDMS központi számítógép és a PSS tápellátó rendszer (Magyarország).



3. ábra. A Rosetta-orbiter műszerei. ALICE: ultraibolya tartományú spektrométer, CONSERT: üstökös-mag hang- és rádióhullám-terjedési kísérletet végző műszer, COSIMA: másodlagos ionelemző műszer, tömegspektrométer, GIADA: szemcsébecsapódás-analizáló és porgyűjtő, MIDAS: 3 dimenziós mikro-képalkotó porelemző rendszer, MIRO: a fő gázok mennyiségének, felszíni kiáramlási sebességének és a mag felszín alatti hőmérsékletének meghatározására használt műszer, OSIRIS: optikai, spektroszkópiai és infravörös képalkotó rendszer, ROSINA: az üstököst körülvevő gázok, ionok tulajdonságait mérő műszer, RSI: az üstökös-mag tömegét és gravitációját mérő műszer, VIRTIS: a látható és infravörös tartományban képalkotó spektrométer; RPC: az üstökös-mag és a belső kóma tulajdonságait mérő műszeregység, részei ICA ionanalizátor, IES ion- és elektron-szenzor, LAP Langmuir-szonda, MAG fluxgate magnetométer, MIP kölcsönös impedancia-szonda.

A kitűzött kutatási célok elérésére a tudományos műszerek jelentős része összetett mérési feladatot látott el, azaz több érzékelőt is tartalmazott. Az orbiter műszereit európai és egyesült államokbeli intézetek tudományos konzorciumai fejlesztették (3. ábra). A leszállóegységet a Német Űrkutatási Intézet (DLR) által vezetett konzorcium kutatói hozták létre, akik ausztriai, finn-, francia-, magyar-, ír- és olaszországi és egyesült királysági intézetekből voltak. A 4. ábra mutatja a tudományos műszerek elhelyezését a Philae-leszállóegységen.

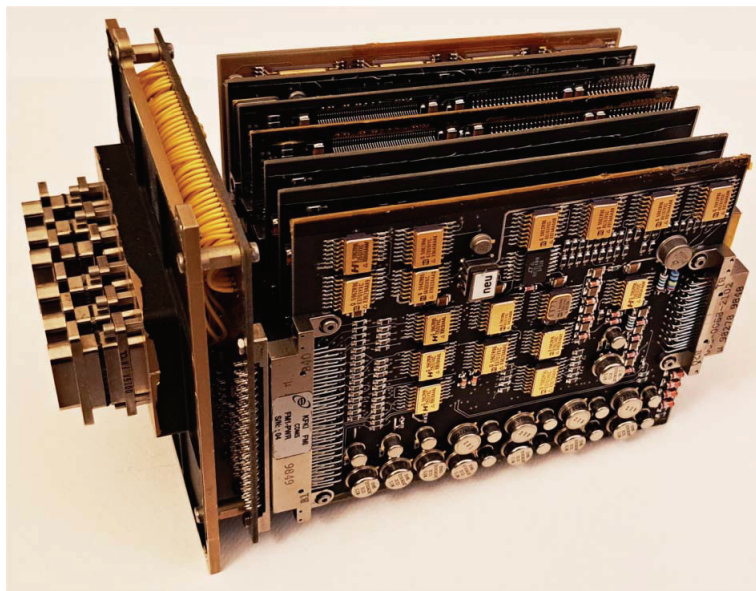
Magyarország a Philae számára két kritikus szolgálati egységet fejlesztett. A Philae „agyát”, azaz a központi hibatoreráns vezérlő és adatgyűjtő számítógépet (Command and Data Management Subsystem – CDMS) az SGF Kft. és a Wigner FK kutatói fejlesztették [6, [7]. A Philae

„szívét”, az energiaellátó rendszerét a BME-n tervezték. A két létfontosságú egység működése a feltétele annak, hogy a tudományos műszerek működhessenek, és ez mutatja a bizalmat a magyar kutatók és mérnökök iránt, amely a VEGA-misszió során alakult ki. Az Energiatudományi Kutatóközpont (EK) egy pordetektor-szondát (SESAME DIM) és egy plazma-szondát (ROMAP SPM) is fejlesztett. Az SGF Kft. az orbiteren levő rádiójeladó (CONCERT) és leszállóegységen levő CONCERT vevő egység számára földi ellenőrző berendezéseket fejlesztett. A Rosetta-orbiteren levő plazmaműszer-együttes (Rosetta Plasma Consortium – RPC) fejlesztésében a Wigner FK vett részt, nagyszámú kisfeszültségű diszkrét elemből álló kapcsolóegységet készítve, amely a térfogat minimalizálása érdekében 3D konstrukcióban készült. Szegő Károly nem csak a tudományos mérések megtervezésében vett aktívan részt, hanem a Philae irányító testületének aktív tagja, és a fejlesztés kritikus utolsó szakaszában pedig elnöke volt. Személyesen fogta össze a magyarországi fejlesztéseket, hogy a szükséges időpontra a magyar műszerek elkészüljenek.

A Philae központi számítógépének feladata a leszállóegység szempontjából létfontosságú és jelentős számításteljesítmény-igényű, de ugyanakkor a rendelkezésre álló energia miatt minimális fogyasztású lehetett. Ezért 16 bites sugárzásálló CMOS processzorral (Harris RTX2010RH) a szükséges folyamatos rendelkezésre állás érdekében meleg-tartalékolt megoldásban készült a központi vezérlő és adatgyűjtő számítógép. A kis fogyasztású processzor architektúrája a veremalapú Forth programozási nyelvre lett optimalizálva. A gyors utasítás-végrehajtás érdeké-

ben. A CDMS-számítógépnek tulajdonképpen párhuzamosan kellett feldolgoznia a feladatokat. Ezért egy valós idejű, preemptív többfeladatos (multitasking), valós idejű (realtime) operációs rendszert kellett kifejleszteni a szükséges, párhuzamosan végrehajtandó feladatok futtatására. Az indító program tárolására 16 kword (16 bit) PROM memória szolgált, valamint minimális funkcionalitást is tartalmazott. A teljes működtető program tömörített formában két példányban lett tárolva a 128 k méretű 24 bites szóhosszúságú EEPROM memóriában. A program futása a 128 k · 24 bit RAM memóriából történt. Mind az EEPROM, mind a RAM memória hibajavító Hamming-kódolásban működött. Az EEPROM alkalmazása lehetővé tette, hogy új változatú működtető programot vagy bizonyos paramétereket telemetria-kapcsolaton keresztül fel lehessen küldeni, illetve módosítani lehessen. Finn mérnökök fejlesztették az úgynevezett mass memóriát, amelynek mérete kétszer 2 Mbyte, és Hamming-kódolással védett módon átmenetileg tárolta a kísérletek mérési adatait. Az átmeneti adattárolásra az üstökös körül keringő orbiterrel két rádiókapcsolat közti időben begyűjtött adatok megőrzése miatt volt szükség. A rádiókapcsolat (16 kbit/s) lehetőségét a CDMS-számítógépnek autonóm módon kellett felismernie, két kapcsolat közti idő a 12 órát is elérte. A CDMS funkcionális alegységeinek folyamatosan működőképesnek kellett maradniuk, mert a küldetés legtöbb fázisában nincs lehetőség külső beavatkozásra a Földről. A CDMS ezért belső tartalékolással készült, önmagának fel kellett ismernie az esetleges hibákat, majd a meghibásodott funkcionális alegységek kizárásával és a redundáns rész aktiválásával helyesen kellett folytatnia működését.

5. ábra. A CDMS technológiai példánya. A beágyazott processzorkártyák a fejlesztés idejére ki voltak egészítve egy vendégnyákkal, amelyek külső számítógépek csatlakoztatása révén interaktív nyomkövetési lehetőséget adtak a fejlesztés alatt álló szoftverhez: program futása, leállítása, memóriatartalmak ellenőrzése, tartalmak módosítása stb. (debugger funkciók).



A hibatűrést biztosító két azonos mikroprocesszoros egység (DPU) alegységeivel meleg-tartalékolt redundáns üzemmódban működött. Az egyik, elsődleges DPU-ként megjelölt DPU felelt a tényleges vezérlésért. A másik, másodlagos DPU-ként folyamatosan figyelte, egy laza kapcsolaton keresztül, az elsődleges DPU-program futását, hogy hibája esetén bármikor átvehesse az elsődleges vezérlő szerepet. A KFKI-ban a CDMS-ből (5. ábra) hat példány készült, de a repülő és tartalék példányokat a DLR-ben (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) gyártották, és a környezeti hatások tesztelése (rázás, szélsőséges hőmérséklet, vákuumbeli viselkedés) is Németországban történt. A minősített példányok végleges bemérését a magyar fejlesztők végezték a DLR-ben, mert olyan sugárzásálló és űrminősített alkatrészeket is tartalmazott, amelyeket az embargós törvények nem engedélyeztek volna Magyarországra behozni.

A szoftverfejlesztésnél kellő előrelátással könnyen módosítható megoldást kellett létrehozni, hiszen 2001-ben kellett a PROM memóriákba beégetni a minimális működést biztosító szoftvert, hogy a hardver szállítható legyen. Mivel eredetileg 2003 januárjában kellett volna elindítani, hogy a 46P/Wirtanen-üstökös-sel találkozzon, de az Ariane-5 rakéta 2002. decemberi kudarca miatt csak 2004. március 2-án indították az új cél, a 67P-üstökös kutatására. Továbbá fontos szempont volt, hogy a felszínen való működés során rövid parancsokkal lehessen módosítani a működési módokat. 2014 februárjában küldték fel a végleges szoftverváltozatot, amely tartalmazta a több mint tíz év alatt felmerült új követelményeket, ismereteket és a feltárt hiányosságok javítását. A szoftver működését alapvetően két táblázat írja le, az egyik egy adott pillanathoz tartozó állapot leírását (Aquisition Mode Description Table, AMDT) tartalmazza (bekapcsolt műszerek, azok működési módja stb.), míg a másik táblázat (Aquisition Mode Sequential Table, AMST) az egymást követő állapotok átmeneti feltételeit (az adott tevékenység vége, adott időpont elérése stb.) és az AMDT-állapotokra való hivatkozásait tartalmazza. A mérési feladatok táblázatos leírása lehetővé tette a kísérletek működését rövid telemetria parancscsomagokkal előre meghatározni és eltárolni az EEPROM memóriában. Az előre felküldött időpontokban pedig végrehajtottak az AMST-ben szereplő tevékenységi folyamatok.

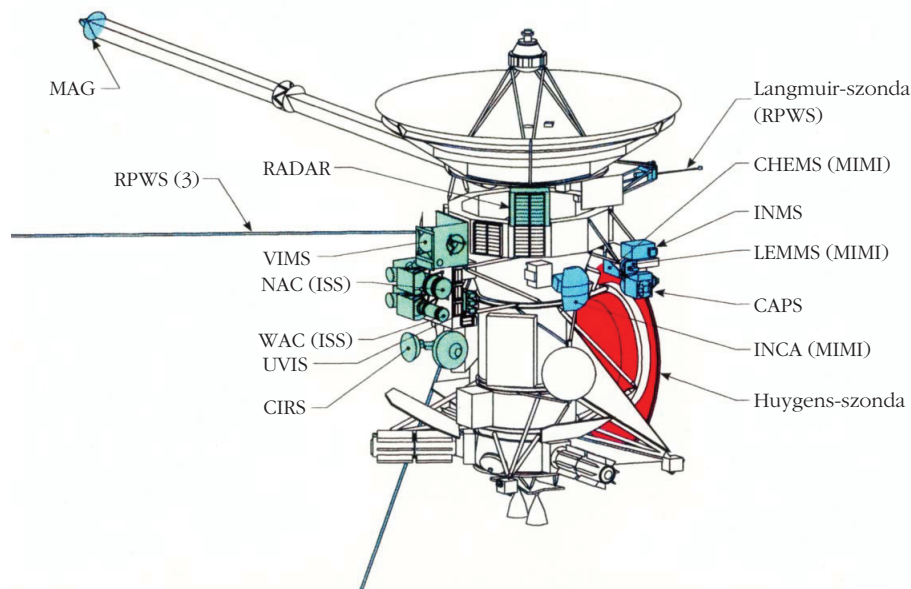
A BME által fejlesztett tápellátó rendszer (Power Subsystem – PSS) több forrásból származó energiából biztosította a leszálló egység működéséhez szükséges elektromos feszültséget. Az egyik energiaforrás egy úgynevezett primer elem (egyszer használatos telep), amelynek 36 cellája 1300 Wh kapacitású volt. A másik forrás egy Li-ion 140 Wh kapacitású akkumulátor. A primer elemben tárolt energia biztosította, hogy a leszállás után minden kísérletet legalább egyszer el tudjon végezni. Az akkumulátort a szétválás előtt az orbiter energiaforrásából feltöltötték, majd az üstökös mag felszínén leszálló egység napelemtábláiról töltődtek, illetve közvetlenül működtették a leszállóegység műszereit. A négy energiaforrásról működő PSS bonyolult áramköri megoldásokkal hozta létre a leszállóegység műszerei számára szükséges tápellátást. A PSS működése során először a CDMS tápellátását kapcsolta be a megfelelő üzemmódba vezérelve azt. A megbízhatóság érdekében a különböző funkcióegységek tartalék áramkörökkel készültek. A nagyszámú alkatrész és a korlátozott térfogat miatt 3D konstrukciót alkalmaztak. A technológiai példány bemérése és véglegesítése után a repülő és tartalék PSS példányt a DLR-ben gyártották, hasonló okok miatt, mint a CDMS esetében, a bemérést pedig a BME fejlesztői végezték.

Az űrszondapáros bonyolult, 10 évig tartó pályán tudta elérni a célüstököt, hogy azonos pályán repül-

jön vele. Tízéves űrrepülése során többször visszatért a Föld közelébe, elhaladt a Mars bolygó, a Steins- és a Lutetia-aszteroidák mellett. 2011-ben hibernálták az űrszondapárost, hogy a Naptól távoli, a Jupiter közeli pályaszakaszán a napelemek által szolgáltatott csekély energiával takarékoskodjanak, csak az orbiter fedélzeti számítógépe és néhány fűtőelem maradt bekapcsolva. Az alvó szondát 2014 januárjában 673 millió km-re a Naptól „felébresztették”. A Rosetta számítógépe sorra bekapcsolta az űreszköz szolgálati egységeit, majd megkezdte tudományos műszereinek tesztelését. A megközelítési pályamódosítások soroza-ta májusban indult, hogy a szonda és az üstökös egymáshoz viszonyított sebessége csak 1 m/s, a távolságuk 100 km legyen augusztusban, amikor is a Rosetta az üstökös követésére beállt. Ez a Föld és a Mars pályája között valósult meg.

A Földtől 500 millió km távolságra a Rosetta elindította 2014. november 12-én a Philae-leszállóegységet, amely 7 órával később az üstökös felszínén landolt. A felszínre érkezése során a lehorgonyzásra szánt szigonyok nem működtek megfelelően, emiatt kétszer is visszapatant. Az első felpattanás 38 cm/s sebességgel történt, ami szerencsére nem haladta meg az üstökös-től való 44 cm/s-os szökési sebességet. A Philae körülbelül 1 km-re felemelkedett, majd ezt követően 1 óra 50 percig szabadeséssel mozgott a felszín felé, és beleütközve újból eltávolodott tőle – ezúttal 7 perc alatt kisebb távolságra –, végül az eredetileg kijelölt jeges leszállási helytől körülbelül 1 km-re, egy durva, kissé sziklás talajú, árnyékos helyen, feltehetően a háromból két lábra támaszkodva, a függőlegetől 30°-kal megdőlvé megállt. Sajnos a napelemtáblák megvilágítása az előzetes számítás szerint körülbelül 6 óra helyett csak 1,2 órányi lett.

Az árnyékos helyen a Philae azonnal megkezdte a működését, létrehozta a kapcsolatot az orbiterrel: értékes mérési adatokat továbbított az összes tudományos műszeréről 64 órán keresztül. Ekkor azonban a primer energiaforrás (elem), valamint akkumulátora is lemerült. A leszállóegység kedvezőtlen pozíciója, illetve a Naptól való nagy távolság miatt az akkumulátora nem tudott rövid idő alatt újratöltődni, ezért a CDMS leállt. Az üstökös folyamatosan haladt a Nap közeli pályáján, így a Philae napelemei egyre több energiát gyűjtöttek az akkumulátorok részére, és 2015. június 19-én életjelt adott magáról a leszállóegységre. A PSS táplálást szolgáltatott, a CDMS bekapcsolt, és rövid időre létrejött a kapcsolat a Rosettával. A Földre érkezett adatok alapján megállapítható volt, hogy a rádiókommunikációs rendszer meghibásodása nem tette lehetővé újabb tudományos mérési adatok továbbítását a Földre. Feltehetőleg a Nap közelsége miatt, a magas hőmérséklet következtében a rádiórendszer meghibásodott. A Rosetta 2016. szeptember 30-án földi irányítással az üstökös magjára zuhant.



6. ábra. Tudományos műszerek elhelyezése a Cassini-szondán. CAPS: Cassini plazmaspektrométer (Magyarország), CDA: kozmikuspor-analizátor, CIRS: összetett infravörös-spektrométer, INMS: ion- és semleges tömegspektrométer, ISS: látható, infravörös és ultraibolya kamerák, MAG: kettős technikájú magnetométer (Magyarország), MIMI: magnetoszférikus képalkotó műszer, RADAR: rádiófrekvencián működő térképező és kisugárzott jelet érzékelő, RPWS: rádiójel- és plazmahullámdetektor, UVIS: ultraibolya tartománybeli képalkotó, VIMS: látható és infravörös tartományú kamerák, INCA: ion- és semlegesrészcseke-kamera, CHEMS: töltés-energia-tömeg spektrométer.

A Cassini-misszió

A Cassini-misszió egy űrszondapáros volt, amelyet a Cassini-orbiter és a Huygens-leszállóegység alkotott [8]. A Cassini-orbiter, amely a NASA vezetésével készült, a Szaturnusz körül keringve behatóan tanulmányozta a bolygót a gyűrűivel és holdjaival együtt. A Titan holdra leszállt Huygens-szonda fejlesztését az ESA irányította. A misszió fő kutatási céljai: a gyűrűk háromdimenziós struktúrájának és dinamikus viselkedésének meghatározása; a holdak felszíni összetételének és geológiai történetének tanulmányozása; a Iapetus vezető félgömbjét fedő sötét anyag eredetének és természetének meghatározása; a bolygót övező magnetoszféra háromdimenziós struktúrájának és dinamikus viselkedésének kutatása; a Szaturnusz atmoszférája dinamikus viselkedésének felhőszintű meghatározása; a Titan felhői és homályai időbeli változékonyságának tanulmányozása és a Titan felszínének jellemzése. Az ESA által fejlesztett Huygens-szonda 2005. január 14-én sikeresen leszállt a Titanra, mérési adatokat és képfelvételeket juttatott az orbiter közvetítésével a Földre.

Tizenkét tudományos műszer volt az orbiter fedélzetén (6. ábra), ebből kettőnek, a Cassini-plazmaspektrométernek (CAPS) és a magnetométernek (MAG) kifejlesztésében

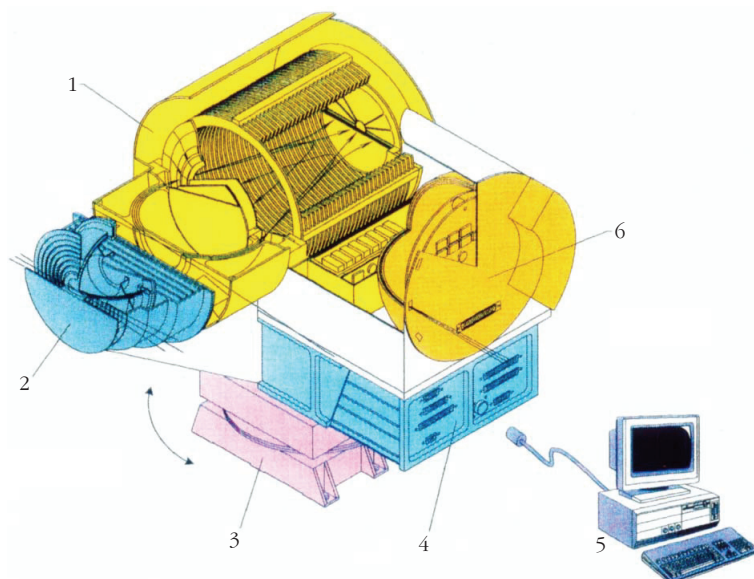
vettek részt a KFKI RMKI mérnökei. A Cassini vezérlő és adatgyűjtő buszának szimulátorát tartalmazó földi egységet (Ground Support Equipment – GSE) készítették a CAPS- és MAG-műszer számára. Szegő Károly személyes kapcsolatait tették lehetővé a magyar kutatók részvételét a Cassini-misszióban.

A CAPS [9] tartalmazott egy iontömeg-spektrométert (IMS) a pozitív atomi és molekuláris ionok fluxusának fajtafelbontású mérésére az energia/töltés és az apertúra belépési iránya függvényében. Az ionsugár-spektrométer (IBS) a pozitív ionok összes fajtájának fluxusát mérte az energia/töltés és a belépési irány függvényeként. Továbbá egy elektronspektrométer (ELS) az elektronok fluxusát mérte az energia/töltés és a belépési

irány függvényeként. A KFKI-ban készült ellenőrző berendezés (GSE) IBM PC-ben valósult meg, amelyhez a Cassini-szonda adatgyűjtő és vezérlő buszának szimulátorát, valamint a tesztelesekhez szükséges működtető szoftvert kellett kifejleszteni (7. ábra).

A MAG [10] a Szaturnusz körüli mágneses tér erősségét és irányát közvetlenül mérte. A magnetométert egy-

7. ábra. A CAPS-műszer részei és azok fejlesztő országai. 1. iontömeg-spektrométer (Egyesült Királyság és Franciaország), 2. elektronspektrométer (Egyesült Királyság és Norvégia), 3. szkennelő motor (Finnország és Franciaország), 4. adatfeldolgozó egység (Egyesült Királyság), 5. földi ellenőrzőegység (Magyarország), 6. ionspektrométer (Finnország).



egy vektor/skalár héliumszonda, fluxus-kapu szonda, adatfeldolgozó egység és három tápegység alkotta a működtető szoftverrel és a szenzorelektronikákkal együtt.

A Cassini szonda 2017. szeptember 15-én fejezte be működését, amikor a szondát szándékosan a Szaturnusz légkörébe irányították, hogy ott megsemmisüljön. Ez a művelet megakadályozta, hogy a szondán esetleg akaratlanul a Földről hozott biológiai fertőzés véletlenül valamelyik holdra kerüljön. Túlzás nélkül állítható, hogy ez a sikeres misszió mérföldkövet jelent az űrkutatás történetében.

Irodalom

1. R. Z. Sagdeev et al.: Television observation of comet Halley from VEGA spacecraft. *Nature* 321 (15 May 1986) 262–266.
2. Apáthy I., et al.: A VEGA nemzetközi űrkíséret a Halley-üstökös megfigyelésére. *Mérés és Automatika*, 33/1–2 (1985) 1–8.

3. Balázs A. és szerzőtársai: Televíziós rendszer a VEGA kísérlethez. *Mérés és Automatika*, 33/1–2 (1985) 9–12.
4. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta_overview
5. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/Rosetta_factsheet
6. Balázs A., et al.: The Central on-Board Computer of the Philae Lander in the Context of the Rosetta Space Mission; Reliable Software Technologies – Ada-Europe 2015, 18–32.
7. Szalai S., Balázs A.: A Rosetta Lander központi vezérlő és adatgyűjtő számítógépe. *Híradástechnika* (2004. május) 34–36.
8. Szalai S.: A Szaturnuszt kutató Cassini–Huygens űrszondapáros. *Haditechnika* 2019/2 37–42.
9. Young, D. T. et al.: Cassini plasma spectrometer investigation. Measurement Techniques in Space Plasmas: Particles, AGU Geophysical Monograph 1998: 102, 237–242.
10. S. Kellock, et al. Cassini dual technique magnetometer instrument <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.253414?SSO=1>

REFLEKTORFÉNYBEN

KAMARÁS KATALIN, AZ ELSŐ SZÉCHENYI-DÍJAS FIZIKUSNŐ

Pethes Ildikó
Wigner FK

Kamarás Katalin a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztályának egyetlen női rendes tagja. Kati idén munkája elismeréseként megkapta a Széchenyi-díjat is, ami fizikusnők közül egyedülként neki sikerült. Ebből az alkalomból kérdeztük.



– *Közel 50 éve vagy a tudományos pályán. Eleve-nítsük fel az utat, ami a Széchenyi-díjig vezetett! Kezdjük a családi háttérrel. Szüleid orvosok voltak. Egyedüli gyerek vagy?*

– Nem, ketten vagyunk testvérek. Anyukám borzasztóan céltudatos nő volt, a mi jövőnket is eltervezte és kitalálta, hogy én leszek a tudós és a húgom lesz a művész, mert úgy látta, hogy erre vagyunk alkalmasak. A családi háttér teljes mértékben támogató volt.



Pethes Ildikó 1995-ben végzett az ELTE fizikus szakán, majd 2004-ben a BME-n szerzett PhD-fokozatot. Öt gyermekének nevelésével töltött 10 évet követően, 2014 óta dolgozik a Wigner FK Komplex Folyadékok Osztályán, a Folyadékszerkezet Kutatócsoportban. Kutatási területe folyadékok és amorf anyagok atomi szintű szerkezetének vizsgálata kísérleti (diffrakció, EXAFS) és szimulációs (fordított Monte Carlo, molekuláris dinamika) technikák kombinálásával.

– *Miben mutatkozott ez meg?*

– Az általános iskolában még nem volt sok minden. Voltak kémia-, fizikaversenyek, ilyenekre jártam, de igazán komoly versenyen soha nem vettem részt. Cikkeket írtam a *Kisdobos* újságba, a „Minden munka érdekes” rovatba. Nyolcadikos koromban voltam először Csillebércen, az úttörőtáborban, ahol fizika–kémia szakverseny vagy szaktábor volt. Gimnáziumra egyértelmű volt, hogy matematika–fizika tagozatra megyek. A Radnótiba jártam, ahol nagyon jó volt a társaság, jók voltak a tanárok. Amikor a pályaválasztás jött, akkor úgy éreztem, hogy a fizikus szak túl sok nekem és oda én nem merek elmenni. Mivel nagyon jó kémiantanárnom volt a gimnáziumban (*Kiss Zsuzsanna*), ezért végül vegyész szakra mentem. A TTK-n (ELTE TTK) borzasztóan családias légkör volt, kicsi volt az évfolyam. Ha valamit nagyon meg akartunk tanulni, meg lehetett kérni egy tanárt, hogy tartson egy specit arról, amit mi akartunk. Rengeteget kellett dolgozni, volt olyan félévünk, hogy heti 40 óránk volt, és abból 28 labor. De ez azután később nagyon jól jött.

– *Mit csináltál az egyetemen?*

– Az egyetemen Mössbauer-spektroszkópiából TDK-ztam. Azután elmentem *Török Ferenchez*, aki kvantumkémikus volt. Ő indította el igazán a magyart

kvantumkémiai iskolát. Megkeresték egy spektroszkópiai témával, egy modellezési feladattal. Azt mondta, itt van ez a diplomamunka-téma és szívesen elvállja ennek elméleti vezetését, spektrumokat kellene számolni. Majd nagyon gyorsan kiderült, hogy aki addig mért, az elment, így mérnem is kellett. Ez igazából nekem jobban megfelelt, mert a kvantumkémiaspeciken, amelyeken jártam, előbb-utóbb odajutotunk, hogy mátrixokat kellett diagonalizálni és azon a ponton elvesztettem az érdeklődésemet a dolog iránt. Később végeztem más (kristály)-energia számolásokat, már itt az intézetben, de a kísérlet mindig jobban érdekelt.

– *Hogyan kerültél a KFKI-ba?*

– Elvégeztem az egyetemet, és még mindig nagyon nagy fizikaihiányom volt. Megláttam egy hirdetést, hogy a KFKI-ba, a Szerves vezetőik csoportba keresnek valakit. Amiről, mint kiderült, itt az intézetben mindenki tudott, csak az a csoport nem, ahova az embert keresték. Följöttem, mondták, hogy keressék *Grüner Györgyöt*. Mondtam neki, hogy itt szeretnék dolgozni. Ő meg nézett rám, fogalma sem volt arról, hogy miként kerülök én ide. Azután nem tudom, nekem sikerült meggyőződnöm őt, ő is meggyőződött másokat... Amikor megmutattam diplomamunkámat, ami optikai spektroszkópia volt, akkor erre még *Zawadowski Alfréd* is azt mondta, hogy „akinek szimmetria-pontcsoportok vannak a diplomamunkájában, azt fel lehet ide venni”. Így kerültem ide, egy olyan társaságba, ami hihetetlen volt. Ott volt *Mihály György*, *Mihály László*, *Forró László*... Igazából majdnem mindenki nagyon komoly karriert futott be később, hatan vagy heten vagyunk akadémikusok arról a környékről. Ott tanultuk meg, hogy ami számít, az a nemzetközi színvonal. Dolgozni kell, nagyon sokat kell dolgozni. Szerves vezetőikön dolgoztunk, a legjobb elméleti és kísérleti fizikusokkal. *Jánossy Andrásék* akkor hozták itt létre a mikrohullámú spektroszkópiát. Igazából semmi pénzük nem volt, különböző kutatóintézetek régi, eldugott műszereiből raktak össze kísérleti eszközöket. Nagyon pezsgő és izgalmas időszak volt.

Alapvető feladatomban az lett volna, hogy vegyészként elkészítsem az anyagokat, amelyeken ők majd mérnek. Ezt egy ideig bírtam, azután valahogy megpróbáltam én is keresni valakit, aki inkább ilyen preparatív ember, és megtaláltam *Pekker Sándort*, attól kezdve Sanyi csinált minden ilyesmit. Az ő tudása és kreativitása nagyon fontosnak bizonyult a csoportban, hiszen kutatásunk mindig új anyagok vizsgálatára

koncentrált, amelyhez eredeti és minőségi mintákra volt szükség, ráadásul gyorsan.

Én meg kölcsönhelyeken dolgoztam, a szomszéd intézetben, infravörös spektroszkópiával. Elmentem *Mink János*hoz az MTA Izotóp Intézetbe, nekik volt az egyik első magyarországi Fourier-transzformációs infravörös készülékük. Azon dolgozva vettem részt a csoport munkájában. Ez így mindenkinek nagyon jó volt, mindenki megtalálta azt, amit szeretett.

Később a fiúk már mással, töltéssűrűség-hullámokkal kezdtek foglalkozni. Nekem akkortájt születtek a gyerekeim. Ez hosszabb időszak volt, de ennek ellenére mindig megmaradt a kapcsolat a társasággal. Soha nem merült fel, hogy kiraknának innen, vagy e kihagyást ne tudnák tolerálni.

– *Inkább vegyész vagy inkább fizikus voltál már ekkor?*

– Ez érdekes, gondolkodtam rajta, hogy elmegyek és elvégzem a fizikus szakot, mert mégis csak az a rendes dolog. Megkérdeztem Frédit (*Zawadowski Alfréd*), aki mentorálta és a szárnyai alá vette az egész csoportot és rám is nagyon odafigyelt, annak ellenére, hogy én minden voltam, csak nem elméleti fizikus. Ő lebeszélte, azt mondta, hogy van itt kitől tanulni, olvassak könyveket, próbáljak arrafelé menni, ami tényleg fontos. Az sokkal hasznosabb, mint hogy most nekiálljak elméleti részecskefizikát tanulni teljesen feleslegesen. Úgyhogy ebben maradtunk. Szerintem jó és hasznos tanács volt, mert nagyon sok külföldi járt ide KFKI-ba. Borzasztóan jók voltak a kapcsolatok oda és vissza is, azután ebből lettek a külföldi útjaim is.

Az első külföldi út még nem, az úgy történt, hogy valaki posztdoktort keresett Baltimore-ba. Miután kimentem Amerikába, kiderült, hogy azt akarták, hogy én a szerves laborban dolgozzak. Én nem merem eléggé kinyitni a számat, hogy tiltakozzak. Ott nagyon nem jól éreztem magam, nem volt sikeres időszak, úgyhogy a második évre nem hosszabbítottam meg a szerződést.

Nem sokkal később már tudtam, hogy létezik egy ember, aki infravörös optikával foglalkozik olyan anyagokon, amelyek nekem is tetszenek, meg érdekesek is. Dániában dolgoztam 2 hónapot egy nagyon jó infravörös laborban, amikor megjelent ott egy rendkívül szimpatikus ember, *David Tanner*. Kedves volt, aranyos volt, mindenféléről beszélgettünk. És akkor egy kicsit gondolkodtam, azután vettem egy hatalmas levegőt és megkérdeztem, hogy vannak-e posztdokok az ő csoportjában. Most éppen nincsenek. Nem gondolja, hogy én esetleg tudnék ott valamit csinálni?



„That would be great!” Így kerültem ki hozzá. 1987 februárjában megérkeztem Floridába, Gainesville-be, azzal, hogy majd szerves anyagokkal fogok foglalkozni, vittem is mintát magammal. Aznap jelent meg a *Phys. Rev. Letters*-ben a kuprát szupravezetőkről az első cikk. Úgyhogy azt mondták, hogy akkor most mindent eldobunk, te már láttál spektrométert, te most odaülsz és mindent megmérsz, amit ide küldtek. Ezen dolgoztam éjjel-nappal, de nagyon megérte. Ott voltam két és fél évet, ez egy nagyon-nagyon jó szakmai és emberi kapcsolat is lett. Akkoriban az egy feltörekvő tanszék volt, mindenkit odahívtak, próbáltak nyitni, sok volt a fiatal. Nagyon jól működött a labor, nagyon jó volt a környezet, nagyon sokat tanultam. Később is sokszor visszajártam Floridába. Részből azért is, mert akkor itthon még nem volt olyan a műszerpark, amin dolgozni lehetett volna.

– 1989-ben visszajöttél Amerikából...

– 1989 nyarán jöttem haza, megírtam a kandidátusit. Addigra megváltozott itthon a világ, sok mindenre lehetett pályázni, így Humboldt-ösztöndíjjal 1992 januárjától a Max Planck Intézetben, Stuttgartban dolgoztam. Azután voltam még Hollandiában, egészen más témára meghívtak Svájcba, Lausanne-ba is.

Eközben itthon már jött az új téma: 1991-ben felfedezték a fulleréneket, érkeztek az első cikkek. Bejött hozzám *Tüttő István*, hogy szemináriumot kellene tartani a fullerénekről és a C_{60} -ról. Én meg csak néztem, ezek micsodák? Adott pár cikket, átmentem a könyvtárba, ott ültem két napot. Más is így tett, összehoztunk egy olyan szemináriumot, amelyen mindenki ott volt az intézetből. A többiek is elmondták, hogy körülbelül mit takar a felfedezés, milyen információkat szedtünk össze róla, mit tudnánk hozzátenni. Így indult el a kutatás. Az itthoni csoport (*Faiyel Gyula*, *Oszlányi Gábor*; Pekker Sándor) és néhány külföldre elszármazott kolléga (*Mihály László*, *Forró László*, *Holczer Károly*) világviszonylatban is nagyszerű eredményeket ért el ezen a területen. Én Stuttgartban egy jó infravörös-spektrométeren vizsgáltam az itthon készült mintákat. Innen jött még egy csomó ötlet is, és sok mindent sikerült összehozni.

– Mire tartósan hazajöttél, addigra már innen mindenki elment a régi csoportodból.

– Abból a csoportból elmentek, a Műegyetemre (BME) vagy külföldre. Nekem kellett volna egy spektrométer, ekkor adódott, hogy pályázzunk meg egyet a Műegyetemre és menjek oda én is. De végül nem sikerült. Itt, az SZFKI-ban 1998-ban kaptuk az első spektrométert, amelyet azután szépen bővítettünk. Jöttek az első OTKA-k, akkor megint lehetett fejleszteni. Első lépés, hogy a mintát behelyezem a műszerbe és spektru-



mot veszek fel. A következő, hogy alacsony hőmérsékleteken is tudjak mérni, amihez folyékony hélium kell. De amíg nincs pályázat, addig gondolkodni sem érdekes róla, hiszen ez folyamatos költséggel jár. Amikor lett OTKA, lett hélium is. Akkor jött *Kovács Éva*, *Borondics Ferenc*, meg *Klupp Gyöngyi* – egyszerre, egy vegyész évfolyamból. Itt írták a diplomamunkájukat, Évi Pekker Sanyinál, Feri és Gyöngyi nálam. Az osztályvezetőm figyelmeztetett, csináljak valamit, mert három vegyészt tuti biztos nem fognak fölvenni. De mindhármat fölvettem, így lett egy csoportom. Sokáig fullerénnel foglalkoztunk, később jöttek a nanocsövek és mindenféle más. Közben az MTA doktora lettem, jött egy akadémikusválasztás, meg... Azt kell mondanom, hogy ez egy teljesen egyenes karriernek tűnik, az ember dolgozik, kap valami elismerést, tovább dolgozik és megint kap valami elismerést. A Fizikai Osztályon és itt az intézetben abszolút természetesnek vettem, de ez egyáltalán nem az. Borzasztóan hálás vagyok, hogy itt ez így ment. Ezzel persze egy csomó dolog járt: az Akadémián bizottságok, sok-sok pályázat, pár nemzetközi pályázat, nagyon sok ismerős. Közben dolgoztam, nagyon szerettem, még most is nagyon szeretem. Azt gondolom, ha az ember olyat művel, amivel többet tudunk a világról, mint amivel korábban rendelkezünk, az a valóban fontos. Most elmondhatnám, mire lehet alkalmazni, de soha nem az volt a szempont. És ma is, amikor bemegyek a laborba, akkor örülök, hogy ezzel lehet foglalkozni.

– Sok anyagcsaláddal foglalkoztál a pályád során. Melyik volt a kedvenced?

– A fullerének a kedvenceim (ellágyul a hangja), az olyan szimmetrikus és annyi mindent lehet játszani velük. Sokkal később, 2010 körül, amikor már e kutatások nagy része lecsengett, elkaptam egy konferencián az egyik komoly, nagy embert, *Kosmas Prassides*, aki Angliában egy olyan csoportban dolgozott, akik nagyon sokat foglalkoztak fullerénnel. Nagyon jó előadást tartott, és felajánlottam neki, hogy tudnánk segíteni, mert mi sok mindenhez értünk, és azo-

kat meg tudjuk csinálni. Nagyon örült, e kapcsolatból egy *Nature Communications* meg egy *Science Advances* cikk született. Azután ez egy kellemes, több éves projektté vált, de a mostaniak is érdekesek.

A fullerénkutatás tovább fejlődött, mert nanocsőbe lehetett tölteni. Ma már nem csak szén nanocső van, hanem bőr-nitrid nanocső is, abba is bele lehet tölteni, kiderült, hogy más anyagokat is bele lehet tölteni. Az volt a jó, hogy mindig akadt a csoportban valaki, vagy kapcsolatban álltunk olyanokkal, akik értettek az anyagelőállításához, a többi módszerhez pedig meg tudtuk találni az abszolút profikat.

– *Kutatói feladatok közül mi az, amit leginkább szeretsz, illetve mi az, amit nagyon nem?*

– Kísérleteket nagyon szeretem, azok elemzését is, ahogy összerakjuk az információkat, megpróbálunk valamit kitalálni belőle, ahhoz kell az irodalom is. Ahogy a tudást összegyűjtjük, és ahogy a prezentációt is kitaláljuk, az nagyon jó. És ez mindig csoportmunka, szerintem nekem nincs is olyan cikkem, amit egyedül írtam.

Nyilván mindenki az adminisztrációt utálja, de a felesleges adminisztrációt, azt meg még inkább, és az értelmetlen feladatokat. Továbbá, ha olyan környezetben vagy, ahol olyan dolgokat magyaráznak, amelyek biztos, hogy nem úgy vannak; és amikor olyanokkal kell harcolni, vagy egyáltalán kapcsolatot teremteni, akik nem értenek hozzá.

– *Ilyennek képzelted gyerekként, hogy milyen lesz majd amikor nagy leszel és kutató leszel?*

– Nem tudom, hogy mennyire képzeltem el. Tizenéves korom elején olvastam *Ève Curie Madame Curie*-könyvét, és olyan akartam lenni, mint *Marie Curie*. Szerencsére nekem nem kellett a jéghideg laborban sugárbetegséget kapnom attól, hogy kiszedjem a több tonna szurokércből a 0,1 g rádiumot. De az, hogy sokat kell dolgozni és alaposan kell dolgozni, és néha a dolgok nem sikerülnek, nem volt meglepő, szóval azt hiszem, valami ilyesmit gondoltam.



– *Mi kell szerinted ahhoz, hogy valaki ennyire sikeres legyen?*

– Szerencse is kell, meg a nyitottság. Azt hiszem, abban is volt valami fontos, hogy a kémiából elindultam a fizika felé. A rugalmasság mindig kellett. Hogy el tudtam és el akartam menni külföldre, néha rövid időre is mentem. Hogy megkerestem azokat, akik hasonló témákon dolgoztak és megpróbáltunk együtt kutatni – az együttműködési készség is kell. És dolgozni kell, anélkül nem megy.

Floridában azért sokszor reggel 10-től éjjel 2-ig tartott a napom. Hosszú mérések voltak, ott kellett ülni, de nekem ez nem volt nagy újdonság, mert amikor ide kerültem, Mihály Gyuriék ugyanezt csinálták. Akkor még nem volt automatikus mérésirányítás.

– *Két gyermeket neveltél fel, hogy oldottad meg a kisgyerekes időszakot?*

– Szerencsém volt a társaság hozzáállásával. Nekem megvolt az anyagelőállítási háttér, és akkorig éppen a töltéssűrűség-hullám anyagokhoz kellett kristályokat növesztetni. Csak beraktam az egészet egy elektrokémiai cellába, és ott nőttek maguktól. Följöttem hetenként kétszer, egyszer beraktam, egyszer leszedtem. A gyerek közben beteg lett, otthon kellett maradni, de nem baj, úgyis nőtt. Akkor ezzel éltem túl az egészet. De azért legalább ott voltam a megbeszéléseken, ennyit meg tudtam tenni. Másrészt a férjem elméleti munkát végzett, tudományfilozófiával foglalkozott, azt többé-kevésbé otthon is tudta művelni. Az mázli volt, hogy őt is elengedték a munkahelyéről, ilyen értelemben nem volt konfliktus.

– *Voltak mélypontok a pályád során?*

– Azért, amikor kicsik voltak a gyerekek, akkor nem láttam előre, hogyan fog menni. Akkor jó volt egy ilyen szintű fenntartás, hogy te ott valamit csinálsz, megkapod a fizetésed, van valami munkád. De közben azt látni, hogy a többiek lelkesen ezt csinálnak, azt csinálnak, idemennek, odamennek... Te pedig érzed, hogy be vagy zárva, az kellemetlen állapot volt. Onnan úgy kerültem ki, hogy elmentem külföldre. Ott ugye teljesen új vagy, mindenképpen be kell bizonyítanod, hogy mit tudsz, de senki nem gondol rólad semmit, mert még sosem láttak. Ráadásul tényleg nagyon sok feladat volt, úgyhogy, ha azt tényleg rendesen megcsináltad, akkor lett valami elismerés.

– *Kiket emelnél ki, mint példaképeket, olyan személyeket, akik nagy hatással voltak rád?*

– Itt az intézetben az első főnökeim, Grüner György, Jánossy András és Zawadowski Alfréd, akikről nagyon sokat tanultam, mindenféle módon, szakmailag, munkamorál és etika tekintetében is. Továbbá Mihály Gyurit, aki 2 évvel idősebb nálam, ő volt a fő doktorandusz a csoportban. Ő abszolút nyugodt volt, persze feszültségek voltak, mert egy intenzív munkában mindig vannak, de ő azokat mindig nagyon jól elsimította. Azóta is csodálom, ahogy egyetemi intézményvezetőként, Doktori Tanács elnökként, akadé-

miai osztályelnökként dolgozik. Meg Faigel Gyula, ő lett itt a kutatócsoport-vezető, amikor elment az egész társaság, ő is tökéletes támogató volt. Amikor hazajöttem külföldről és mindent újra kellett kezdeni, akkor ő már akadémikus volt, és mindenben bevetette a tekintélyét. Az a három ember, akit felvettek, többek között az is neki köszönhető.

– *Kutatás mellett rengeteg kapcsolódó feladatot vállalsz: oktatás, szervezeti tagságok, bizottságokban végzett munka. Mit emelnél ki ezek közül?*

– A Doktori Tanács, ahol most kezdem a második ciklust, ez nagyon fontos feladat szerintem. Mert kell az MTA doktori, most különösen fontos, hogy legyen egy szervezetektől független minőségbiztosítás, annak meg kell maradni. Nagyon szerettem az OTKA-zsűrikben dolgozni, mert úgy éreztem, hogy a fizikazsűrik tényleg abszolút részrehajlásmentesen, nagyon jó szakmai színvonalon működtek. Volt egy olyan bizottság, amit nagyon szerettem, a *Nők a Kutatói Életpályán Elnöki Bizottság*, ami 2017–2020 között működött. Ott azt hiszem, hogy tényleg sikerült valamit tennünk azért, hogy egy kicsit több legyen a nők száma az akadémikusok között, ehhez elbeszélgettünk az osztályelnökökkel. Olyan ösztöndíjat javasoltunk, ami nőknek és egyedülálló apáknak van, hogy az MTA doktorijukat meg tudják szerezni, hogy közben ne kelljen pénz után szaladgálni, tudjanak koncentrálni. Ez is nagyon jó hangulatú munka volt, ott még lenne teendő.

– *Fontosnak tekinted, hogy legyenek a kutatónőknek külön szervezetei?*

– Igen, ezzel a kérdéssel mindenképpen foglalkozni kell, volt egy-két olyan tapasztalatom is, ami ezt alátámasztja. Mi itt a fizikában tényleg kisebbség vagyunk, nagyon erősen, és nem árt, ha tudunk egymásról. Az Akadémián is kisebbség vagyunk.

– *Szerinted miért van ennyire kevés nő az Akadémián?*

– Amikor volt ez a *Nők a Kutatói Életpályán Elnöki Bizottság*, összeálltunk hárman, *Lamm Vanda*, *Ligeti Erzsébet* meg én. Beszélgettünk minden osztályelnökkel és kiderült, hogy a fizikában tényleg nincs olyan női nagydoktor, akit most éppen javasolni lehetne akadémikusnak. Ez már ott kezdődik, amikor én se mertem elmenni a fizikus szakra – mit tudom én, hogy miért –, ott csomó rettentően okos fiú van, lányok viszont kevesen, és akkor majd ott nem fogom magam jól érezni. A vegyész szakon fele-fele volt az arány. Ha sok olyan embert látsz, mint amilyen te vagy, az biztonságérzetet ad az embernek. Nagyon sok függ a mikroklímától. Amikor épp csupa pasi volt körülöttem, akkor is nagyon jó volt a mikroklíma. De

Kamarás Katalin tudományos életútja számokban

1976: ELTE TTK vegyész diploma
1979: ELTE, egyetemi doktori fokozat (fizikai kémia)
1980: Fiatal Kutatói Díj
1981: Jánossy Lajos-díj
1991: Schmid Rezső-díj
1991: Fizikai tudomány kandidátusa
1996: Fizikai tudomány doktora (MTA nagydoktor)
1999: Széchenyi professzori ösztöndíj
2002: Fizikai Díj
2010: MTA levelező tag
2016: MTA rendes tag
2023: Széchenyi-díj

Tudományos közlemények: 231
Független hivatkozások: 7426
Nemzetközi konferencián tartott előadások: 65
Elnyert pályázatok: 35

az elvárás, meg a stílus olyan volt, hogy ezt nem minden nő bírná. Ugyanakkor meg volt egy csomó siker-élmény abból, hogy hozzá tudtam szólni, hozzá tudtam valamit tenni. Feladat volt, meg kellett csinálni. Azt mondták, ha megcsináltam, akkor oké. Azt volt nehéz megugrani, hogy te vegyész vagy, menj a laborba, aztán főzd az anyagokat. Abban a pillanatban, hogy sikerült megértetni velük, hogy én másra is képes vagyok, rendben volt.

– *Milyen tanácsot adnál a mostani fiatal kutatóknak?*

– Most talán nehezebb, mint amikor mi voltunk fiatalok. Akkor egyértelműbbek voltak a körülmények, sok akadály volt, sokkal inkább be voltunk szorítva és nagyobb szerencse kellett, hogy előre jussunk. Azt hiszem, fontos, hogy foglalmazzák meg a prioritásait, nézzenek körül. Ne hallgassanak senkire, mindenfajta lehetőséget vizsgáljanak meg. Azt tartásuk szem előtt, hogy mit akarnak csinálni, keressék meg a megfelelő embereket, akiktől tanácsot lehet kérni, menjenek előre, amerre az élet viszi őket.

– *Melyek a terveid a jövőre nézve?*

– Most megyek nyugdíjba, sőt már nyugdíjban is vagyok, de még maradok. Van még két részállásom és azt is szeretném folytatni. Most kezdtük el a nanoszerkezetű közeliterű infravörös mikroszkópiát, ami rendkívül izgalmas dolog, abban szeretnék továbblépni. Jelenleg a csoport létszáma mélyponton van, tehát mindenképpen új embereket kell bevonni, és folytatni a kutatást, ha lehet.

– *Köszönöm szépen a beszélgetést, további sok sikert kívánok!*

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 kiadó Groma István főtáskár, felelős szerkesztő Igli Ferenc főszerkesztő.

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

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

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

Megjelenik havonta (évente egyszer duplaszámmal), egyes szám ára: 1200.- Ft (duplaszáma 2400.- Ft) + postaköltség.

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

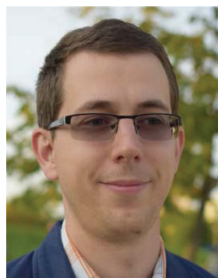
BESZÁMOLÓ A 2022. ÉVI EÖTVÖS-VERSENYRŐL

Gnädig Péter – Vácduka
Széchenyi Gábor – ELTE Anyagfizikai Tanszék
Vankó Péter – Budapest
Vigh Máté – Biatorbágy

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2022. évi Eötvös-versenye október 14-én délután 3 órai kezdettel tíz magyarországi helyszínen (Budapest, Debrecen, Eger, Győr, Kecskemét, Miskolc, Nagykanizsa, Pécs, Szeged és Veszprém) került megrendezésre. Külön köszönettel tartozunk mindazoknak, akik ebben szervezéssel, felügyelettel a segítségünkre voltak. A versenyen a három feladat megoldására 300 perc állt rendelkezésre, bármely írott vagy nyomtatott segédeszköz használható, de zsebszámológépen kívül minden elektronikus eszköz használata tilos volt. Az Eötvös-versenyen azok vehetnek részt, akik vagy középiskolai tanulók, vagy a verseny évében fejezték be középiskolai tanulmányaikat. Összesen 60 versenyző adott be dolgozatot, 21 egyetemista és 39 középiskolás.



Gnädig Péter 1971-ben végzet az ELTE-n fizikusként és annak Atomfizikai Tanszékén dolgozott nyugdíjazásáig. Az elméleti fizika szinte valamennyi témaköréből, továbbá vektorszámításból tartott előadásokat több évtizeden keresztül. Mintegy 20 éven át a Nemzetközi Fizikai Diákolimpia magyar csapatának felkészítője és vezetője volt. Három évtizede a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* fizikus szerkesztője. Több tankönyv és feladatgyűjtemény szerzője.



Széchenyi Gábor az ELTE Anyagfizikai Tanszék adjunktusa. Főbb kutatási területei a szilárdtest-fizika és a kvantuminformatika. A kutatás mellett részt vállal a hazai tehetséggondozásban is: a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* szerkesztőbizottsági tagja, a Nemzetközi Fizikai Diákolimpia magyar csapatának felkészítője és 2021 óta az Eötvös-verseny bizottságának tagja.



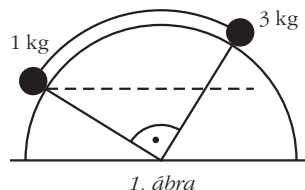
Vankó Péter középiskolások tehetséggondozásával foglalkozik, több nemzetközi tanulmányi versenyen a magyar csapat egyik vezetője és felkészítője. Néhány éves kutatói pálya után közel két évtizeden át középiskolában, majd bő két évtizeden át a BME Fizikai Intézetében tanított. Az Eötvös-verseny gimnazista kora óta közel áll a szívéhez, tíz éve tagja a versenybizottságnak.

Az ünnepélyes eredményhirdetésre és díjkiosztásra 2022. november 25-én került sor az ELTE TTK Konferenciateremben. A mostani díjazottakon kívül meghívtak kaptak az 50 és a 25 évvel ezelőtti Eötvös-verseny nyertesei is. Először az akkori feladatokat mutatjuk be.

Az 1972. évi Eötvös-verseny feladatai

1. feladat

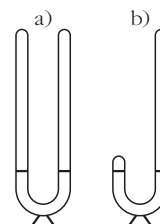
Egy félhengerre olyan hosszú fonalat fektetünk, amelyhez tartozó középponti szög 90° -os (1. ábra). A felszínhez feszülő fonál egyik végén 1 kg-os, másik végén 3 kg-os tömeg van. A fonalat úgy helyezzük el, hogy az 1 kg-os tömeg a félhenger fele magasságában legyen. Ezután elengedjük a fonalat. Melyik tömeg repül le előbb, a hengerről? A súrlódást nem vesszük figyelembe.



1. ábra

2. feladat

a) Hosszú szárú U-alakú csőben szobahőmérsékletű víz van (2. ábra). A bal oldali szárban a víz felszínét párolgásmentes olajhártya zárja el. A berendezést súlypontja alatt megtámasztjuk, majd egyenletesen felmelegítjük. Felborul-e?



2. ábra

b) Mi történik melegítéskor az előzőleg kiegyensúlyozott berendezéssel akkor, ha nincs olajhártya, de a bal oldali szár sokkal rövidebb?



Vigh Máté, fizikus. Tehetséggondozással 15 éve foglalkozik, hazai és nemzetközi fizikaversenyek feladatkitűzője, zsűritagja. Oktatott az ELTE-n és BME-n is, jelenleg kvantitatív kutatóként dolgozik gazdasági területen. Az Eötvös-verseny bizottságának 2010 óta tagja.

3. feladat

Felfújt, könnyű műanyag labdát találmra megpörgetve sima vízfelületre ejtünk. Azt tapasztaljuk, hogy mielőtt megáll, rendszerint függőleges tengely körül forog. Mi a jelenség magyarázata?

Az 1972-es verseny díjazottjai

I. díjat kapott *Szabó Zoltán*, a budapesti Apáczai Cse-re Gimnázium érettségizett tanulója, tanára: *Turtóczy Sándor*.

II. díjat kapott *Németh Tibor*, a budapesti Berzsényi Gimnázium III. osztályos tanulója, tanára: *Hubert Györgyné*.

III. díjat kaptak *Bezdek Károly*, a dunaújvárosi Münnich Gimnázium IV. osztályos tanulója, tanára: *Kobzos Ferenc*,

Tóth Péter, a budapesti Eötvös Gimnázium IV. osztályos tanulója, tanára: *Veres Mihályné*,

Vassel Róbert, a budapesti I. István Gimnázium érettségizett tanulója, tanára: *Moór Ágnes*.

Az 1997. évi Eötvös-verseny feladatai

1. feladat

Magyarországon 1997. szeptember 16-án este holdfogyatkozást lehetett megfigyelni. Negyed 10-től negyed 11-ig tartott a teljes holdfogyatkozás, vagyis ekkor tartózkodott a Hold teljes egészében a Föld teljes árnyékában.

a) A holdfogyatkozás általában hosszabb ideig tart, mint a napfogyatkozás. Miért?

b) Feltételezve, hogy a Hold a Föld körül és a Föld a Nap körül körpályán kering, valamint elhanyagolva a Föld légkörének optikai hatását, határozzuk meg, hogy legfeljebb mennyi ideig tarthat egy teljes holdfogyatkozás! A Földről a Hold és a Nap egyaránt $0,5^\circ$ látószögben látszik; a Föld látószöge a Holdról nézve $1,83^\circ$. (Hogyan befolyásolná az eredményt, ha figyelembe vennénk, hogy az említett pályák inkább ellipszisek, mint körök?)

c) A valóságban teljes holdfogyatkozáskor sem tűnik el teljesen a Hold az égről, hanem vörös színben, halványan világít. Miért?

2. feladat

Egy 1 méter magas asztal lapjának közepén lyuk van. A lyuk közvetlen környezetében az asztallapon lazán elhelyeztünk egy 1 méter hosszú, vékony aranyláncot. Ennek egyik végét a lyukon keresztül kicsit meghúzzuk, majd elengedjük. A lánc egyre növekvő sebességgel szalad le a lyukon át. (Feltételezhetjük, hogy a lánc nem gubancolódik össze. A súrlódás és a légellenállás elhanyagolható.)

Mennyi idő alatt ér a lánc egyik, illetve másik vége a földre?

3. feladat

Egy vákuumkamrában lévő hosszú, egyenes, nagyon jó vezetőképeségű huzalban 10 A erősségű áram folyik. A huzaltól r_0 távolságban lévő pontból v_0 kezdősebességű elektronok indulnak el a huzal felé, rá merőlegesen, de ezek az elektronok csak $r_0/2$ távolságra képesek megközelíteni a huzalt. Mennyi lehet v_0 értéke? (A földi mágneses tér hatásától eltekinthetünk.)

Az 1997-es verseny díjazottjai

I. díjat nem adtak ki.

II. díjat kaptak *Kovács Gábor*, a soproni Berzsényi Dániel Evangélikus Líceum érettségizett tanulója, tanára: *Lang Jánosné*,

Várkonyi Péter, a Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Gimnázium érettségizett tanulója, tanára: *Horváth Gábor*.

III. díjat kaptak *Egri Győző*, a budapesti Alternatív Közgazdasági Gimnázium érettségizett tanulója, tanára: *Korom Pál*,

Gyurkó Martin, a zalaegerszegi Ságvári Endre Gimnázium 12. osztályos tanulója, tanára: *Ráduylné Horváth Katalin*,

Koncz Imre, a Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Gimnázium érettségizett tanulója, tanára: *Horváth Gábor*.

Az eredményhirdetésen jelen volt a 25 évvel ezelőtti díjazottak közül Egri Győző, Koncz Imre és Várkonyi Péter, akik az akkori feladatok ismertetése után röviden beszéltek a versennyel kapcsolatos emlékeikről és pályájukról.

Ezután következett a 2022. évi verseny feladatainak és megoldásainak bemutatása. Az 1. feladat megoldását *Gnädig Péter*, a 2. feladatét *Vankó Péter*, a 3. feladatét *Széchenyi Gábor* ismertette.

A 2022. évi verseny feladatai és megoldásai

1. feladat

kitűzte: *Gelencsér Jenő*

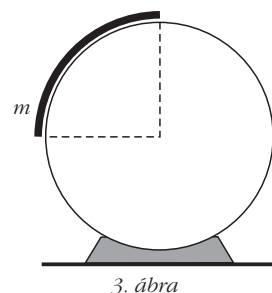
Vízszintes tengelyű, rögzített hengerre egy vékony, hajlékony, m tömegű láncot helyezünk a 3. ábrán látható módon, és nyugalomban tartjuk. A henger és a lánc közötti súrlódás elhanyagolható.

a) Mekkora gyorsulással indul el a lánc, ha szabadon engedjük?

b) Mekkora a láncot feszítő erő legnagyobb értéke az elengedés utáni pillanatban?

Megoldás

a) Számítsuk ki a lánc gyorsulását az indulás pillanatában. Ezt többféle módszerrel is megtehetjük.



3. ábra

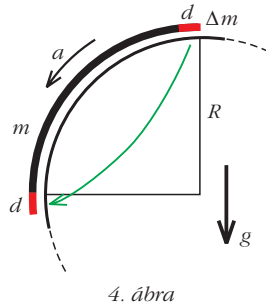
I. módszer. Ha a lánc a gyorsulással indul, akkor egy nagyon rövid t időtartam alatt az elmozdulása

$$d = \frac{a}{2} t^2,$$

sebessége pedig $v = at$ lesz.

Alkalmazzuk a mechanikai energiamegmaradás törvényét erre a mozgásra (4. ábra)! A lánc mozgási energiája (annak megváltozása)

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{mozgási}} &= \frac{1}{2} m v^2 = \\ &= \frac{1}{2} m a^2 t^2. \end{aligned}$$



A helyzeti energia változását legegyszerűbben úgy kaphatjuk meg, hogy a lánc felső végéről gondolatban levágunk egy d hosszúságú darabot, és azt a lánc alsó végéhez „ragasztjuk”. E darabka tömege

$$\Delta m = \frac{m}{\frac{1}{2} R \pi} d,$$

és mivel R távolsággal mélyebbre kerül,

$$\Delta E_{\text{helyzeti}} = -\Delta m g R = -\frac{2 m g}{\pi} d = -\frac{m g}{\pi} a t^2.$$

Az energiamegmaradás tétele szerint

$$\Delta E_{\text{mozgási}} + \Delta E_{\text{helyzeti}} = 0,$$

ahonnan

$$\frac{1}{2} m a t^2 \left(a - \frac{2}{\pi} g \right) = 0.$$

Mivel $mat^2 \neq 0$, a keresett gyorsulás:

$$a = \frac{2}{\pi} g.$$

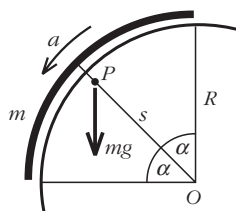
II. módszer. Ismert (vagy táblázatokban megtalálható), hogy az R sugarú, 2α nyílásszögű homogén körív P tömegközéppontja a kör O középpontjától

$$s = \frac{\sin \alpha}{\alpha} R$$

távolságra van (5. ábra). Esetünkben $\alpha = \pi/4$, így

$$s = \frac{\sqrt{8}}{\pi} R \approx 0,9 R.$$

Az éppen meginduló láncot tekinthetjük merev testnek,



5. ábra

amelynek az O pontra vonatkoztatott tehetetlenségi nyomatéka $\Theta = mR^2$. A láncra (merev testre) ható külső erők forgatónyomatéka csak a nehézségi erőből származik, nagysága

$$M = m g s \sin \frac{\pi}{4} = m g R \frac{\sqrt{8}}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{2}{\pi} m g R.$$

(A láncra hat még a henger által kifejtett, helyről helyre változó kényszererő is, ezen erők azonban – súrlódásmentes esetben – mindenhol sugárirányúak, tehát az O pontra vonatkoztatott forgatónyomatékuk nulla.)

A forgómozgás alaptörvénye szerint a test szöggyorsulása

$$\beta = \frac{M}{\Theta} = \frac{2}{\pi} \frac{m g R}{m R^2} = \frac{2}{\pi} \frac{g}{R},$$

a lánc „kerületi” gyorsulása pedig

$$a = R \beta = \frac{2}{\pi} g.$$

b) A láncot feszítő K erő a lánc végeinél nulla, közöttük pedig valahol maximuma van. Ezt a helyet, valamint a maximális feszítőerő nagyságát keressük. A lánc egy-egy kicsiny, φ szöggel jellemezhető helyen lévő darabkájára ható nehézségi erő önmagában

(éppen úgy, mint egy φ hajlásszögű lejtőn) $g \sin \varphi$ gyorsulást hozna létre, ami a lánc felső részén kisebb, az aljának közelében nagyobb, mint az egész lánc a gyorsulása (6. ábra). Emiatt a felső részekre ható feszítőerők különbsége általában nullától különböző, hiszen egy Δm tömegű kicsiny láncdarabka mozgásegyenlete

$$K_{\text{előre}} - K_{\text{hátra}} + \Delta m g \sin \varphi = \Delta m a = \Delta m g \frac{2}{\pi},$$

vagyis

$$K_{\text{előre}} = K_{\text{hátra}} + \Delta m g \left(\frac{2}{\pi} - \sin \varphi \right).$$

Látható, hogy a lánc felső végétől ($\varphi = 0$ helytől) elindulva mindaddig, amíg

$$\sin \varphi < \frac{2}{\pi} \Rightarrow K_{\text{előre}} > K_{\text{hátra}},$$

vagyis a $K(\varphi)$ kényszererő (a láncot feszítő erő) φ növekvő függvénye. Ha viszont

$$\sin \varphi > \frac{2}{\pi} \Rightarrow K_{\text{előre}} < K_{\text{hátra}},$$

tehát ebben a tartományban a $K(\varphi)$ kényszererő φ csökkenő függvénye. Ezek szerint a kényszererő

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{2}{\pi} \approx 0,69 \text{ radián} \approx 39,5^\circ$$

szögnél a legnagyobb. Itt

$$K_{\text{előre}} = K_{\text{hátra}} = K_{\text{max}}.$$

Kérdés, hogy mekkora K_{max} értéke. Ezt a lánc felső ($\varphi \leq \varphi_0$ szögekkel jellemzett) darabjának forgási mozgásegyenletéből kapjuk meg (7. ábra).

A kérdéses láncdarab tömege

$$m_0 = \frac{m}{\frac{1}{2}\pi} \varphi_0,$$

tehetetlenségi nyomatéka

$$\Theta_0 = m_0 R^2,$$

tömegközéppontjának az O ponttól mért távolsága

$$s_0 = \frac{\sin\left(\frac{1}{2}\varphi_0\right)}{\frac{1}{2}\varphi_0} R$$

és a tömegközéppont távolsága az O ponton átmenő, függőleges egyenestől

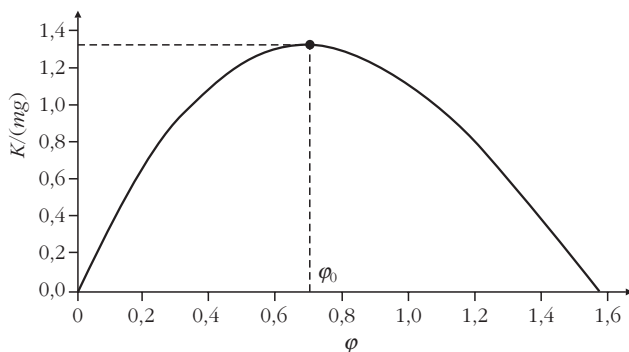
$$l_0 = s_0 \sin\left(\frac{1}{2}\varphi_0\right).$$

A forgómozgás alapegyenlete szerint

$$K_{\text{max}} R + m_0 l_0 = \Theta_0 \frac{a}{R},$$

ahonnan a fentebb kiszámított értékek behelyettesítése után kapjuk, hogy

$$K_{\text{max}} = m g \left(\frac{4}{\pi^2} \varphi_0 - \frac{4}{\pi} \sin^2 \frac{\varphi_0}{2} \right) \approx 0,13 \text{ mg}.$$



8. ábra

Ugyanezt az eredményt megkaphatjuk a munkatételből is, ha felírjuk, hogy egy nagyon rövid időtartam alatt a nehézségi erő munkájának és a K kényszererő munkájának összege a kezdetben álló láncdarab mozgási energiájával lesz egyenlő.

A láncot feszítő erőt a fentiek mintájára tetszőleges pontban (tetszőleges φ szögre) kiszámíthatjuk:

$$K(\varphi) = m g \left(\frac{4}{\pi^2} \varphi - \frac{4}{\pi} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)$$

és ábrázolhatjuk is (8. ábra).

2. feladat

kitűzte: Vigh Máté

Egy téglatest alakú gáztartályt egy kétrétegű, finom szövésű fémháló oszt két részre; a két térrész térfogatának aránya 1:2. A fémháló két rétege a közöttük lévő, igen keskeny rés miatt nem ér össze. A tartályban egyszerűen pozitív töltésű ionokból álló gáz található. A hőmérsékletet mindkét térrészben állandó, 1200 K értéken tartjuk. Milyen polaritású és mekkora egyenfeszültséget kell kapcsolni a fémháló rétegei közé ahhoz, hogy hosszú idő után a két térrészben található ionok száma megegyezzen? (A gáz elég ritka ahhoz, hogy a részecskék közötti kölcsönhatás elhanyagolható legyen, az átlagos szabad úthossz pedig jóval nagyobb a fémháló rétegeinek távolságánál. Az ionok töltése állandó.)

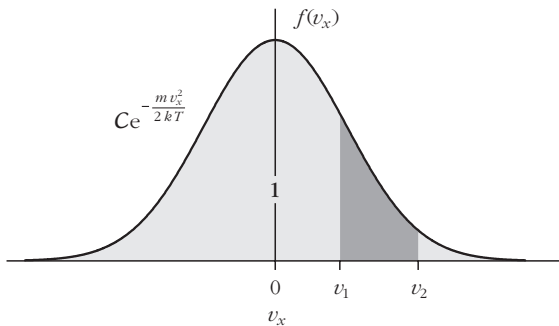
1. megoldás

Ez a gondolatmenet a kinetikus gázelméleten alapul. Előljáróban összefoglalunk néhány fontosabb tudnivalót, amit a megoldás során fel fogunk használni (az Eötvös-versenyen bármely nyomtatott szakirodalom szabadon használható).

Ismert, hogy adott T hőmérsékletű gázban a részecskék sebességének egy adott (például x) irányba eső vetülete nem mutat egyenletes eloszlást: kisebb sebességértékek előfordulása gyakoribb, míg a nagy értékek kevésbé valószínűek. Ezt az előfordulási gyakoriságot az $f(v_x)$ Maxwell–Boltzmann-féle eloszlásfüggvénnyel lehet jellemezni, amely megadja, hogy a részecskék mekkora hányada rendelkezik egy adott $(v_x, v_x + dv_x)$ intervallumba eső sebességkomponenssel:

$$\frac{(v_x, v_x + dv_x)\text{-ba eső részecske száma}}{\text{összes részecske száma}} = f(v_x) dv_x.$$

Ebből a meghatározásból következik, hogy az $f(v_x)$ függvény görbe alatti területe *tetszőleges* (tehát nem csak infinitezimálisan kicsiny) sebességintervallumon megadja az abba a tartományba eső részecskék számának arányát a teljes részecskeszámhoz viszonyítva (lásd a 9. ábrát). Ennek értelmében az $f(v_x)$ eloszlásfüggvény teljes görbe alatti területe szükségszerűen 1 (más szóval a függvény normált).



9. ábra

Az $f(v_x)$ függvény alakját egy C normálási tényező erejéig az x irányú mozgáshoz tartozó $m v_x^2/2$ energia határozza meg a Boltzmann-faktor alapján:

$$f(v_x) = C e^{-\frac{m v_x^2}{2 k T}},$$

amelyet *normáloszlásnak* vagy *Gauss-eloszlásnak* neveznek.

Térjünk rá a konkrét feladat megoldására! A koordináta-rendszerünk x tengelyét válasszuk a fémháló síkjára merőlegesen, a kisebb térrész felől a nagyobb felé mutató irányban. A kisebb térrészre vonatkozó fizikai mennyiségeket jelöljük 1-es indexszel, míg a nagyobb térrészhez tartozó mennyiségeket 2-es indexszel.

Ha a fémháló két rétege közé nem kapcsolunk feszültséget, a gáz egyenletesen tölti ki az egész tartályt, azaz a két térrészben a részecskeszám-sűrűség (n) megegyezik, az ionok számának aránya pedig a térfogatok arányával egyezik meg. A kívánt végállapotban azonban a két térrész részecskeszáma egyenlő, így a részecskeszám-sűrűségek viszonya:

$$n_1 = 2 n_2.$$

Ez az inhomogén elrendeződés olyan polaritású elektromos térrel tartható fenn, amelyben a térerősség akadályozza a pozitív töltésű ionok áramlását a kisebb térrészből a nagyobb térrész irányába. A síkkondenzátornak tekinthető fémhálónak tehát a kisebb térrész felőli oldala lesz negatív töltésű, a nagyobb térrész felé eső oldala pedig pozitív polaritású.

A feladat szövege szerint a részecskék átlagos szabad úthossza jóval nagyobb a fémháló rétegeinek távolságánál, ezért a „kondenzátor” belsejében az ionok egymással nem (pontosabban elhanyagolhatóan kis eséllyel) ütköznek, kizárólag az itt uralkodó elektromos mező hatása alatt állnak. A nagyobb térrészből a fémháló rétegei közé belépő ionok az elektromos tér hatására felgyorsulnak, majd a kisebb térrészbe érve az ott lévő részecskékkel ütközve termalizálódnak. Ebben az irányban tehát az ionok akadály nélkül áthaladnak a hálón. A kisebb térrész felől belépő ionok azonban csak akkor tudnak áthaladni a fémhálón, ha az x irányú sebességkomponensük na-

gyobb egy bizonyos v^* értéknél, ellenkező esetben az elektromos tér visszafordítja őket. Az ilyen irányú áthaladáshoz szükséges határsebességet a munkatételből kaphatjuk meg:

$$-e U = 0 - \frac{1}{2} m (v^*)^2 \Rightarrow v^* = \sqrt{\frac{2 e U}{m}},$$

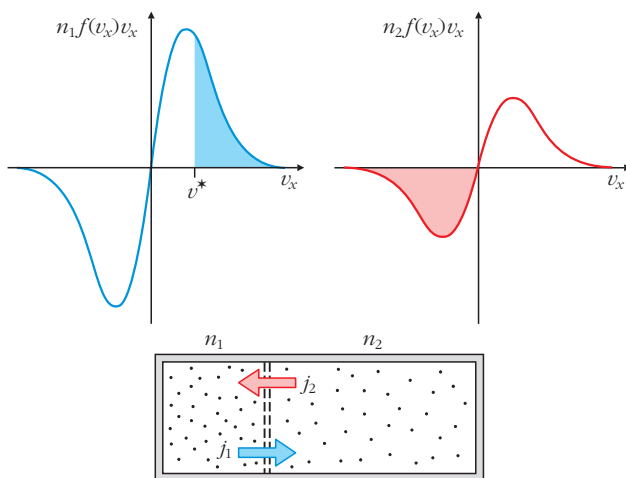
ahol e az elemi töltés, U pedig a fémhálóra kapcsolt feszültség. Itt is igaz, hogy a $v_x > v^*$ feltételt teljesítő ionok a nagyobb térrészbe érve termalizálódnak. Vizsgáljuk meg részletesebben, hogy pontosan mekkora az a v^* sebesség (és mekkora az ehhez tartozó U feszültség), amelynél a két térfélben a részecskék száma azonos marad!

Tekintsük a kisebb térrészben lévő részecskék közül azokat, amelyeknek x irányú sebességkomponense a rács felé mutat és a $(v_x, v_x + dv_x)$ tartományba esik. Ezek az ionok az eloszlásfüggvény definíciója alapján $n_1 f(v_x) dv_x$ térfogati sűrűségben helyezkednek el a kisebb térrészben. Kicsiny Δt időtartam alatt a részecskék ezen csoportjából csak azok az ionok érnek el a fémhálót, amelyek legfeljebb $v_x \Delta t$ távolságra vannak attól. A fémháló teljes A területére tehát Δt idő alatt a megadott sebességtartományban

$$n_1 f(v_x) dv_x \cdot A v_x \Delta t$$

számú ion érkezik be a kisebbik térrész felől. A fémhálóra kapcsolt feszültség miatt csak a $v_x > v^*$ feltételt teljesítő részecskék jutnak át a nagyobb térrészbe (11. ábra), ezért az átjutó ionok számát a sebesség szerinti integrálként a következőképp fejezhetjük ki:

$$\Delta N_1 = \int_{v^*}^{\infty} n_1 f(v_x) \cdot A v_x \Delta t dv_x.$$



11. ábra

Ha ezt a mennyiséget elosztjuk az A területtel és a Δt időtartammal, akkor megkapjuk a kisebb térrészből a nagyobb térrészbe belépő részecskeáram-sűrűséget:

$$j_1 = \frac{\Delta N_1}{A \Delta t} = n_1 \int_{v^*}^{\infty} f(v_x) v_x dv_x.$$

Teljesen hasonlóan számolhatjuk ki a nagyobb térrészből a kisebbbe átlépő részecskék áramsűrűségét, azzal a különbséggel, hogy ilyen irányban minden olyan részecske átjut a fémhálón, amelynek x irányú sebességkomponense negatív:

$$j_2 = n_2 \int_{-\infty}^0 f(v_x) v_x dv_x.$$

Látható, hogy j_2 negatív, hiszen a negatív x tengely irányába történő részecskeáramlást ír le. Állandósult állapotban a nagyobb térrészbe belépő és az onnan kilépő részecskék áramsűrűségének előjeles összege zérus:

$$j_1 + j_2 = 0.$$

Felhasználva $f(v_x)$ korábban felírt alakját:

$$n_1 \int_{v^*}^{\infty} C e^{-\frac{m v_x^2}{2kT}} v_x dv_x + n_2 \int_{-\infty}^0 C e^{-\frac{m v_x^2}{2kT}} v_x dv_x = 0.$$

Az integrálok kiszámításához érdemes áttérni a

$$w = \frac{m v_x^2}{2 k T}$$

változóra. Ennek segítségével

$$dw = \frac{m}{k T} v_x dv_x,$$

így a fenti egyenlet egyszerűsítések és az integrálási határok megváltoztatása után így írható:

$$n_1 \int_{\frac{eU}{kT}}^{\infty} e^{-w} dw + n_2 \int_{-\infty}^0 e^{-w} dw = 0.$$

Az integrálokat most már elvégezhetjük:

$$n_1 [-e^{-w}]_{\frac{eU}{kT}}^{\infty} + n_2 [-e^{-w}]_{-\infty}^0 = 0.$$

A primitív függvényeket a határokon kiértékelve kapjuk:

$$n_1 e^{-\frac{eU}{kT}} - n_2 = 0,$$

ahonnan a keresett U feszültség:

$$U = \frac{k T}{e} \ln \left(\frac{n_1}{n_2} \right) = \frac{k T}{e} \ln 2 \approx 72 \text{ mV}.$$

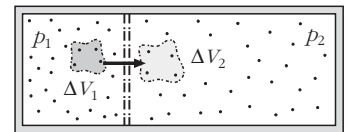
Megjegyzés. Voltak versenyzők, akik a fizikai jelenléteket részletesen átlátták, az áramsűrűségekre felírt integrálokat azonban nem számolták ki, ehelyett észszerű becsléseket végeztek. A Versenybizottság ezeket a közelítéseket is értékelte.

2. megoldás

Az állandósult állapot kialakulása után a kisebb térrészben kétszer akkora lesz a nyomás, mint a nagyobb térrészben, hiszen a hőmérséklet és részecskeszám ugyanakkora, a térfogatok aránya viszont 1:2:

$$p_1 = 2 p_2.$$

Végezzük el a következő gondolat kísérletet. A kisebb térrészben vegyünk körbe ΔN számú iont egy könnyű ballonnal, ahol ΔN sokkal kisebb a teljes gázmennyiség részecskeszámánál. Jelölje a ballon kezdeti térfogatát ΔV_1 . Gondolatban vigyük át ezt a ballont a másik térrészbe, majd engedjük ott izotermikusan kitágulni akkora ΔV_2 térfogatra, ameddig a bezárt gáz nyomása p_1 értékről p_2 -re csökken (12. ábra). Számítsuk ki, mekkora munkát kell végeznünk a folyamat közben!



12. ábra

Amikor a ΔV_1 térfogatú ballont a kisebb térrészből eltávolítjuk, a térrészben lévő p_1 nyomású gáz igyekszik a ballont „kilökní” onnan. Ennek megakadályozására nekünk negatív,

$$W_1 = -p_1 \Delta V_1$$

munkát kell végeznünk. Ezután a fémháló elektromos mezőjén a térerősséggel ellentétes irányban kell elmozdítani az $e\Delta N$ össztöltésű gázmennyiséget, ez további

$$W_2 = e \Delta N U$$

munkát igényel. Amikor ballont izotermikusan kitágítjuk a végső ΔV_2 térfogatra, az általunk végzett munka negatív, értéke

$$W_3 = -\Delta N k T \ln \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \right).$$

Nem szabad megfeledkeznünk arról sem, hogy a nagyobb térrészben ΔV_2 térfogatú helyet kell szorítani az oda átvitt gázmennyiségnek, ehhez

$$W_4 = p_2 \Delta V_2$$

munka szükséges. A képzeletbeli folyamat során tehát összesen

$$W_{\text{teljes}} = -p_1 \Delta V_1 + e \Delta N U - \Delta N k T \ln \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \right) + p_2 \Delta V_2$$

munkát végeztünk. Vegyük észre, hogy az első és az utolsó tag kiejti egymást, hiszen az ideális gázok állapotegyenlete szerint

$$p_1 \Delta V_1 = \Delta N k T,$$

$$p_2 \Delta V_2 = \Delta N k T.$$

Szintén ebből következik, hogy a ballon végső és kezdeti térfogatának aránya kifejezhető a nyomások arányával:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} = \frac{p_1}{p_2}.$$

A teljes munkavégzés tehát így írható:

$$W_{\text{teljes}} = e \Delta N U - \Delta N k T \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right).$$

Ha ez a munka negatív lenne, akkor a folyamat magától végbemenne, azaz a kis gázmennyiség átjutna a kisebb térrészből a nagyobb térrészbe. Ellenkező esetben, ha a munka előjele pozitív lenne, a folyamat az ellentétes irányban menne végbe spontán módon. Mivel stacionárius állapotban egyik sem történik meg, W_{teljes} szükségképpen zérus:

$$e \Delta N U - \Delta N k T \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = 0.$$

A mozgatott gázmennyiség ΔN részecskeszámával leoszthatunk, majd közvetlenül megkapjuk az

$$U = \frac{k T}{e} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = \frac{k T}{e} \ln 2$$

eredményt, amely megegyezik az 1. megoldással.

3. megoldás

Vegyük észre, hogy a megoldás, amit kaptunk, átrendezhető a következő alakba:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{p_2}{p_1} = e^{-\frac{e U}{k T}} = e^{-\frac{\Delta E}{k T}},$$

ahol ΔE a két térrész közötti potenciálisenergia-különbség. Ugyanerre az eredményre jutunk, ha átrendezzük a jól ismert „barometrikus magasságformula” képletét:

$$\frac{p_2}{p_1} = e^{-\frac{\rho g \Delta h}{p_1}} = e^{-\frac{m g \Delta h}{k T}} = e^{-\frac{\Delta E}{k T}},$$

ahol ρ a gáz sűrűsége, g a nehézségi gyorsulás, Δh a magasságkülönbség, m a részecskék tömege, és ΔE itt is a két helyzet közötti potenciálisenergia-különbség.

Ha nem a „nagy szabad úthossz” közelítését vizsgálnánk, a két fémháló között a nyomás ugyanúgy változna, mint a „barometrikus magasságformula” izotermikus légoszlopában. Az mg nehézségi erő helyére az eE elektromos erő kerülne.

Mindkét esetben megjelenik a

$$e^{-\frac{\Delta E}{k T}}$$

Boltzmann-tényező. Ennek magyarázata az, hogy a gázrészecskéket energetikai szempontból jellemző (v_x, v_y, v_z) sebességkomponensek mellett a feladatbeli rendszerben megjelenik még egy „szabadsági fok” is: az, hogy a részecske melyik térfélben helyezkedik el. A nagyobb (2-es számú) térrészben az ionok potenciális energiája $\Delta E = eU$ értékkel magasabb, mint a kisebb (1-es számú) térrészben, ezért az ionok megtalálási valószínűsége sűrűségének (vagy az azzal arányos részecskesűrűségének) aránya

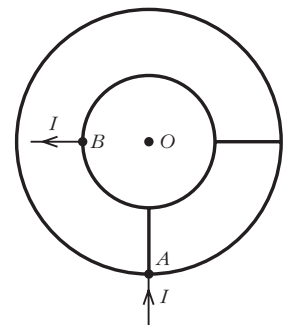
$$e^{-\frac{e U}{k T}}.$$

Ezzel a gondolatmenettel a megoldás – megfelelő indoklással – egyetlen sorban megkapható.

3. feladat

kitűzte: Cserti József

Egyenletes vastagságú ellenálláshuzalból rés $2r$ sugarú karikákat készítünk, és azokat egy síkban, koncentrikusan helyezük el. A karikákat két helyen, ugyanabból az ellenálláshuzalból készült, sugárirányú „küllőkkel” kötjük össze, a 13. ábrán látható módon. Az elrendezés A pontjánál (sugárirányban) I erősségű áramot vezetünk be, a B pontjából pedig (szintén sugárirányban) elvezetjük azt. Mekkora a mágneses indukcióvektor nagysága a karikák O középpontjában?



13. ábra

1. megoldás

A feladat megoldása során először a Kirchhoff-törvények segítségével meghatározzuk az egyes vezetékben folyó áramokat, majd kiszámoljuk az ezek által keltett mágneses teret a karikák közös O középpontjában.

Jelölje R az r hosszúságú vezetékdarab ellenállását! Így az egyes körívek, illetve a küllők ellenállása, az ábrán megadott jelöléseket használva, az alábbiak szerint adódik:

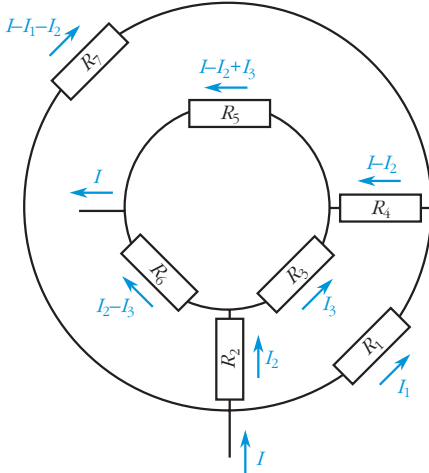
$$R_1 = \pi R,$$

$$R_2 = R_4 = R,$$

$$R_3 = R_6 = \frac{\pi}{2} R,$$

$$R_5 = \pi R,$$

$$R_7 = 3\pi R.$$



14. ábra

Az A pontban bevezetünk, a B pontban kivezetünk I áramot. Az egyes vezetékdarabokon folyó áramokat a 14. ábra alapján vesszük fel, ahol már kielégítettük a Kirchhoff-féle csomóponti törvényeket, azaz bármely csomópontba a bemenő és kimenő áramok összege megegyezik. Láthatjuk, hogy összesen három ismeretlen paraméterünk van: I_1 , I_2 és I_3 , amelyeket a huroktörvényekből határozhatunk meg. Írjuk fel a huroktörvényeket a külső karikára, a belső karikára, valamint a jobb alsó negyed körgyűrű határára:

$$R_1 I_1 - R_7 (I - I_1 - I_2) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \pi R [I_1 - 3(I - I_1 - I_2)] = 0,$$

$$R_3 I_3 + R_5 (I - I_2 + I_3) - R_6 (I_2 - I_3) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\pi R}{2} [I_3 + 2(I - I_2 + I_3) - (I_2 - I_3)] = 0,$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 - R_4 (I - I_2) - R_1 I_1 = 0.$$

Az ismeretlen paraméterek (I_1 , I_2 és I_3) egy háromismeretlenes, lineáris egyenletrendszer megoldásaként adódnak. Tényleg szükség van ezek kiszámolására? Próbáljuk megoldani a feladatot enélkül!

A sugárirányú bevezetések, kivezetések és küllők a Biot-Savart-törvény értelmében nem adnak járulékot a középpontban mért mágneses tér értékéhez. A mágneses indukció nagysága egy r sugarú I áramjárta körvezető középpontjában

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{r}.$$

Ha csak egy α középponti szöggel leírható körív járulékat tekintjük a középpontban, az

$$B = \frac{\mu_0 \alpha}{4\pi} \frac{I}{r}$$

alakban adódik. Ezek alapján már kiszámíthatjuk a külső, majd a belső karika által keltett mágneses teret. A külső karika esetén:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0}{8} \frac{I_1}{2r} - \frac{3\mu_0}{8} \frac{I - I_1 - I_2}{2r} = \\ &= \frac{\mu_0}{16r} [I_1 - 3(I - I_1 - I_2)] = 0, \end{aligned}$$

azaz a mágneses indukció értéke nulla a középpontban. A levezetés utolsó lépésében felhasználtuk az első huroktörvényből kapott egyenletet. A belső karika esetében:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0}{8} \frac{I_3}{r} + \frac{2\mu_0}{8} \frac{I - I_2 + I_3}{r} - \frac{\mu_0}{8} \frac{I_2 - I_3}{r} = \\ &= \frac{\mu_0}{8r} [I_3 + 2(I - I_2 + I_3) - (I_2 - I_3)] = 0, \end{aligned}$$

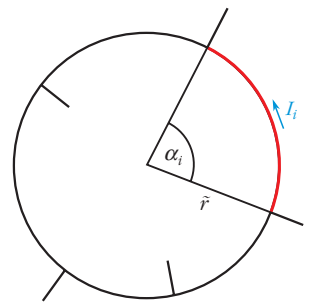
itt is nullának adódik az mágneses indukció nagysága. Az utolsó lépésben a második huroktörvényből kapott egyenletet használtuk fel. Összegezve, a teljes rendszer esetében is nulla a mágneses indukció-vektor a középpontban. Mi a mélyebb fizikai oka ennek az eredménynek? Nézzük át a probléma általánosított megoldását!

2. (általános) megoldás

A felrajzolt 13. ábra csak sugárirányú küllőkből és koncentrikus karikákból áll. A sugárirányú szakaszok által keltett mágneses tér a középpontban nulla. Tekintsünk egy $\hat{r}$ sugarú karikát (15. ábra), amelyet a befutó sugárirányú vezetékek körívekre bontanak. Az i -edik körív középponti szöge legyen α_i , hossza l_i , rajta átfolyó áram I_i ellenállása R_i , ezen ellenálláson eső feszültség U_i .

Az i -edik körív által keltett tér a középpontban

$$\begin{aligned} B_i &= \frac{\mu_0 \alpha_i}{4\pi} \frac{I_i}{\hat{r}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{l_i I_i}{\hat{r}^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{r R_i I_i}{R \hat{r}^2} = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{r U_i}{R \hat{r}^2} \end{aligned}$$



15. ábra

arányos a köríven eső feszültséggel. Összegezve az összes körív járulékát:

$$B = \sum_i B_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{r}{R \tilde{r}^2} \sum_i U_i = 0.$$

A huroktörvény alapján a feszültségesések összege a zárt karikára nulla, így a karika által keltett mágneses tér is nulla a középpontban. Az általános megoldás alapján akárhány koncentrikus kör és sugárirányú vezetékből összeállított elrendezés esetén nulla a mágneses tér a középpontban.

Eredményhirdetés

Az esemény végén került sor az eredményhirdetésre. A díjakat *Ormos Pál*, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöke adta át.

Mindhárom feladat helyes megoldásáért első díjat nyert *Kovács Balázs Csaba*, az ELTE fizikus hallgatója, aki a Hatvani Bajza József Gimnáziumban érettségizett *Maruzsiné Sevela Judit* tanítványaként.

Az első feladat helyes, valamint a második és harmadik feladat lényegében helyes megoldásáért második díjat nyert *Kincses Ábel*, a BME fizikus hallgatója, aki a Deák téri Evangélikus Gimnáziumban érettségizett *Horváth Gabriella* és *Szökcéné Mezősi Tímea* tanítványaként.

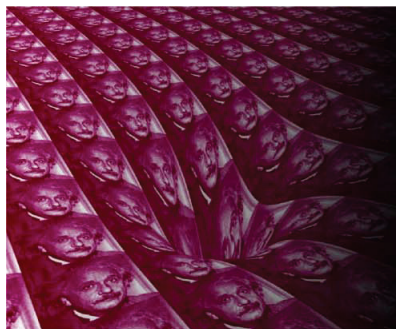
Az első és a harmadik feladat helyes megoldásáért harmadik díjat nyert *Gurzó József*, az ELTE fizikus hallgatója, aki a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnáziumban érettségizett *Nagy Piroska Mária* tanítványaként.

A harmadik feladat helyes, valamint az első vagy a második feladat lényegében helyes megoldásáért kiemelt dicséretet kapott *Bognár András Károly*, a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 12. osztályos tanulója, Nagy Piroska Mária tanítványa; *Csonka Illés*, a Ciszteri Rend Nagy Lajos Gimnáziuma 11. osztályos tanulója, *Jéhn János* és *Pálfalvi László* tanítványa; valamint *Hajós Balázs*, az ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium és Kollégium 12. osztályos tanulója, *Gyertyán Attila* tanítványa.

Az első vagy a harmadik feladat helyes, vagy a második feladat lényegében helyes megoldásáért dicséretet kapott *Bencz Benedek*, a Baár-Madas Református Gimnázium, Általános Iskola és Diákotthon 10. osztályos tanulója, *Horváth Norbert* tanítványa; *Blázsik Árpád*, az ELTE fizikus hallgatója, aki a Békásmegyeri Veres Péter Gimnáziumban érettségizett *Rakovszki András* és *Székely György* tanítványaként; *Gábrriel Tamás*, a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 12. osztályos tanulója, Nagy Piroska Mária tanítványa; *Halász Henrik Kristóf*, a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium 12. osztályos tanulója, *Gutai Árpád* és *Csányi Sándor* tanítványa; *Horváth Ákos Zsolt*, a BME fizikus hallgatója, aki a Kempelen Farkas Gimnáziumban érettségizett *Bakosné Novák Andrea* és *Horváth Eszter* tanítványaként; *Kobut Márk Balázs*, a Kecskeméti Katona József Gimnázium 12. osztályos tanulója, *Sáróné Jéga-Szabó Irén* tanítványa, *Köpeczei Csanád*, a Bonyhádi Petőfi Sándor Evangélikus Gimnázium és Kollégium 12. osztályos tanulója, *Wiandt Péter* tanítványa; *Molnár Barnabás*, a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 12. osztályos tanulója, Nagy Piroska Mária tanítványa; *Molnár-Szabó Vilmos*, a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 12. osztályos tanulója, Nagy Piroska Mária tanítványa; *Schäffer Donát*, a Pécsi Janus Pannonius Gimnázium 11. osztályos tanulója, *Lebőcz Mária* és *Lányi Veronika* tanítványa; valamint *Toronyi András*, az ELTE fizikus hallgatója, aki a Baár-Madas Református Gimnázium, Általános Iskola és Diákotthonban érettségizett *Horváth Norbert* tanítványaként.

Az első díjjal a verseny plakettjén kívül az Andersen Adótanácsadó Zrt. és a Nanorobot Vagyonkezelő Kft. adományából 80 ezer, a második díjjal 65 ezer, a harmadik díjjal 50 ezer, a kiemelt dicsérettel 30 ezer, a dicsérettel 15 ezer forint pénzjutalom jár. A díjazottak tanárai könyveket kaptak az Eötvös Loránd Fizikai Társulat ajándékaiként. Köszönjük az adományozók önzetlen támogatását.

Mind a díjazottaknak, mind tanáraiknak gratulálunk a sikeres versenyzéshez. Köszönetünket fejezzük ki az összes versenyzőnek, hogy részvételükkel, és tanáraiknak, hogy a felkészítéssel, tanításukkal emelték a verseny színvonalát.



A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!



XXVI. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY – 2. rész

Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technika Tanszék

A XXVI. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny döntőjét 2023. április 21–23. között Pakson az Energetikai Technikum és Kollégiumban (ESZI) tartották. A Verseny első napjának (április 21.) délutánján a versenyzők és kísérőtanáraik egy körülbelül 4 órás üzemlátogatáson vettek részt a Paksi Atomerőműben. Erre az eseményre Kovács Pál, a Paksi Atomerőmű Zrt. vezérigazgatói főtanácsosa kísérte el és vezette a látogatókat. A Verseny helyi szervezési feladatait az ESZI végezte; az ESZI kollégiuma adott otthont a versenyzőknek és kísérőtanáraiknak, ők biztosították az étkezéseket is. A Verseny megnyitása és az elméleti feladatok írása az ESZI nagy előadótermében zajlott, éppen úgy, mint a „Hogyan kellett?” feladatmegoldások ismertetője, és az ünnepélyes eredményhirdetés. Amíg a versenyzők az elméleti/számítási feladatokat oldották, a kísérő tanárok, a paksi tanárkollégák, valamint további érdeklődők részére Boros Ildikó, a BME NTI mesteroktatója *Atomenergia – múlt, jelen, jövő*, valamint Horváth Ákos, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Energiakutató Intézetének főigazgatója *A hazai atomenergia aktualitásai* címmel tartottak érdekes, továbbképző előadásokat. Kovács Pál az előadásokon és az azokat követő diszkusszió is részt vett.

Az előadásokról készült videofelvétel a Verseny honlapján, <https://szilardverseny.hu> – megtekinthető.

Az alábbiakban a második forduló (döntő) elméleti/számítási feladatait és a megoldásokat ismertetjük. A kísérleti forduló, valamint a számítógépes szimulációs feladat leírása a nyertesek listájával együtt a cikksorozat harmadik, utolsó részében kerül sorra.

Az első hét elméleti feladat közös volt mindkét korcsoportnak, a maradék három feladat pedig különböző. Az alábbi számozás szerint a 8., 9. és 10. csak a Junioroknak, a 11., 12. és 13. csak a Szenioroknak.

1. feladat kitűzte: a Versenybizottság

Kaszás Dezső, a Versenybizottság 2022-ben elhunyt tagjának emlékére, egyik korábbi feladata.

a) Becsüljük meg, mekkora sugárdózist jelent egy, a testünk 20 köbdeciméter térfogatú részét 20 keV energiájú fotonokkal átvilágító, 2 megapixel felbontású röntgenfelvétel, ha feltételezzük, hogy a röntgensugárzás fele nyelődik el bennünk, és egy pixel értékelhetőségéhez 10 darab foton szükséges? (Az emberi test sűrűségét közelítsük a vízévé.)

b) Mennyi idő alatt kapunk ekkora dózist környezetünk háttérsugárzásából, ha a háttérsugárzás átlagos dózisteljesítménye 100 nGy/h?

Megoldás

2 megapixelhez $2 \cdot 10^7$ foton kell, ezek összenergiája:

$$E = 20 \text{ (keV)} \cdot 2 \cdot 10^7 = 4 \cdot 10^{11} \text{ eV.}$$

A test ennek felét nyeli el, ami

$$E_t = 0,5 \cdot 4 \cdot 10^{11} \text{ (eV)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (J/eV)} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ J.}$$

Az emberi test sűrűségét a vízévé közelítve $1 \text{ dm}^3 \sim 1 \text{ kg}$, a kapott dózis értéke

$$D = \frac{E_t}{m} = \frac{3,2 \cdot 10^{-8} \text{ (J)}}{20 \text{ (kg)}} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ Gy} = 1,6 \text{ nGy.}$$

b) A környezeti háttérsugárzásból

$$t = \frac{1,6 \text{ (nGy)}}{100 \text{ (nGy/h)}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ h} = 57,6 \text{ s} \approx 1 \text{ perc}$$

alatt kapunk ekkora dózist.

2. feladat

kitűzte: Sükösd Csaba

Az atommagok méretének meghatározásához különböző részecskék szóródását használhatjuk. Használhatunk (a) alfa-részecskéket, (b) protonokat, (c) neutronokat és (d) elektronokat is.

– Hasonlítsuk össze ezek előnyeit és hátrányait! (Előállítás nehézsége, kölcsönhatásaik fajtája az atommaggal.)

– Mit jelenthet az, hogy az elektronokkal mért atommagméretek eltérnek a neutronokkal mért atommagméretektől?

Megoldás

a) Az alfa-részecskék előnye, hogy akár természetes radioaktív anyagokból is rendelkezésre állnak, bár ezek elég kis energiájúak, ezért az atommagok méretére csak felső korlátot tudnak adni (Rutherford-kísérlet). Ahhoz, hogy az atommagokat eléggé meg tudják közelíteni, az alfa-részecskéket nagyobb energiára kell fel-



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatással kapcsolatos program vezetője.

gyorsítani (például ciklotronokkal). Hátrányuk, hogy részt vesznek mind az elektromos, mind a nukleáris kölcsönhatásban. Kétszeres töltésük miatt nehezebben közelítik meg a pozitívan töltött atommagot, mint a protonok. Ugyanakkor a nagyobb tömeg miatt kisebb a de Broglie-hullámhosszuk, ezért azonos mozgási energia mellett jobb térbeli felbontás érhető el velük.

b) A protonok könnyen gyorsíthatók és fókuszálhatók. Hátrányuk, hogy mind az elektromos, mind a nukleáris kölcsönhatásban részt vesznek, ezért a szórás kép kiértékelése bonyolult, érzékenyek mind az atommag elektromos sugarára, mind pedig a nukleáris sugarára.

c) Neutronok nem vesznek részt az elektromos kölcsönhatásban, ezért a szóródásukkal az atommag nukleáris méretét lehet jól meghatározni. Hátrányuk, hogy technikailag nehéz monoenergiás, és nem szét-tartó nyalábot készíteni belőlük, ami a szórás kísérlet-hez kellene.

d) Elektronnyaláb könnyen előállítható és jól fókuszálható. Az elektronok nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban, ezért elektronszórással az atommag elektromos sugarát lehet jól meghatározni. Hátrányuk, hogy az elektron tömege kicsi, ezért jó térbeli felbontás (kis de Broglie-hullámhossz) eléréséhez nagy sebességre kell felgyorsítani az elektronokat.

– Az a tény, hogy az elektronokkal mért atommag-méreteket eltérnek a neutronokkal mért atommag-méretektől, arra utalhat, hogy az atommagokban a töltéeloszlás és a nukleoneloszlás nem feltétlenül azonos. Egy atommagnak lehet más az „elektromos sugara”, mint a „nukleáris sugara”. Például egyes atommagoknak lehet „neutronhéja”, vagy „neutronglóriája”. Ezt a neutronszerés érzékeli, de az elektronszerés nem.

3. feladat

kitűzte: Sükösd Csaba

Gerjesztett H_2 -molekula repül az x tengely irányába 1 eV mozgási energiával. Repülés közben a gerjesztett molekula szétesik két H-atomra. Az egyik atom az x tengelyre merőlegesen repül tovább 0,8 eV mozgási energiával.

a) Gondoljuk végig, és *vázlatosan* rajzoljuk le, milyen irányban repül tovább a másik atom!

b) Mennyi energia szabadult fel a gerjesztett molekula szétesése közben?

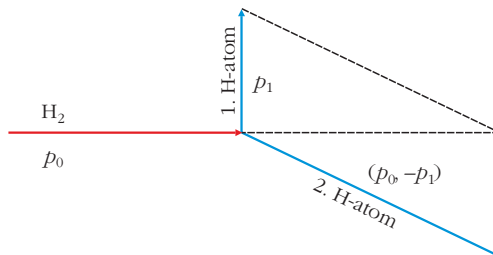
Megoldás

A lendület megmaradása miatt a másik atom lendületének lesz mind az x tengely irányú, mind pedig arra merőleges komponense.

Írjuk fel vektorkomponensekkel a H_2 -molekula lendületének komponenseit:

$$(p_x, p_y, p_z) = (p_0, 0, 0).$$

A bomlás után az egyik H-atom lendülete: $(0, p_1, 0)$, így a lendület megmaradása miatt a másik H-atom lendülete $(p_0, -p_1, 0)$ kell legyen (lásd az ábrát).



b) Jelöljük a H-atom tömegét m -mel. Ekkor a másik H-atom mozgási energiája:

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{p_2^2}{2m} = \frac{p_1^2 + p_0^2}{2m} = \frac{p_1^2}{2m} + \frac{p_0^2}{2m} = \\ &= E_1 + 2 \frac{p_0^2}{2(2m)} = E_1 + 2 E_0 = \\ &= 0,8 \text{ (eV)} + 2 \text{ (eV)} = 2,8 \text{ eV.} \end{aligned}$$

A két H-atom mozgási energiájának összege tehát

$$E_{\text{vég}} = E_1 + E_2 = 0,8 \text{ (eV)} + 2,8 \text{ (eV)} = 3,6 \text{ eV.}$$

A kezdeti mozgási energia 1 eV, ezért a felszabaduló gerjesztési energia:

$$E_{\text{felsz}} = E_{\text{vég}} - E_0 = 2,6 \text{ eV.}$$

4. feladat

kitűzte: Tarján Péter

Van de Graaff-gyorsítóval He^+ -ionokat gyorsítunk 3 MV feszültséggel. A nyaláb árama 10 mA. Mekkora nyomóerőt fejtenek ki a céltárgyra becsapódó és abban elnyelődő ionok?

Megoldás

Az erőt korábban a következőképpen definiáltuk:

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}.$$

Ennek értelmében meg kell határoznunk, hogy a céltárgyban elnyelődő ionok egységnyi idő alatt mekkora lendületváltozást szenvednek. Ehhez tudnunk kell egy ion lendületét és az időegység alatt becsapódó ionok számát. Egy He^+ -ion tömegét a hélium móltömegéből számíthatjuk, a hiányzó elektron tömegének elhanyagolásával. (Vagy használható az alfa-részecske tömege is, ekkor viszont a többlet-elektron tömegét kell elhanyagolnunk.) Az egyszeres töltés miatt a nyaláb részecskéinek energiája 3 MeV.

$$\begin{aligned} m_{He^+} &= \frac{M_{He}}{N_A} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right)}{6,022 \cdot 10^{23} \left(\frac{1}{\text{mol}} \right)} = \\ &= 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg.} \end{aligned}$$

Fejezzük ki a MeV-ben adott energiát joule-ban:

$$E = 3 \text{ MeV} = 3 \cdot 10^6 \text{ (eV)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{\text{J}}{\text{eV}} \right) = 4,806 \cdot 10^{-13} \text{ J}.$$

Így a becsapódó ionok sebessége:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4,806 \cdot 10^{-13} \text{ (J)}}{6,64 \cdot 10^{-27} \text{ (kg)}}} = 1,20 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

(Ez a fénysebesség csupán 4%-a, tehát nem okoz nagy hibát, hogy a klasszikus mozgásienergia-képletet használtuk.) Az ionok a teljes lendületüket átadják a céltárgynak, tehát a teljes kifejtett erőt megkapjuk a becsapódó ionok $\Delta N/\Delta t$ számából, és az egy ion által hordozott lendületből:

$$F = \frac{\Delta p_0}{\Delta t} = \frac{\Delta (N m v)}{\Delta t} = \frac{\Delta N}{\Delta t} m v.$$

Az időegység alatt becsapódó ionok számát az áramerősségből számíthatjuk ki, tudván, hogy minden He^+ -ion egyszeres elemi töltésű:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta (Ne)}{\Delta t} = e \frac{\Delta N}{\Delta t},$$

amiből

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{I}{e} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ (A)}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ (C)}} = 6,242 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s}}.$$

Így a céltárgyra kifejtett erő

$$\begin{aligned} F &= \frac{\Delta N}{\Delta t} m v = \\ &= 6,242 \cdot 10^{13} \left(\frac{1}{\text{s}} \right) \cdot 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ (kg)} \cdot 1,20 \cdot 10^7 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \approx \\ &\approx 4,97 \cdot 10^{-6} \text{ N}. \end{aligned}$$

Alternatív megoldás

A részeredmények kiszámítása nélkül, tisztán paraméteresen is megoldható a feladat. Az erő kifejezése így:

$$F = \frac{I}{e} \sqrt{\frac{2ME}{N_A}} \approx 4,97 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

5. feladat

kitűzte: Szűcs József

A gyógyászatban nyomjelzőként használatos ^{24}Na a nátrium egy β -sugárzó izotópjá, felezési ideje 15 óra. A Na-nak ezt a mesterséges izotópját a stabil ^{23}Na atomokból neutronbesugárzással állítják elő. A radioaktív anyag tablettá formában kerül kiszerezésre, egy-

egy tablettá az induláskor 0,5 mg tömegű sugárzó ^{24}Na -et tartalmaz.

Az induláskor 10 TBq aktivitású készítmény szállítása a megrendelőhöz 3 órát vett igénybe. Közvetlenül a megérkezéskor újramérték a csomag aktivitását, amely 7,021 TBq volt. Ez a vártnál kisebbnek bizonyult, így a készítmény elszóródására gyanakodtak a felhasználók.

a) Hány tablettát tartalmazott a becsomagolt készítmény?

b) Hány tablettá vesztetett el a szállítás során?

Megoldás

a) A teljes készlet tömegének kiszámítása a bomlási törvényből:

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N,$$

ebből

$$N = \frac{A T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{10^{13} \left(\frac{1}{\text{s}} \right) \cdot 5,4 \cdot 10^4 \text{ (s)}}{\ln 2} = 7,79 \cdot 10^{17},$$

amiből a ^{24}Na izotóp kezdeti össztömege:

$$\begin{aligned} m &= \frac{N}{N_A} M = \frac{7,79 \cdot 10^{17}}{6,022 \cdot 10^{23} \left(\frac{1}{\text{mol}} \right)} \cdot 24 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) = \\ &= 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ g} = 31 \text{ } \mu\text{g}. \end{aligned}$$

Ez

$$\frac{31 \text{ (}\mu\text{g)}}{0,5 \text{ (}\mu\text{g)}} = 62 \text{ tablettának}$$

felel meg induláskor a csomagban.

b) A teljes csomag (62 tablettá) aktivitásának a 3 órás utazás után a következőnek kellett volna lennie:

$$A_t = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 10 \text{ (TBq)} \cdot 2^{-\frac{3 \text{ (h)}}{15 \text{ (h)}}} \approx 8,706 \text{ TBq}.$$

A mért aktivitás és a várt aktivitás aránya megegyezik a megmaradt m' tömeg és a kezdeti m tömeg arányával:

$$\frac{m'}{m} = \frac{7,021 \text{ (TBq)}}{8,706 \text{ (TBq)}} \approx 0,8065.$$

A maradék tabletták száma $0,8065 \cdot 62 \approx 50$, azaz a 62 tablettából 12 tablettá szóródhatott ki.

6. feladat

kitűzte: Sükösd Csaba

Az 1987. február 23-án észlelt SN1987A szupernóva-robbanás 168 000 fényévre történt a Földtől. A robbanáskor a becslések szerint 10^{58} neutrínó is keletkezett. A Super-Kamiokande japán neutrínódetektor a szu-

pernáva neutrínóvillanásából 12 neutrínót detektált. Modellként tegyük fel, hogy a neutroncsillag egy kizárólag $^{56}_{26}\text{Fe}$ atomokból álló csillagmagból keletkezett.

a) A Földet elérő szupernóva-neutrínók hányad részét detektálta a Super-Kamiokande?

b) Adjunk becslést arra, hogy mekkora lehet a keletkezett neutroncsillag tömege! (A nukleáris kötési energiát hanyagoljuk el!)

Megoldás

A feladat szerint 168 000 fényév távolságban $N_V = 10^{58}$ neutrínót bocsátott ki a szupernóva. Feltehetjük, hogy ezek kibocsátása gömbszimmetrikusan (izotróp) módon történt. Ezért, mire a neutrínók elérték a Földet, egyenletesen oszlottak el egy 168 000 fényév sugarú gömb felületén. Mivel

$$1 \text{ fényév} = 365,24 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ (s)} \cdot 3 \cdot 10^5 \left(\frac{\text{km}}{\text{s}} \right) = \\ = 9,467 \cdot 10^{12} \text{ km,}$$

ezért 168 000 fényév = $1,59 \cdot 10^{18} \text{ km}$.

Egy ilyen sugarú gömb felszíne:

$$A_{\text{SN-F}} = 4 \pi \cdot [1,59 \cdot 10^{18} \text{ (km)}]^2 = 3,18 \cdot 10^{37} \text{ km}^2.$$

A Föld neutrínófluxusra merőleges vetülete:

$$A_F^\perp = \pi r_F^2 = \pi \cdot [6371 \text{ (km)}]^2 = 1,28 \cdot 10^8 \text{ km}^2,$$

ezért a Földet a szupernóva-robbanásból elérő neutrínók száma

$$N_F = N_V \frac{A_F^\perp}{A_{\text{SN-F}}} = 10^{58} \cdot \frac{1,28 \cdot 10^8 \text{ (km}^2\text{)}}{3,18 \cdot 10^{37} \text{ (km}^2\text{)}} = 4,01 \cdot 10^{28}.$$

Ezekből a Super-Kamiokande 12 neutrínót detektált, így a Földet elérő neutrínók

$$\frac{12}{4,01 \cdot 10^{28}} \approx 3 \cdot 10^{-28}\text{-ad}$$

részét detektálta.

b) A modellünk alapján, amikor a neutroncsillag létrejön, akkor a következőhöz hasonló folyamatok következnek be: $p + e \rightarrow n + \nu$, azaz a protonok neutronokká alakulnak.

Természetesen a fenti folyamat „szabad” protonok esetén történne, itt pedig már atommagokban kötött protonokba „préselődnek bele” az elektronok. Egyetlen ilyen átalakuláskor egyetlen neutrínó keletkezik. Ha tehát 10^{58} neutrínó keletkezett, az azt jelenti, hogy ennyi proton alakult át neutronná. Ebből becslést adhatunk az anyagmennyiség tömegére. Természetesen figyelembe kell venni, hogy a meglévő atommagokban már voltak neutronok is. Ha feltételezzük, hogy a legerősebben kötött $^{56}_{26}\text{Fe}$ -atomokból alakult át

az anyag, akkor kezdetben az összes nukleon és a protonok számának aránya: $56/26 = 2,154$. Ebből azonnal becslést kapunk az összeroppant anyag kezdeti tömegére:

$$M = \frac{56}{26} \cdot 10^{58} \cdot m_n = 2,154 \cdot 10^{58} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = \\ = 3,6 \cdot 10^{31} \text{ kg,}$$

ami körülbelül 18-szor akkora, mint a mi Napunk tömege.

Megjegyzés: ha ez a tömeg teljes egészében együtt maradt volna, akkor nem is neutroncsillaggá, hanem fekete lyukká alakult volna a csillag. A robbanás azonban az átalakult anyag egy jelentős részét szét szórta a világűrbe. A szétszórta, nagy neutrontartalmú anyagdarabkákból radioaktív bomlások révén keletkeztek a vasnál nehezebb elemek – például az urán is. A mi Földünk anyaga is egy ilyen szupernóva-robbanásból keletkezett 4,5 milliárd évvel ezelőtt.

7. feladat kitűzte: Szűcs József, Papp Gergely

Egy kísérlet során egy vákuum-fotocella katódját 400 nm-es, monokromatikus, 5 mW teljesítményű lézerfényvel világították meg. A felvett $I(U)$ fotoáram-feszültség karakterisztika jellemző értékei: zárófeszültség $U_z = -1,15 \text{ V}$, telítési (maximális) fotoáram $I_t = 32 \mu\text{A}$. Ezt követően 600 nm-es, ugyanolyan teljesítményű lézerfényvel ismételték meg a mérést. A 600 nm-en felvett $I(U)$ karakterisztika adatai azonban elvesztek.

a) Milyen anyagból készült a fotókatód? Használjuk a függvénytáblázatot!

b) Mekkora lehetett a 600 nm-es esetben a zárófeszültség?

c) Mekkora lehetett a 600 nm-es esetben a maximális fotoáram-erősség? (Tegyük fel, hogy a 600 nm-es fotonok ugyanolyan valószínűséggel váltottak ki fotoelektront, mint a 400 nm-es fotonok.)

Megoldás

A kilépési munkát a fotoeffektus egyenletéből kapjuk:

$$W_{\text{ki}} = \frac{hc}{\lambda} - U_z e \approx \\ \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ (Js)} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ (m)}} - \\ - 1,15 \text{ (V)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (C)} = \\ = 4,9725 \cdot 10^{-19} \text{ (J)} - 1,84 \cdot 10^{-19} \text{ (J)} = \\ = 3,1325 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 1,96 \text{ eV.}$$

A függvénytáblázat alapján ez a cézium kilépési munkájával egyezik meg.

b) A kilépési munka ismeretében kiszámíthatjuk a második karakterisztika zárófeszültségét:

$$\begin{aligned} e U_{z,600} &= \frac{hc}{\lambda_{600}} - W_{ki} \approx \\ &\approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ (Js)} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ (m)}} - \\ &- 3,1325 \cdot 10^{-19} \text{ (J)} = \\ &= 3,315 \cdot 10^{-19} \text{ (J)} - 3,1325 \cdot 10^{-19} \text{ (J)} = \\ &= 0,1825 \cdot 10^{-19} \text{ (J)} = 0,114 \text{ eV} \\ &\Downarrow \\ U_{z,600} &\approx -0,114 \text{ V.} \end{aligned}$$

c) Mindkét esetben azonos a megvilágító fény teljesítménye, ezért a 600 nm-es fénynél a katódra $600/400 = 1,5$ -szer több foton érkezik másodpercenként, így 1,5-szer annyi elektron lép ki a katódból időegység alatt. Ezért a telítési áramerősség is 1,5-szerese lesz, vagyis $I_{t,600} = 48 \mu\text{A}$.

Megjegyzés: a valóságban a fotonok által keltett fotoelektron kilépésének valószínűsége függ a hullámhossztól, ettől itt az egyszerűség kedvéért eltekintettünk.

8. feladat (junioroknak) kitűzte: *Mester András*

Egy proton de Broglie-hullámhossza kétszerese egy alfa-részecske de Broglie-hullámhosszának. Hogyan aránylik egymáshoz a részecskék (a) lendülete és (b) mozgási energiája? (Az egyszerűbb számítás érdekében feltehetjük, hogy $m_\alpha \approx 4 m_p$.)

Megoldás

a) A lendületek aránya:

$$\frac{p_\alpha}{p_p} = \frac{h/p_p}{h/p_\alpha} = \frac{\lambda_p}{\lambda_\alpha} = 2.$$

b) Használjuk ki, hogy

$$E_{\text{mozg}} = \frac{p^2}{2m}.$$

(Mivel ez kizárólag Junioroknak szánt feladat, a nem-relativisztikus energiaképlet használata elfogadható.) Így a mozgási energiák aránya:

$$\frac{E_\alpha}{E_p} = \left(\frac{p_\alpha}{p_p} \right)^2 \frac{2m_p}{2m_\alpha} = 2^2 \cdot \frac{2}{8} = 1.$$

9. feladat (junioroknak) kitűzte: *Sükösd Csaba*

Egy uránatom hasadásakor felszabaduló energia 200 MeV. Egy deutérium (^2_1H) és egy trícium (^3_1H) atom-

mag fúziójakor felszabaduló energia 17,6 MeV. Tekintsünk egy 50/50 atomszázalékos arányú, normál állapotban lévő deutérium-trícium gázkeveréket. Használjuk össze

a) 1 g ^{235}U hasadásakor és 1 g gázkeverék fúziójakor felszabaduló energiát!

b) 1 mol ^{235}U hasadásakor és 1 mol gázkeverék fúziójakor felszabaduló energiát!

Megoldás

a) 1 g ^{235}U urán mennyisége $1/235$ mol. Az 1:1 arányú deutérium-trícium keverék együttes móltömege $2+3 = 5$ (gondoljunk egy olyan molekula móltömegére, amelynek egyik tagja deutérium, a másik tagja pedig trícium). Ezért 1 g ilyen anyagban $1/5$ mólnyi deuterion- és $1/5$ mólnyi trícium-atommag van. Ezért az 1 g urán hasadásakor felszabaduló energia:

$$\frac{200}{235} N_A \text{ (MeV)},$$

az 1 g deutérium-trícium keverék fúziójakor felszabaduló energia:

$$\frac{17,6}{5} N_A \text{ (MeV)}.$$

A kettő aránya tehát:

$$\frac{200}{235} \cdot \frac{5}{17,6} = 0,2418.$$

A tömeg alapján összehasonlítva, a fúzió során körülbelül négyszer annyi energia szabadul fel, mint a maghasadásakor.

b) A mólnyi mennyiségek számításakor azt kell figyelembe venni, hogy mólnyi mennyiségű gázkeverék úgy gondolható, mintha Avogadro-számnyi olyan molekula lenne, amelynek egyik tagja deutérium, a másik tagja trícium. Tehát mólnyi mennyiségű gázkeverék fúziójakor Avogadro-számnyi fúziós reakció történik, ezért a felszabaduló energia $17,6 \text{ (MeV)} \cdot N_A$. A mólnyi mennyiségek esetén tehát az arány:

$$\frac{200}{17,62} = 11,36$$

az urán javára.

10. feladat (junioroknak) kitűzte: *Halász Máté*

Egy hagyományos, könnyűvízes reaktorban az üzemanyag átlagos kiégése 50 MW-nap/kg U, azaz egy kilogramm uránból átlagosan 50 MW-nap hő szabadítanak fel a zónából való eltávolítása előtt. Hogyan aránylik a fenti érték a természetes uránból elméletileg maximálisan kinyerhető energiához, vagyis ha az összes uránatommagot (^{235}U és ^{238}U is) elhasítanánk? Számítsunk hasadásonként (mindkét izotópra vonatkozóan) átlagosan 200 MeV felszabaduló energiával.

Megoldás

Először váltsuk át az 1 kg uránból átlagosan felszabadított hő J mértékegységbe:

$$Q_{\text{atl}} = 50 \text{ (MW)} \cdot 86\,400 \text{ (s)} = 4,32 \text{ TJ}.$$

Az 1 kg uránban található uránatommagok száma közelítőleg:

$$N \approx \frac{m}{M_{238\text{U}}} N_A \approx \frac{1000 \text{ (g)}}{238 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \approx 2,5 \cdot 10^{24}.$$

Az összes uránatommag elhasításával elméletileg

$$\begin{aligned} Q_{\text{elm}} &= N \varepsilon = \\ &= 2,53 \cdot 10^{24} \cdot 200 \cdot 10^6 \text{ (eV)} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \left(\frac{\text{J}}{\text{eV}} \right) \approx \\ &\approx 81,06 \text{ TJ} \end{aligned}$$

hő szabadulna fel. A két érték aránya:

$$\frac{Q_{\text{atl}}}{Q_{\text{elm}}} = \frac{4,32 \text{ (TJ)}}{81,06 \text{ (TJ)}} \approx 0,053.$$

Vagyis az urán hasznosítási hatásfoka a nyitott üzemanyagciklusban alig 5% (nem számolva az atomerőművek termikus hatásfokával, amelyet figyelembe véve ez a hatásfok tovább csökken).

Megjegyzés: az ^{238}U gyors neutronokkal hasítható, vagy neutronbesugárzás hatására olyan atommaggá alakulhat, ami jól hasad (például ^{239}Pu). A 100%-os hasznosítás azonban még zárt üzemanyagciklusban sem érhető el. Az aktinidák kiégett üzemanyagból történő kinyerése során kismértékű (0,1% – 1%), gazdaságosan nem visszanyerhető veszteségek lépnek fel, ami végtelen sok visszaforgatás esetén is megakadályozza, hogy az összes kezdeti atommagot elhasítsuk.

11. feladat (senioroknak) kitűzte: Tarján Péter

A röntgensőben nagy sebességre felgyorsított elektronok anódba csapódásakor és hirtelen lelassulásakor keletkezik a röntgensugárzás egyik fajtája, a fékezési sugárzás. Egy röntgenső paraméterei a következők: gyorsító feszültség 150 kV, a maximális csőáram folyamatos üzemben 3 mA. A röntgensugarak keletkezésének valószínűsége 1%. A keletkezett röntgenfotonok a cső ablakán keresztül kilépnek.

a) Mekkora sebességgel csapódnak be az elektronok az anódba?

b) Mekkora teljesítménnyel kell hűteni az anódot, hogy ne melegedjen?

c) Milyen hullámhosszú röntgensugarak keletkezhetnek a csőben?

Megoldás

A röntgensőben az elektronok 150 keV mozgási energiára tesznek szert. Ez összemérhető az elektron 511 keV nyugalmi energiájával, így a sebességet relativisztikusan kell számítani:

$$\begin{aligned} E_m &= E - E_0 = m c^2 - m_0 c^2 = \\ &= m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right). \end{aligned}$$

Innen a sebesség:

$$\begin{aligned} v &= c \sqrt{1 - \left(\frac{E_m}{m_0 c^2} + 1 \right)^{-2}} = 0,634 c = \\ &= 1,902 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

b) A cső teljes teljesítménye

$$P = 150 \cdot 10^3 \text{ (V)} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ (A)} = 450 \text{ W}.$$

Ennek 1%-a röntgenfotonok formájában eltávozik, tehát 99%-a melegíti az anódot. Ahhoz, hogy a cső ne melegedjen,

$$P_h = 450 \text{ (W)} \cdot 0,99 = 445,5 \text{ W}$$

teljesítménnyel kell hűteni az anódot.

Megjegyzés: a gyakorlatban – az általában szakaszos működés miatt – a cső anódjának nem feltétlenül van szüksége folyamatos, aktív hűtésre.

c) Mivel a röntgenfotonok a felgyorsított, majd hirtelen lefékeződő elektronok mozgási energiájából keletkeznek, ezért

$$h \frac{c}{\lambda} \leq e U \Rightarrow \lambda \geq \frac{h c}{e U} = 8,266 \cdot 10^{-12} \text{ m},$$

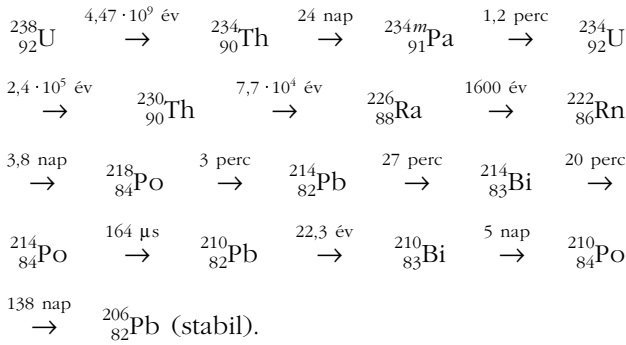
tehát az energiamegmaradás miatt egy küszöbhullámhossznál nagyobb hullámhosszú röntgensugarak keletkezhetnek a csőben. (Egyenlőtlenség azért van, mert előfordulhat, hogy egy elektron mozgási energiájának csak egy része kelt röntgenfotont, míg a többi az anódot melegíti).

12. feladat (senioroknak) kitűzte: Radnóti Katalin

Egy laboratóriumban 1 g vegytiszta rádiumot állítottak elő, és hermetikusan elzárták azt egy edényben. Becsüljük meg, hogy e rádiumdarab bomlásának következtében 1 év alatt mekkora térfogatú, 20 °C-os, 10^5 Pa nyomású héliumgáz keletkezik!

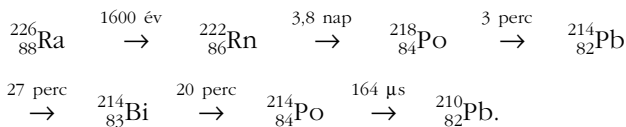
A ^{226}Ra felezési ideje körülbelül 1600 év. Vegyük figyelembe, hogy egyes leányelemek felezési ideje rövid. A rádium aktivitását az 1 év alatt állandónak vehetjük.

Az egyszerűsített urán–rádium bomlási sor:



Megoldás

A feladat szövege szerint tiszta rádiumból indulunk, ezért nincs szó a bomlási sorban már korábban beállt szekuláris egyensúlyról. Viszont a kellően rövid felezési idejű izotópok az 1 év szempontjából egyből tovább bomlanak, ezért ezekből az α -bomló bomlásokat is figyelembe kell venni. Mivel a feladat 1 év időtartamra kérdez rá, ezért a 22 éves felezési idejű bomlást és az utána következő lépéseket elhanyagolhatjuk (csak körülbelül 3% bomlik el 1 év alatt). A számunkra érdekes bomlások tehát a ${}^{226}\text{Ra}$ és ${}^{210}\text{Pb}$ közöttiek:



A bomlások közül csak az alfa-bomlás tudja a tömegszámot megváltoztatni. A teljes tömegszámváltozás $226 - 210 = 16$, tehát 4 alfa-bomlást kell figyelembe venni.

A rádium móltömege, $M = 226$ g, ezért 1 g rádiumban $2,65 \cdot 10^{21}$ atom van. Aktivitása

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = \frac{\ln 2}{1600 \cdot 365,24 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ (s)}} \approx \\
 &\approx 3,64 \cdot 10^{10} \text{ Bq}.
 \end{aligned}$$

Megjegyzés: történelmileg 1 g rádiumból ered az aktivitás curie-egysége: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Nem követünk el nagy hibát, ha az egyszerűbb számítás kedvéért – ahogy a feladat szövege is írta – ezt állandónak vesszük egy éven keresztül. Ekkor az elbomlott atomok számát megkapjuk, ha az aktivitást egy évvel megszorozzuk:

$$N_{\text{bom}} \approx A t \approx 1,149 \cdot 10^{18}.$$

Megjegyzés: ha nem használnánk ezt az egyszerűsítést, akkor

$$N_{\text{bom}} = N \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right)$$

alapján számolhatnánk.

Innen az egy év alatt keletkező héliumatomok száma:

$$N_{\text{He}} = 4 N_{\text{bom}} \approx 4,59 \cdot 10^{18}.$$

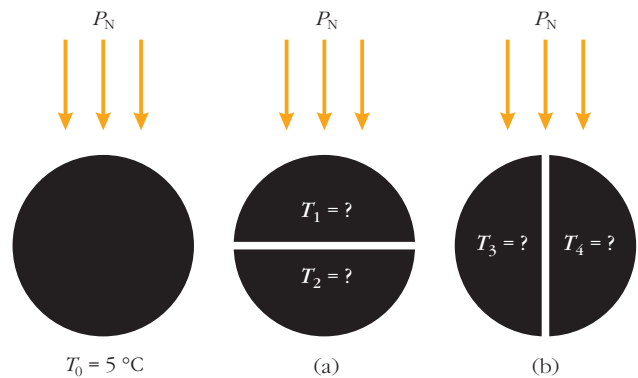
A feladatban megadott körülmények között a $pV = NkT$ gáztörvényből ennek térfogata:

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{NkT}{p} = \frac{4,59 \cdot 10^{18} \cdot 293 \text{ (K)} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ (J/K)}}{10^5 \text{ (Pa)}} \approx \\
 &\approx 1,86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \approx 0,19 \text{ cm}^3.
 \end{aligned}$$

Megjegyzés: a megoldás során feltételeztük, hogy az egész év alatt szekuláris egyensúly volt, bár a szekuláris egyensúly beállításához is idő kell. A kérdéses bomlások közül a leghosszabb felezési idő 3,8 nap, azaz körülbelül 11 nap alatt már jól megközelítjük a szekuláris egyensúlyt.

13. feladat (senioroknak) kitűzte: Szűcs József

A világűrben Föld körüli pályán keringve egy R sugarú, homogén, fekete gömb napsugárzás hatására egyensúlyi állapotban $T_0 = 5^\circ\text{C}$ -ra melegszik fel.



a) Gondolatban vágjuk ketté a gömböt a napsugárzásra merőleges síkkal, és a két félgömböt kissé távolítsuk el egymástól úgy, hogy a rés szélessége $d \ll R$ legyen. Mekkora lenne ekkor az egyensúlyi hőmérséklete az előlő (T_1) és a hátsó (T_2) gömbnek?

b) Mekkora lennének a félgömbök (T_3) és (T_4) hőmérsékletei akkor, ha a metszési sík párhuzamos a beeső napsugarakkal?

Megoldás

a) Írjuk fel az egyensúlyi egyenletet az egészben lévő fekete gömbre ($T_0 = 278 \text{ K}$):

$$\underbrace{P_N R^2 \pi}_{\text{beeső nap}} = \underbrace{\sigma T_0^4 4 R^2 \pi}_{\text{hőmérsékleti sugárzás}},$$

amiből

$$P_N = 4 \sigma T_0^4. \quad (i)$$

Ezután írjuk fel az egyensúlyi egyenleteket az első (1) és hátsó (2) félgömbökre, amikor az elválasztó sík merőleges a beeső napsugarakra:

$$\underbrace{P_N R^2 \pi}_{\text{beeső nap}} + \underbrace{\sigma T_2^4 R^2 \pi}_{\text{hátsó félgömb fűtése}} = \underbrace{\sigma T_1^4 3 R^2 \pi}_{\text{első félgömb sugárzása}}$$

↓

$$P_N = \sigma (3 T_1^4 - T_2^4), \quad (\text{ii})$$

valamint

$$\underbrace{\sigma T_1^4 R^2 \pi}_{\text{első félgömb fűtése}} = \underbrace{\sigma T_2^4 3 R^2 \pi}_{\text{hátsó félgömb sugárzása}}$$

↓

$$T_1^4 = 3 T_2^4. \quad (\text{iii})$$

A három – i), ii) és iii) – egyenlet kombinálásából kapjuk, hogy

$$4 T_0^4 + \frac{T_1^4}{3} = 3 T_1^4$$

↓

$$T_1 = T_0 \sqrt[4]{\frac{3}{2}} \approx 307,65 \text{ K} \approx 34,65 \text{ } ^\circ\text{C},$$

valamint

$$T_2 = T_1 \sqrt[4]{\frac{1}{3}} \approx 233,76 \text{ K} \approx -39,23 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

b) Ebben az esetben a két félgömb energiamérlege megegyezik, mivel mindegyik $R^2 \pi/2$ nagyságú

hatásos felületen kap energiát a napsugárzásból, és $3 R^2 \pi$ felületen sugároznak. Egymással $R^2 \pi$ felületen cserélnek energiát, amelynek energiamérlege zérus. Így mindkét félgömbből effektíven $2 R^2 \pi$ felületen távozik energia és $R^2 \pi/2$ felületen érkezik. A bejövő és a kimenő energiaáram keresztmetszetaránya most is $1/4$, akárcsak az egész gömbnél.

Így a félgömbök hőmérséklete nem változik: megegyezik az egész gömb egyensúlyi hőmérsékletével, azaz $T_3 = T_4 = T_0 = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Értékelés

Minden feladatra maximálisan 5 pontot lehetett kapni. Az elérhető 50 pontból a Szenior kategóriások legjobbjának (*Biszak Ákos*, Energetikai Technikum és Kollégium, Paks) 39 pontot sikerült szereznie, a junioroknál pedig 41 pontot (*Jávor Bence*, Városmajori Gimnázium, Budapest). A Szenioroknál a leggyengébben a 13. feladat sikerült (a zsűri is ezt a feladatot tartotta a legnehezebbnek); erre a maximális pontszám (5) helyett az átlagosan elért eredmény 2,35 volt. A Junioroknál a hetedik (átlagpontszám: 2,30), valamint a harmadik és a hatodik feladat (2,40) sikerült a leggyengébben. A Szenioroknál minden feladatra érkezett tökéletes (5 pontos) megoldás. A Junioroknál csak a 9. feladatra nem érkeztek 5 pontos megoldások, de még erre a feladatra is érték el 4 pontot Junior tanulók. A legjobb átlagos pontszámot a 11. feladatra érték el a Szenior kategóriás versenyzők (3,45), a Junior tanulók legjobb átlaga (4,40) a nyolcadik – kifejezetten Junior versenyzők számára készült – feladatnál volt.

(Folytatjuk)

64. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató

A 2023. évi ankétot október 20-tól 23-ig Szombathelyen, az ELTE Savaria Műszaki Intézetében Energia földön, égen témában rendezzük meg. Részletek a www.elft.hu társulati és a www.fizikaanket.hu honlapokon.

A rendezvény 30 órás akkreditált pedagógus-továbbképzésnek minősül.

Energiagazdálkodás, elektromos és önvezető autók, úrkutatás, meg-megújuló tankönyvek alkalmazása. Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. támogatásával.

ELFT Oktatási Szakosztályának vezetője



PATKÓS ANDRÁS: CÉLTUDATOS BOLYONGÁSAIM

– TÖRTÉNETEK A FIZIKA LABIRINTUSAIBÓL

Typotex, ISBN 978 963 493 241 3

Mint *Patkós András* korábbi írásaira, erre a kötetre is jellemző, hogy átüt rajtuk a szerző fizika iránti lelkesedése, sőt, szenvedélyes szeretete. Ez a könyv azonban még többet kínál ennél, mert sok önéletrajzi elemet mutat, tehát még inkább személyes, és épp ezért rendkívül érdekes. Magyarázkodás helyett jobb a tartalomjegyzék főbb sorait idézni:

I. rész: Úti kalandjaim a fizikával

- Bécsben és Balatonfüreden Marx Györggyel: szabad levegőt szippantunk

- Koppenhága: magamra talállok a Niels Bohr Intézetben

- A szovjet/országi kapcsolat: Tbiliszitől Csernogolovkáig

- Budapest: vendégek és hazajárók

II. rész: Kalandok túl a fizikán

- Kvantumutazások, avagy létezik-e szabad akarat?

- A szaktanári kiválóság útjait keresve

- Fizikusok bolyongása a történelemben

A könyv – a tudományos írásművek bevett szokását követve

– tartalomjegyzékkel indul, ami azonban a címszavakon kívül az egyes fejezetek 10-15 soros kivonatát is tartalmazza. Ezt rövid ajánlás („Útravaló”) követi, majd elindul a könyv érdemi része.

Az első, sok életrajzi adatot tartalmazó rész több szempontból is nagyon érdekes, letehetetlen olvasmány. Az ELTE-n végzett fizikus, fizikatanár olvasó némi nosztalgiával ismerhet tanárait, gyakorlatvezetőire a név szerint említett kollégákban. Némelyikük neve monogrammos rövidítéssel szerepel, ezt mindig izgalmas megfejteni. Azután, átsugárzik az íráson az a mély tisztelet, amellyel *Marx György* felé fordul a szerző, és ami néhai Marx professzort a jelen sorok írója szerint is megilleti.

Izgalmas olvasni a sok világhírű fizikus nevét, akik Patkós András fiatal korában – többnyire Marx György kezdeményezésére nyomán – Magyarországon jártak, vagy akikkel Patkós külföldi útjai során találkozott, és

akiknek a nevét a későbbben született kollégák a tankönyvekből ismerhetik (*Richard Feynman* például).

A könyv értékét tovább emelik a gazdag illusztrációk: fényképek és más, írásos dokumentumok sokasága. Példaként egy konferenciát emelnék ki: az 59. oldalon látható ülő csoportképet, amelyen *Bohr, Heisenberg, Pauli, Gamov, Landau, Kramers* és *Teller* ismerős arca látható Koppenhágában.

Koppenhága más szempontból is fontos a könyvben: Patkós András fiatal korában megilletődve lépett be a Niels Bohr Intézet kapuján, ahová, nevet szerezvén magának, később is többször kapott meghívást.

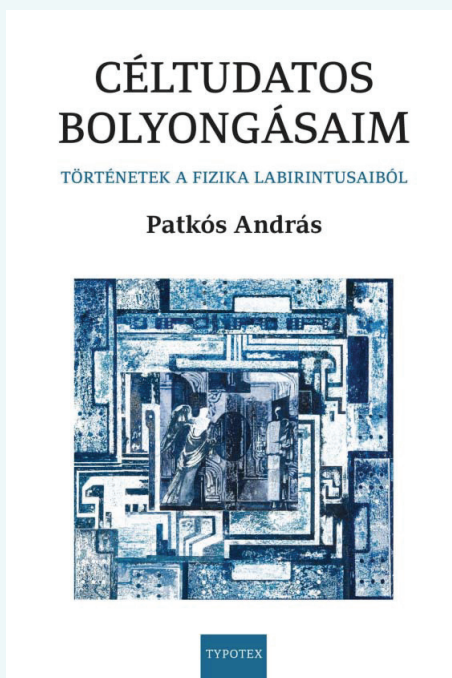
A szovjet/országi kapcsolatot külön fejezet ismerteti. Ebben első kézből értesülünk az ottani fizikai kutatás hallomásból ismert nagyságáról, valamint a szovjet rendszer visszasságairól. És, sajnos, a rendszer szétbomlása utáni kálváriáról is, amit sok kiváló fizikus külföldre menekülése fémjelez...

De Patkós András írása nem egyszerű, szokásos tudománytörténeti dokumentum. Személyes véleményén, szemléletén túl, a második részben a szerző több meglepetéssel szolgál. Mert ki ne lepődne meg azon, hogy *Hamvas Béla* (akit misztikus írásai miatt lehet szeretni vagy nem szeretni) *Karnevál* című kötetének egyik fejezetének kvantummechanikai vonatkozásai jelenítődnek meg, meggyőző erővel... Azután, a szerző sokunk által közvetlen közlő is megtapasztalt tudáspolitikai és tantárgy-pedagógiai erőfeszítései kerülnek említésre.

Summa summarum, a könyv lebilincselő olvasmány. Jó szívvel ajánlom mindenkinek, akit érdekel a fizika, a fizikatörténet, és ezek társadalmi vonatkozásai. Bárcsak több ilyen fajsúlyú és igényességű írás születne a továbbiakban is!

Surján Péter

ELTE TTK Elméleti Kémia Laboratórium





Országos Szilárd Leó Fizikaverseny



A XXVII. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny meghirdetése

Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny célja a fizika – és ezen belül is a nukleáris és a modern fizika – iránt érdeklődő tehetséges tanulók felfedezése.

A Magyar Nukleáris Társaság, a paksi Energetikai Technikum és Kollégium, a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézete meghirdeti a XXVII. Országos Szilárd Leó Fizikaversenyt.

Nevezhetnek a határon innen és túl magyar nyelven fizikát tanuló, középfokú oktatásban résztvevő diákok iskolái a **Jelentkezési Lap** kitöltésével és e-mailen történő elküldésével a **sukosd@reak.bme.hu** címre. A versenyen történő részvétel részletes feltételei megtalálhatók a Verseny honlapján:

<https://szilardverseny.hu/orszagos-verseny/verseny-meghirdetese>. Jelentkezési lap letölthető:

<https://sukjaro.hu/SzilardVerseny/JelentkezesiLap.xlsx>

Nevezési díj nincs, a nevezés határideje: 2024. január 15.

Az első forduló időpontja: 2024. február 19., 14:00–17:00,
helyszíne: a benevezettek iskolája.

A második (döntő) forduló időpontja: 2024. április 19–21.
(péntek déltől vasárnap délig),
helyszíne: Paks, Energetikai Technikum és Kollégium



forrás: Molnár Gyula

A döntőbe az első fordulóban legjobb eredményt elért húsz Szenior, és tíz Junior **kategóriájú tanulót** hívja be a Versenybizottság.

A Verseny honlapja – **<https://szilardverseny.hu>** – tartalmazza a kategóriák meghatározását, segítséget a felkészüléshez és a díjazást.

A verseny mindkét fordulójában **10-10 elméleti/számítási feladatot** kell a versenyzőknek megoldani. A döntőben ezen kívül még **kísérleti és számítógépes szimulációs feladatot** is kapnak a versenyzők.

A döntőbe jutott versenyzők helyezésüknek megfelelően értékes jutalmakat kapnak. Információnk szerint a **BME felvételi többletpontokat** ad a Szenior kategória első 10 helyezettjének a 2024-től induló új felvételi rendszerben (reméljük, hogy ezt más egyetemek is követik majd).

Várjuk a kihívást vállaló, tehetséges fiatalok jelentkezését!

A Versenybizottság nevében

*Dr. Sükösd Csaba, a BME c. egy. tanára,
a Versenybizottság vezetője*



KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



Nemzeti
Tehetség Program



Wigner 121

Scientific Symposium

2023



MTA
Centre
of Excellence

18-20 September

Ensana | Grand & Thermal Hotel
Margaret Island, Budapest

Heritage and Future

Keynote Speakers

Wolfgang Schleich
Universität Ulm

Vitor Cardoso
Niels Bohr Institute

Gleb Arutyunov
University of Hamburg

Marco van Leeuwen
National Institute for Subatomic Physics

Michael Bonitz
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

István Szapudi
University of Hawaii

Gernot Alber
Technische Universität
Darmstadt

Konstantin Spyrou
University of Ioannina

Tamás Gombosi
Konstantin Gringauz
Distinguished University

Herwig Ott
RPTU Kaiserslautern-Landau

Martin Schulze
Technische Universität Graz

Alexander I. Chumakov
European Synchrotron



Topics

Particle Physics
Gravitation
Space Physics
Optics
Quantum Optics
Quantum Informatics
Solid State Physics
Functional Materials
Statistical Physics
Computational Sciences

Mission

On behalf of the Scientific Organizing Committee, we would like to invite you to participate on the "Wigner 121 Scientific Symposium", which will be held at Thermal Hotel Margitsziget between 18-20 September 2023. This event is a sequel to the "Wigner 111 Scientific Symposium" organized a decade ago, paying tribute to the scientific legacy of Eugene Paul Wigner, a Hungarian-born Nobel-prize winner physicist. This symposium is intended to act as an international forum, where the scientific community of our Institute, Wigner Research Centre for Physics, will present overviews of latest scientific achievements.

The plenary talks of our prominent speakers will be scheduled mostly for the first day, 18 September, and the following two days will be devoted to invited and contributed talks of members of the Wigner RCP and our scientific partners.