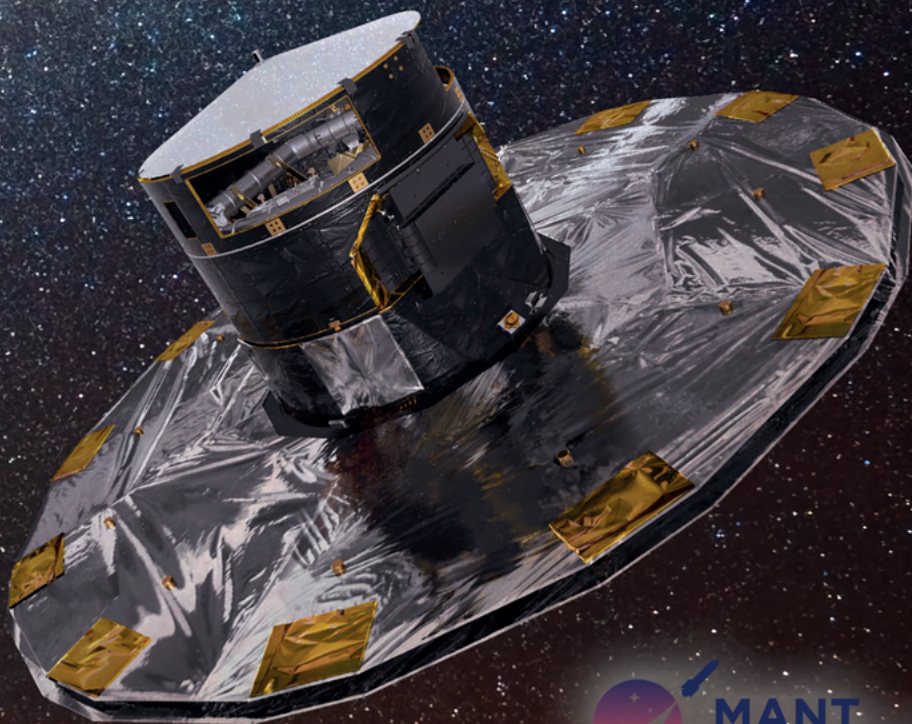


Űrtan Évkönyv 2021

Az Asztronautikai Tájékoztató 73. száma

Kiadja a Magyar Asztronautikai Társaság



Űrtan Évkönyv 2021

Az Asztronautikai Tájékoztató 73. száma

Kiadja a Magyar Asztronautikai Társaság

Űrtan Évkönyv 2021

Az Asztronautikai Tájékoztató 73. száma

Szerkesztette: dr. Frey Sándor

Készült a Külgazdasági és Külügyminisztérium támogatásával

Kiadja: a Magyar Asztronautikai Társaság

1044 Budapest, Ipari park u. 10.

www.mant.hu

Budapest, 2022

Tördelés, grafikai szerkesztés: Horváth Róbert

Felelős kiadó: Arnócz István főtítkár

Kézirat gyanánt

Borítókép: Az európai Gaia űrtávcső fantáziaképe a Tejút sávja előtt. (Forrás: ESA / ATG medialab, háttér: ESO / S. Brunier)

HU ISSN 1788-7771

Előszó

A tisztelt olvasó a Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) hagyományos, a megelőző év eseményeire visszatekintő, egyesületünk tevékenységébe bepillantást nyújtó évkönyvét tartja a kezében – vagy olvassa számítógépe képernyőjén. Tagjaink, akik a könyvet egyesületi tagdíjuk fejében illetményként kapják, valamint más rendszeres olvasóink bizonyára örömmel fogadják, hogy évkönyvünk külsejében jelentősen, és egy kicsit a szerkezetében, tartalmában is megújult. Reméljük, hogy a változások elnyerik tetszésüket, és legalább ugyanolyan örömmel forgatják majd a kötetet, mint a korábbi években.

A mögöttünk álló 2021-es évről szóló beszámolók immár kevesebb helyet foglalnak el. Az eddigi gyakorlatól eltérően idén felhagytunk a világ legjelentősebb űreseményeinek összefoglalásával. Évről évre egyre több fontos esemény történik 12 hónap alatt, annyi minden, hogy nehéz a teljességre törekedve összegyűjteni ezeket. Az információ ugyanakkor könnyedén megtalálható az örvendetesen szaporodó magyar nyelvű internetes hírforrásokban, csakúgy, mint mint a közel két évtizede létező Űrvilág (urvilag.hu) asztronautikai hírportálon. Örömhír, hogy Magyarországon 2021-ben kormányzati úrhonlap (space.kormany.hu) is indult. Néhány fontos magyar vonatkozású űresemény címszavakban: megszületett a kormányzati űrstratégia, újabb hazai készítésű műholdak (SMOG-1, GRBAAlpha, RadCube) álltak sikeresen Föld körüli pályára, meghirdették a HUNOR nemzeti űrhajós programot, megjelent az exkluzív Magyarország és a világűr könyv, és Budapest adott otthont a Nemzetközi Űrhajós Szövetség 33. kongresszusának. Az Európai Űrügynökség (ESA) új űrhajósok toborzásába kezdett, másfél száz honfitársunk is jelentkezett a felhívásra. Világszerte tovább élénkült a kereskedelmi űrtevékenység, minden eddiginél nagyobb számban indítottak űreszközöket, megtörténtek az első szuborbitális űrturista-repülések. A SpaceX CrewDragon űrhajójával sikeresen megjárta a világűr az első csupa „civillekből” álló négyfős személyzet. Folytatódtak a kutatások a Nemzetközi Űrállomáson, és Kína elkezdte megépíteni saját bázisát az alacsony Föld körüli pályán. Arab, kínai és amerikai űrszondák érkeztek a Marshoz, illetve a Marsra. Az év vége felé végre útnak indult az elkövetkező évek meghatározó űrobzervatóriuma, a James Webb-űrtéleszkóp. Köteteket lehetne megtölteni az ilyen és ehhez hasonló fontos mérföldkövekkel, de erre sajnos nem jut itt elég hely.

Lerövidültek továbbá az évkönyv végén a MANT rendezvényeit, eseményeit felidéző összefoglalók is. A változtatások bevezetésekor az a cél vezetett bennünket, hogy a könyv áttekinthetőbb, „áramvonalasabb” legyen. Aki a további részletek iránt is érdeklődik, könnyedén megtalálja azokat az internetes hírforrásokban, illetve egyesületünk honlapján, negyedéves körleveleinkben. Így a tavalyi év történéseinek rövid felidézésén túl, az évkönyv terjedelmének sokkal nagyobb hányadát tudjuk a szakmai-ismeretterjesztő cikkeknek szentelni. Ezekből idén rekordszámú, nem kevesebb mint tíz található meg a kötetben! Témáik igen változatosak, az űrhajózástól kezdve a Hold és a Naprendszer más égitestjeinek kutatásán át az űrcsillagászatig – számos magyar vonatkozással, kutatással. Mindez ékes bizonyítéka annak, hogy hazánkban is virágkorát éli az űrtevékenység. Biztos vagyok benne, hogy mindenki talál a cikkek között

kedvére valót, érdekes új ismeretekre is szert tesz. Köszönjük szerzőinknek, hogy megtiszteltek bennünket írásaikkal.

Az idei évkönyv létrehozásában is segítségünkre volt a Külgazdasági és Külügyminisztériumtól kapott támogatás. Szerzőink, valamint a 2021-es Úrtan Évkönyvet készítő munkatársaim nevében is kellemes, hasznos időtöltést kívánok a kötet olvasásához!

Budapest, 2022. március

A szerkesztő

Fantomokkal a Hold körül - magyar részvétel az Artemis küldetés első tesztrepülésében

Strádi Andrea,
Szabó Julianna,
Hirn Attila

ELKH
Energiatudományi
Kutatóközpont,
Űrkutatási
Laboratórium,
Budapest

A NASA Artemis-programjának célja, hogy nemzetközi együttműködésben új fejezetet nyisson az űrkutatás és -felhasználás területén, többek között emberi személyzetet szállító űrhajó, Hold körüli pályán keringő űrállomás és a későbbiekben holdbázis létrehozásával. Hosszú évek előkészületei, megannyi elhalasztott start, meghosszabbított határidő és költségvetési terv-újragondolás eredményeképpen készen áll az a rendszer, amely lehetővé teszi az első tesztrepülést (Exploration Mission- 1) a legújabb emberes űrhajó, az Orion számára. Eltérően a hidegháborús időktől, az első legénység emberi testet imitáló fantomokból fog állni, amelyek lehetővé teszik, hogy átfogó sugárvédelmi mérések készülhessenek, még mielőtt az élő űrhajósok megtapasztalják a kozmikus sugárzási környezet hatásait. A kísérletben részt vesznek az Energiatudományi Kutatóközpont kutatói is.

BEVEZETÉS

Az emberes űrutazások új korszakába lépve egyre közelebb kerülünk ahhoz, hogy ismét űrhajósok sétálhassanak a Hold felszínén, és felhasználva a megszerzett tapasztalatokat komoly előrelépéseket tegyünk a biztonságosan kivitelezhető marsi utazáshoz. A NASA Artemis elnevezésű programjának égíse alatt megvalósuló nemzetközi együttműködés nemcsak az űrkutatás megerősítését, hanem a nemzetek közötti békés kapcsolatok megszilárdítását is szolgálja. Szemben ugyanis az Apollo-programmal, kifejezett cél, hogy együttműködésben valósuljon meg az összes küldetés a biztonság és a fenntarthatóság növelése érdekében. Összességében a résztvevő nemzetek olyan rendszereket fejlesztenek ki, amilyenket más országok is használhatnak, köszönhetően a tudományos információk nyilvánossá tétele melletti elköteleződésnek.

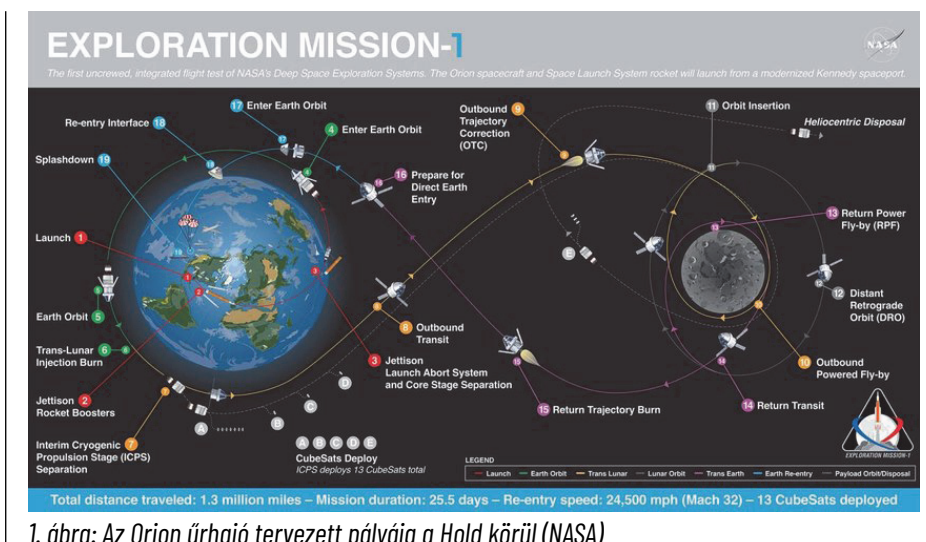
Az Artemis mélyűr-felfedező infrastruktúrájának alapját az SLS (Space Launch System) rakéta, az Orion űrhajó és a kiszolgáló földi egység (Kennedy Űrközpont, Florida) alkotja. A program első fázisaként ezen eszközök segítségével fektetik le az alapokat és demonstrálják a technológiai képességeket, majd a további lépések során az emberi jelenlét kiterjesztése következhet a Hold körüli térségbe és a felszínre. A kitűzött ambiciózus célok eléréséhez alapvető fontosságú, hogy égi kísérőnk sugárzási terét jobban megértsük, felhasználva a rendelkezésre álló modern méréstechnikát. Lényeges körül-

mény, hogy mivel a Hold nem rendelkezik mágneses térrel, ami eltérítené a töltött részecskéket, ezért egy esetleges napkitörés során kilöködő nagy mennyiségű anyag (koronakidobódás) akadálytalanul zúdul az útjában lévő űrhajóra. Mindemellett a mélyűrből származó, és a Naprendszerben folyamatosan jelen lévő nagy energiájú kozmikus sugárzás is bombázza az utasokat. A módszer, amellyel lehetséges megmérni azt, hogy pontosan milyen mennyiségű és minőségű ionizáló sugárzás érheti az űrhajósokat az Orion fedélzetén, ismert és rendelkezésre áll: humanoid fantomok tetőtől talpig tele a legkülönbözőbb sugárzásmérő eszközökkel.

Köszönhetően a kozmikus sugárzás detektálásában való négy évtizedes tapasztalatának, az Energia-tudományi Kutatóközpont Űrkutatási Laboratóriuma több tekintetben is részese lehet az emberiség következő „nagy ugrásának”. Elsőként az alábbiakban bemutatásra kerülő tesztrepülésben, a későbbiekben pedig a Gateway űrállomás sugárvédelmi rendszerének fejlesztésében.

UTAZÁS A HOLD KÖRÜL

Az Orion űrhajó egy emberes felfedező jármű 2-6 fő legénység részére. Fejlesztésének ötlete már 2004-ben felkerült a NASA hivatalos tervei közé, a dizájn megtervezéséhez versenyt hirdettek, amelyet a Lockheed Martin már akkor elnyert, és az *Orion Crew Exploration Vehicle* része lett a 2005-ben kezdődött, de a késések és a finanszírozási keret túllépései miatt négy évvel később felfüggesztett Constellation programnak. Az űrjármű rendelkezik vészhelyzeti megszakítási lehetőséggel arra az esetre, ha felbocsátáskor a rakéta meghibásodna, fenntartja a személyzet életéhez szükséges körülményeket az űrutazás során, és lehetővé teszi a légkörbe való biztonságos belépést, majd az óceánba történő „landolást”. A Lockheed Martin által gyártott személyzeti modulhoz kapcsolódik az európai kiszolgáló egység (*European Service Module*), amelyet az Airbus Defence and Space készített el, és többek között célja az energiaellátás biztosítása a napelemek segítségével. Az űrhajó automata dokkoló rendszerrel rendelkezik, sebességét és pozícióját a főhajtóművel, valamint nyolc kisebb hajtómű és hat fúvóka segítségével tudja változtatni.



1. ábra: Az Orion űrhajó tervezett pályája a Hold körül (NASA)

Mindezekre szükség lesz az Artemis következő fázisaiban megépítendő Gateway űrállomáshoz való kapcsolódáshoz. A visszatérő egység, bár hasonlít az Apollo-programban használt modulra, modern elektronikával rendelkezik. A műszerfal nem hagyományos analóg számlapokkal és műszerekkel van felszerelve, hanem a Boeing 787 Dreamliner sugárhajtású utasszállító repülőgép pilótafülkéjének felépítését tükrözi digitális repülési műszerkijelzőkkel, nagyméretű LCD monitorokkal.

A Kennedy Űrközpontból történő felbocsátást követően az Orion Föld körüli pályán kinyitja a napelemeit, majd az átmeneti kriogén meghajtási szakaszban kapott lökés hatására tranzit pályára kerül. Eközben a másodlagos hasznos teherként magával vitt kisműholdakat (CubeSatokat) útjukra engedi, amelyek technológiai demonstrációként és kísérleti platformként szolgálnak. Amikor megérkezik a Holdhoz, az Orion közeli elrepülést (*flyby*) hajt végre, körülbelül 100 kilométerrel a felszín felett. Ezután egy úgynevezett távoli-retrográd pályára áll. Az űreszköz keringési iránya ellentétes (retrográd) lesz tehát a Holdéval, és a továbbiakban messzebb halad majd a felszíntől, nagyjából 61 ezer kilométerre. Az Orion nagyjából hat napig marad Hold körüli pályán, hogy adatokat gyűjtsön, és a földi küldetésirányítók értékelhessék a különböző technológiai egységek teljesítményét. A személyzet nélküli űrhajó végezetül még egy közeli elrepülést hajt végre, mielőtt a szervizmodul hajtóművei segítségével a visszatérő egység a megfelelő pályára áll a Föld felé. A kapszula ezt követően belép a Föld légkörébe és ejtőernyős lassítást követően a Csendes-óceánban, a Kaliforniai-félsziget (Baja California, ejtsd: baha) partjainál ér majd „földet”. A nagyjából 25 és fél napos küldetése alatt az Orion közel 2,1 millió kilométer utat tesz meg [1].

FANTOMOK A FEDÉLZETEN

Az optimális sugárvédelmi árnyékolás, a megfelelő dóziskorlátok kidolgozása, a bőrt, valamint a belső szerveket érő sugárterhelés összefüggéseinek megértése kulcskérdés az emberes küldetések terve-



2. ábra: Matroshka fantom a DLR laboratóriumában és az űrséta szimulációjához felépített skafanderrel. (Fotó: ESA / DLR)

zése során. Nem új keletű ötlet, hogy az űrhajósokat kívül-belül érő ionizáló sugárzást a valóságot jól modellező bábu, úgynevezett fantom segítségével vizsgálják. Emberi koponyát imitáló fantommal már a 90-es években is végeztek méréseket a NASA űrsiklóin, majd a Mir űrállomáson [2,3]. Az EK kutatói is részt vettek abban a lényegesen részletgazdagabb fantomot használó kísérletsorozatban, melyet az Európai Űrügynökség (ESA) megbízásából a Német Repülési és Űrrepülési Hivatal (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, DLR) koordinált [4]. A HAMLET program Matroszka elnevezésű fantomjának lágy szövetei és tüdeje testszövetazonos, kis sűrűségű poliuretánból készültek és valódi emberi csontokat tartalmazott. Több mint ezer mérési pozíciót alakítottak ki a bábun aktív (energiaellátást igénylő) és passzív (utólagos kiértékeléssel elemezhető) detektorok számára. A Nemzetközi Űrállomás külső platformjához rögzítve, űrsétát szimulálva, valamint különböző modulokban az űrállomáson belül is végeztek méréseket 2004 és 2011 között [5]. Hasonló modelleket alkalmaznak egyébként a radioterápiás besugárzó berendezések tesztelése, kalibrálása során is.

Az Orion űrhajón tervezett *Matroszka AstroRad Radiation Experiment* (MARE) sugárzási kísérletet szintén a DLR vezeti az ESA megbízásából. Doziméterekkel részt vesznek több ország (Ausztria, Belgium, Csehország, Lengyelország, Magyarország, Németország, az Egyesült Államok és Japán) kutatói is, akik már tapasztaltak a hasonló típusú mérésekben. Miként a Matroszka küldetéseknél, a cél ez esetben is a különböző szövettípusokban elnyelt sugárzás mennyiségének és minőségének megállapítása, ezáltal felmérve az űrhajóban utazó személyzetet érő sugárterhelést. Lényegi különbség a MARE fantomok tekintetében, hogy ez esetben női testet imitálnak, összesen 38 darab 2,5 cm-es szeletből felépítve.



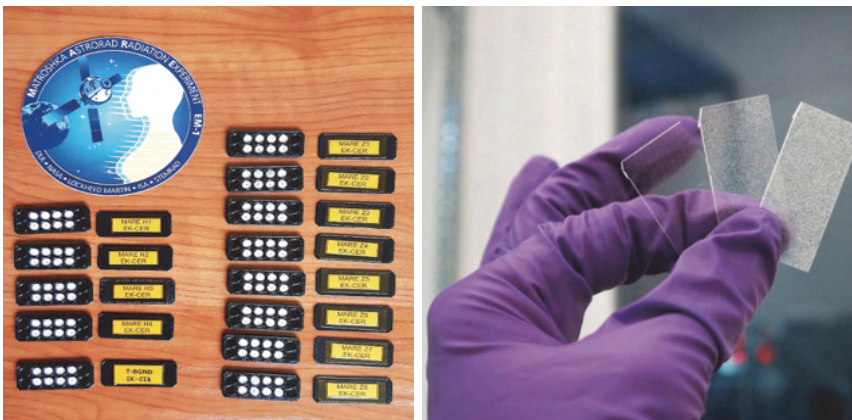
3. ábra: A MARE fantom. (Fotó: DLR)

Biológiai és sugárvédelmi szempontból nem elhanyagolható a különbség a két nem szöveti és szervi felépítésében, emiatt az új eredmények hiánypótlók lesznek. A küldetés során két teljesen azonos – Helga és Zohar névre keresztelt – fantomot helyeznek majd el az egymás melletti ülésekben, melyek közül az egyik (Zohar) az AstroRad elnevezésű sugárvédelmi mellényt is viseli majd. A Nemzetközi Űrállomáson már tesztelték a mellényt, de a Hold körüli térség kitettsége egyedi körülményeket teremt, így hasznos új információkkal gazdagodhatunk. A fantomok belsejében kialakított 1400 szenzorpozíció mellett a „bőrfelületen” és a mellény külső felületén is folynak majd mérések, így egyértelműen látható majd, hogy milyen mennyiségű és minőségű sugárzástól védi meg a viselőjét [6].

PASSZÍV DOZIMÉTER ÖSSZEÁLLÍTÁS

Az Apollo-küldetésekből meglehetősen kevés és kezdetleges szabályozások mellett rögzített dozimetriai adat áll rendelkezésre. Habár az indiai Chandrayaan szonda szolgáltatott releváns mérési adatokat a Hold körüli pályáról [7] és a közelmúltban publikáltak már a Hold felszínén mért sugárdózis adatokat is [8], mégis a MARE kísérlet fantomok alkalmazásával várható eredményei az emberes küldetések szempontjából hiánypótlóak lesznek. A résztvevő kutatócsoportok a DOSIS-3D kísérletsorozat keretein belül a Nemzetközi Űrállomás Columbus moduljában több mint 10 éve végeznek méréseket [9]. Az együttműködés során felhalmozott tapasztalatok segítségével kialakítottak egy olyan mérési összeállítást, amelyben egyidejűleg különböző típusú passzív dózismérőkkel detektálható a kozmikus sugárzás. Többek között ezt a termolumineszcens dózismérőket és szilárdtest-nyomdetektorokat tartalmazó összeállítást fogják alkalmazni az Orion űrhajóban helyet foglaló fantomok testfelületén és a sugárvédelmi mellény alatt és felett. Kiegészítésképpen további nyomdetektorok elhelyezésére is lehetőség nyílt mindkét fantom tüdejének, gyomrának, méhének és gerincoszlopának közelében, ezek ugyanis az ionizáló sugárzásra legérzékenyebb területek.

A szilárdtest-nyomdetektorok a nagyobb energia leadásra képes részecskéket regisztrálják látható felületi roncsolás formájában (ilyenek a protonok és a szupernóva-robbanások során szétrepülő, közel fénysebességgel száguldó atomok), míg a termolumineszcens detektorok a kisebb energialeadású protonokra, ionokra, gamma-sugárzásra és az űrhajó falából kilökött neutronokra érzékenyek. Ezeket a detektorokat a küldetés végén, a földi laboratóriumban értékeli ki a kutatók.



4. ábra: A MARE kísérlethez előkészített termolumineszcens doziméterek a 3D nyomtatott tartókban (balra) és kalibrációs besugárzások során különböző mértékben roncsolt szilárdtest-nyomdetektor lapkák (jobbra). (Fotók: EK)

STARTRA KÉSZEN

Az Artemis-program első küldetése várhatóan 2022/2023-ban indulhat. Az Orion űrhajó (fedélzetén a fantomokkal és az integrált dózismérőkkel), valamint a szállító rakéta, az SLS már összeszerelve

várja, hogy a felbocsátás előtti rengeteg tesztet elvégezzék rajta. Az Apollo- és az űrsiklóprogram indításainak helyszínéül szolgáló *Launch Complex 39B* indítóállást felújították, innen indulhat majd útjára ez a történelmi küldetésorozat.

Izgatottan várjuk a fejleményeket!

Irodalomjegyzék

[1] NASA Exploration Mission-1, <https://www.nasa.gov/subject/12388/em1-exploration-mission-1/>

[2] Konradi A. et al. (1992): Low earth orbit radiation dose distribution in a phantom head. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 2, 49

[3] Bereger T. et al. (2004): Austrian dose measurements onboard space station MIR and the International Space Station – overview and comparison. *Advances in Space Research*, 34, 1414

[4] Szabó J., Pálfalvi J. K. (2012): Calibration of solid state nuclear track detectors at high energy ion beams for cosmic radiation measurements: HAMLET results. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 694, 193

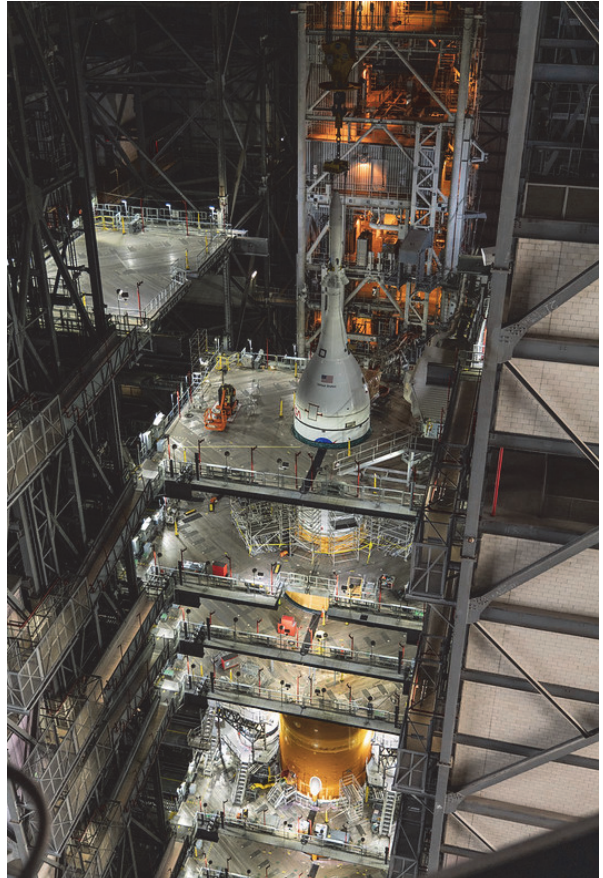
[5] Reitz G. et al. (2009): Astronaut's Organ Doses Inferred from Measurements in a Human Phantom Outside the International Space Station. *Radiation Research*, 171, 225

[6] MARE – The MATROSHKA AstroRad Radiation Experiment, <https://www.dlr.de/me/en/desktopdefault.aspx/tabid-14114>

[7] Zhang S. et al. (2020): First measurements of the radiation dose on the lunar surface. *Science Advances*, 6, 1

[8] Dachev T. et al. (2009): Monitoring lunar radiation environment: RADOM instrument on Chandrayaan-1. *Current Science*, 96, 544

[9] Berger T. et al. (2016): DOSIS & DOSIS-3D: long-term dose monitoring onboard the Columbus Laboratory of the International Space Station (ISS). *Journal of Space Weather and Space Climate*, 6, A39



5. ábra: Orion űrhajó az SLS rakéta orrkúpja alatt az összeszerelő csarnokban. (Fotó: NASA / Radislav Sinyak)

Utazás a Merkúrhez – a BepiColombo küldetés

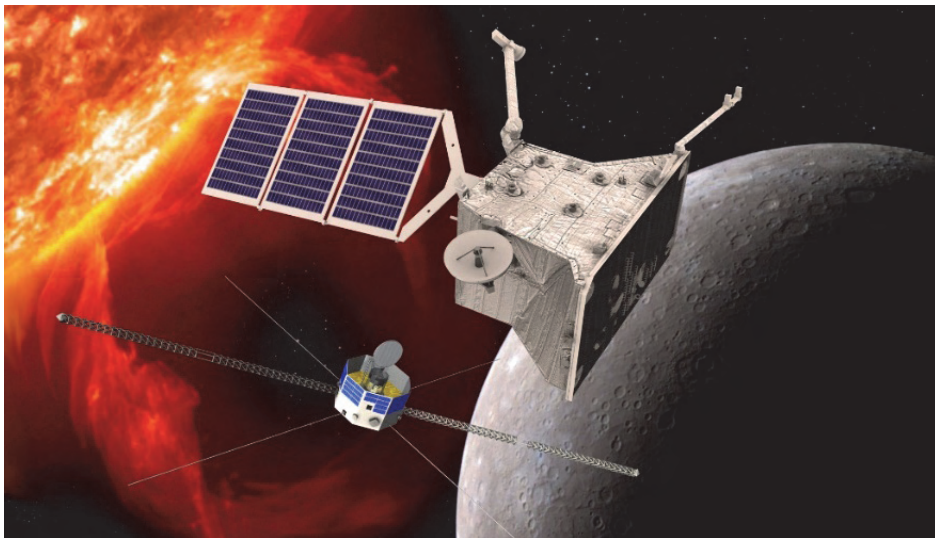
Bebesi Zsófia,
Juhász Antal,
Timár Anikó,
Dósa Melinda

ELKH Wigner Fizikai
Kutatóközpont,
Budapest

BEVEZETÉS

A BepiColombo küldetést az Európai Űrügynökség (*European Space Agency, ESA*) és a Japán Űrügynökség (*Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA*) együttműködésének keretében hozták létre. A küldetés két tudományos szondából áll, melyek jelenleg egy hőpajzzsal védett hordozó platformra rögzítve (*Mercury Transfer Module, MTM*) utaznak a bolygóközi térben. A két keringő egység egyike, a *Mercury Planetary Orbiter (MPO)* elsősorban a Merkúr felszínét vizsgálja majd, a *Mercury Magnetospheric Orbiter (Mio)*, korábbi nevén *MMO* pedig a mágneses terét térképezi fel. A két űrszonda összehangolt mérései új távlatokat nyitnak a bolygó plazmakörnyezetének kutatásában. A Merkúrt mostanáig csak két NASA űrszonda, a *Mariner-10* (1974. szeptember) és a *MESSENGER* (2011. március – 2015. április) közelítette meg.

A BepiColombo indítására 2018. október 20-án került sor, és a tervek szerint 2025. december 5-én fog pályára állni a Merkúr körül. Addig is a bolygóközi térben számos lassító manőverre lesz szükség (a majdani optimális befogási sebesség eléréséhez a Merkúrnál). Ezek során több alkalommal megközelelti a Naprendszer belső bolygóit (miközben tudományos méréseket is végez), illetve az interplanetáris térben a napszelet észlelő űrszondákkal együtt is számos lehetőség adódik szolaris események koordinált vizsgálatára.

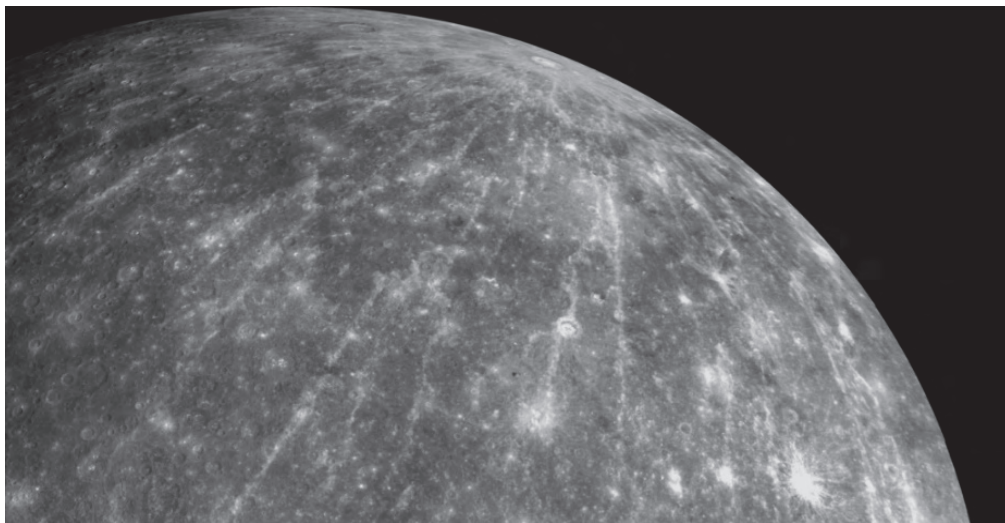


1. ábra: Fantáziaképen az MPO és Mio vizsgálódásai a Merkúrnál. (Forrás: ESA)

Az MPO űrszonda egyes műszereinek megépítésében magyar mérnökök is részt vettek, aminek révén az érintett berendezések által mért tudományos adatokhoz a közreműködő magyar kutatóintézetek is hozzáférnek. Ezek egyike a *Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances* (SERENA) műszercsomag részét képező iontömeg-spektrométer, a *Planetary Ion Camera* (PICAM) [1], melynek alacsony feszültségű tápegységét, valamint egy, a BepiColombo környezetét szimuláló szoftvert a Wigner Fizikai Kutatóközpont Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának mérnökei az SGF Kft. közreműködésével fejlesztették ki. Ugyancsak magyar hozzájárulással készült a plazmahullámok vizsgálatára tervezett *Plasma Wave Instrument* (PWI), amelyhez az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Űrkutató Csoportja a BL Electronics Kft.-vel közösen dolgozta ki az intelligens jelfelismerő modul (ISDM) fedélzeti szoftverét.

TUDOMÁNYOS ISMERETEINK A MERKÚRRÓL

A Merkúr (2. ábra) a Naphoz legközelebb keringő bolygó, mely csillagunkat mintegy 88 nap alatt kerüli meg. A bolygó átlagos átmérője 4880 km, azaz kisebb, mint a Jupiter körül keringő Ganymedes, valamint a Szaturnusz Titan holdja. Pályájának excentricitása elég nagy (kb. 0,2), ami belső bolygó esetében a bolygókeletkezési elméletek szerint rendhagyónak számít, így az is felmerült, hogy a Merkúr nem a Naprendszer belsejében jött létre, hanem csak később vándorolt át a jelenlegi pályájára. A pálya elnyúltságának következtében a Naptól mért távolság 46 millió (perihélium) és 70 millió km (aphélium) között változik. A Merkúr Nap körüli keringési és tengely körüli forgási periódusa között pontosan 3:2 arány áll fenn, mely ugyan nem a kötött keringés esetére vonatkozó 1:1-es rezonancia, de ez is stabil állapot. A Merkúr pályainklínációja 7° -os, valamint további érdekes tény, hogy a bolygó tengelyhajlása mindössze 2° , emiatt évszakos változások nem alakulnak ki rajta. Azonban a rendkívül lassú forgás miatt a felszínen mégis létrejöttek adott helyszínekre jellemző klimatikus viszonyok, forróbb és hűvösebb területek.



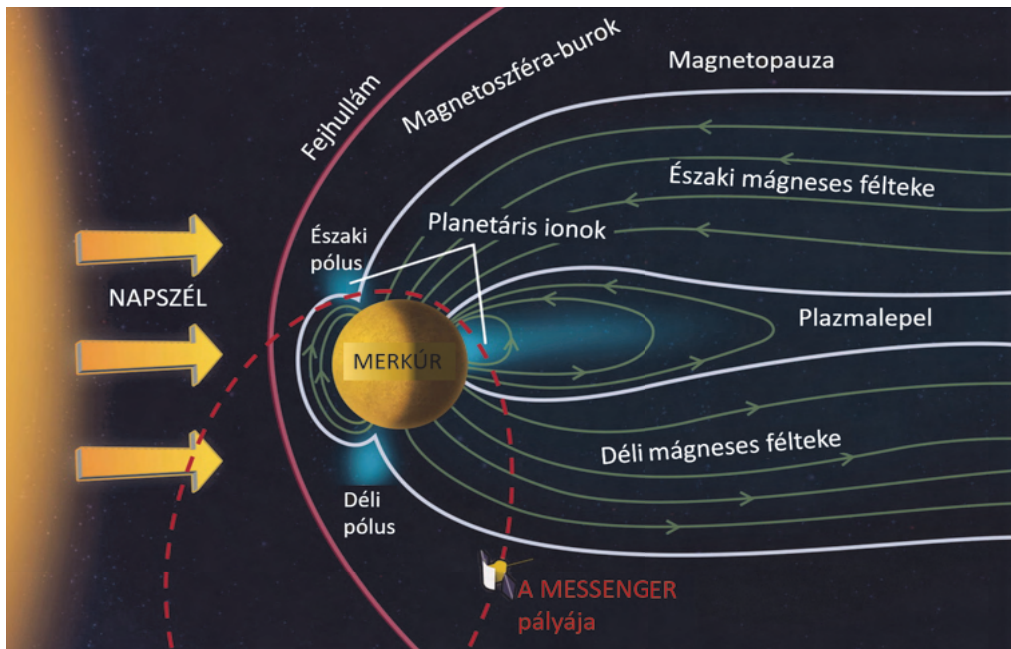
2. ábra: A Merkúr felszíne. (Forrás: NASA)

A Merkúr felszíne erősen kráterezett, mivel folyamatosan bombázzák a Naprendszer belsejébe bejutó, vagy ott keringő üstökösök, aszteroidák, meteorok, valamint a napszél. A felszíni morfológiára vonatkozóan egészen az első űrszondás megfigyelésekig egyáltalán nem voltak ismereteink. Elsőként az amerikai Mariner-10 összesen három alkalommal közelítette meg a Merkúrt. Ezek során a felszín 45%-át fotózta le. A MESSENGER már a teljes felszínt lefényképezte, illetve az északi féltekét még lézeresen is letapogatta, aminek révén részletes topográfiai térképekhez jutottunk.

A Merkúr egykor vulkanikusan aktív volt, ennek jelei napjainkban is jól láthatók. Felszínén nincsenek jelentősebb magasságbeli eltérések, ellenben számtalan becsapódási kráter borítja. Megfigyeltek olyan hosszanti irányú repedéseket is, amelyek feltehetőleg az égitest kihűlése, globális összehúzódása következtében jöhettek létre.

A Merkúr a Föld után a második legsűrűbb bolygó a Naprendszerben, átlagsűrűsége $5,427 \text{ g/cm}^3$. A jelenlegi bolygókeletkezési elméleteink szerint ez meglepő, de egy óriási, a bolygó térfogatának több mint felét kitevő vasmag jelenléte esetleg magyarázatot nyújthat rá – a Föld esetében a mag a bolygó térfogatának csupán 17%-át teszi ki. Többek között ennek a kérdésnek a megválaszolása is egyike a BepiColombo tudományos célkitűzéseinek.

A Merkúr kiterjedt, globális mágneses terét a Mariner-10 űrszonda észlelte először. A bolygó magnetoszférája akadályt képez a szuperszonikus sebességgel áramló napszél plazma számára, és meggátolja, hogy a napszélbe befagyott interplanetáris mágneses tér lehatoljon a felszínre. A Merkúr esetében a földihez képest gyenge és kevésbé kiterjedt magnetoszféráról (3. ábra) van szó, tehát a

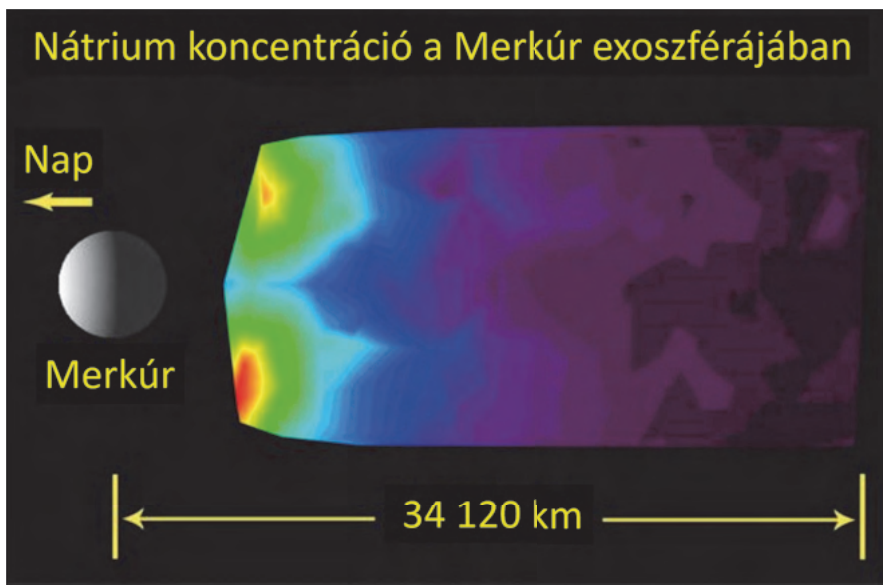


3. ábra. A Merkúr magnetoszférájának szerkezete, valamint a 2011 és 2015 között körülötte keringő MESSENGER űrszonda poláris pályája. (Forrás: Zurbuchen et al., 2011)

napszél nagyobb energiájú részecskéinek egy része eljuthat a felszínre [2], ahol hozzájárul az eróziós folyamatokhoz. A szuperszonikus sebességű napszél hatására a Földhöz hasonlóan a Merkúr Nap felőli oldalán lökéshullám (fejhullám) jön létre. A napszél dinamikus nyomása, valamint a magnetoszféra mágneses nyomása a magnetopauza mentén kerül egyensúlyba.

A Merkúr kis mérete, valamint lassú forgása mellett meglepő a kiterjedt globális magnetoszféra jelenléte, mivel a dinamóhatás létrejöttéhez szükség van a mag körül egy folyékony fémes rétegre, melyet a többi mágneses bolygónk esetében a gyors tengely körüli forgás tart mozgásban. A Merkúr belsejében működő mágneses dinamót azonban feltehetőleg az excentrikus pálya miatt fennálló erőteljes árapályhatások tartják fenn. További érdekesség, hogy bár a Merkúr mágneses tengelye és forgástengelye közel egybeesik, a mágneses dipóltér mégsem szimmetrikus, hanem az északi féltekén nagyjából háromszor akkora térerősség mérhető, mint a délin. Valamint a déli pólus környezetében az északihoz képest nagyobb területen észlelhetők nyitott mágneses erővonalak, ezért itt nagyobb arányban szökhetnek el a Merkúr eredetű töltött részecskék is. Az egyenlítői mágneses térerősség ~ 300 nT, ami a földi értéknek mindössze az 1%-a. Nagyon erős napszélnyomás esetében a magnetoszféra olyan mértékben összenyomódhat, hogy a magnetopauza eléri a felszínt.

A Merkúr felszínén, az egyenlítő Nap felé eső tartományában mért napállandó a földi $1,370 \text{ W/m}^2$ értéknek a 4,59–10,61-szerese, a felszíni hőmérséklet pedig 100 K (árnyékban) és 700 K (a nappali oldalon) között mozog. A pólusok közelében, az árnyékos oldal krátereinek mélyén akár (regolittal borított) vízjeget is találhatunk, amit a MESSENGER űrszonda radarészlelései is igazoltak. A Merkúron jelen lévő víz becsült mennyisége 10^{14} – 10^{15} kg. Eredete egyelőre nem ismert, a belső tartományok esetleges kigázosodása mellett származhat a Naprendszer belsejébe látogató üstökösöktől is.



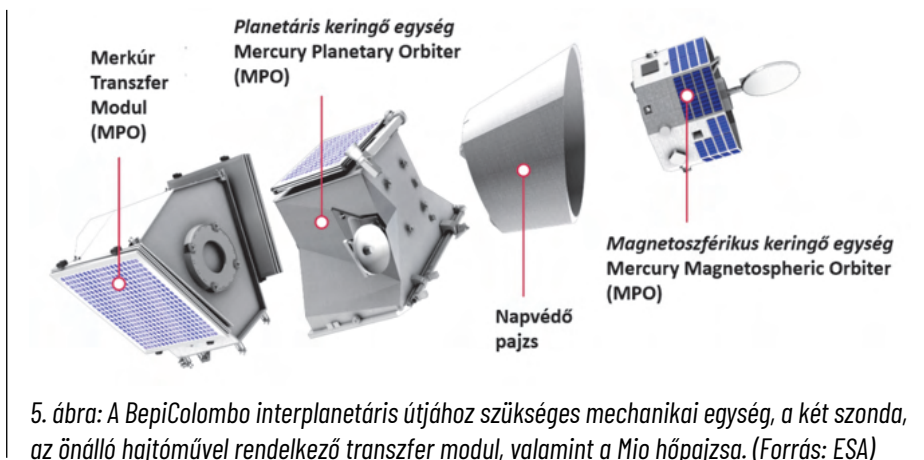
4. ábra: A Merkúr atmoszférájában található nátrium mennyiségi eloszlása (a vörös és zöld tartományokban található a legnagyobb mennyiség). (Forrás: NASA/JHUAPL)

A bolygó felszíne fémek (Na, K, Mg) mellett illóanyagokban (víz, S, SO_2 , HS) gazdag, ami meglepő, hiszen feltételezhetjük, hogy egy égitest minél közelebb kering a csillagához, annál hamarabb elveszíti az illékony összetevőket. A Mariner-10 műszerei kimutatták egy nagyon ritka légkör jelenlétét, amelynek akkor feltételezett összetevői a hidrogén, a hélium és az oxigén voltak [3]. A MESSENGER méréseinek köszönhetően ma már tudjuk, hogy kis mennyiségben nátrium, kálium, kalcium, magnézium, argon és vízgőz is kimutatható benne. A Merkúrnak nincs stabil atmoszférája, csak exoszférája (nyomása kevesebb, mint 1 nPa), ahol a részecskék közepes szabad úthossza összemérhető a réteg vastagságával [4]. Az exoszférát alkotó (kezdetben) semleges részecskék a napszél töltött részecskéivel való töltéscsere révén ionizálódhatnak, és elszőkhetnek az interplanetáris térbe. Ugyanis az újonnan keletkezett ionok az interplanetáris mágneses tér erővonalai körül giromozgásba kezdenek, és a napszellel együtt eltávoznak a bolygó környezetéből. A Merkúr esetében az exoszférába folyamatosan érkeznek részecskék, a felszínről (a napszél és a sugárzás hatására), és a magnetoszféra más tartományaiból egyaránt [5]. A részecskék kiáramlása elsősorban a nátrium D-vonalában figyelhető meg, kiterjedt, akár 2000 Merkúr-sugárnyi hosszúságú csóva formájában.

A felszínt folyamatosan bombázzák az interplanetáris térből érkező mikrometeoroidok is, melyek fluxusa az Ekliptika síkjában a legnagyobb. A becsapódás során felszabaduló hő elpárologtathatja a felszínen található anyagokat, melyek aztán szintén bekerülnek az atmoszférába. Többek között ez a folyamat hozható kapcsolatba az atmoszférikus nátrium (4. ábra) észlelésével is, mely jelentősebb mennyiségben el is szökhet a Merkúr környezetéből.

A BEPICOLOMBO TECHNIKAI JELLEMZŐI

Az űrszondák jelenleg még egyetlen összekapcsolt űreszközként (5. ábra) utaznak az interplanetáris térben. Közülük a transzfer modul (MTM) felelős a meghajtásért, hogy a két keringő egység – az MPO és a Mio – eljusson a Merkúrhoz [6]. A Mio név nem természetes rövidítése az űreszköz hivatalos nevének, hanem a japán lakosság által javasolt több ezer név közül választották ki (jelentése „vízi út”, mely a vízen síkló hajók, és a napszélben száguldó űrszondák analógiáját szimbolizálja). A három egység a Mio napvédő pajzsával együtt alkotja a *Mercury Cruise System* (MCS) űrobjektumot.

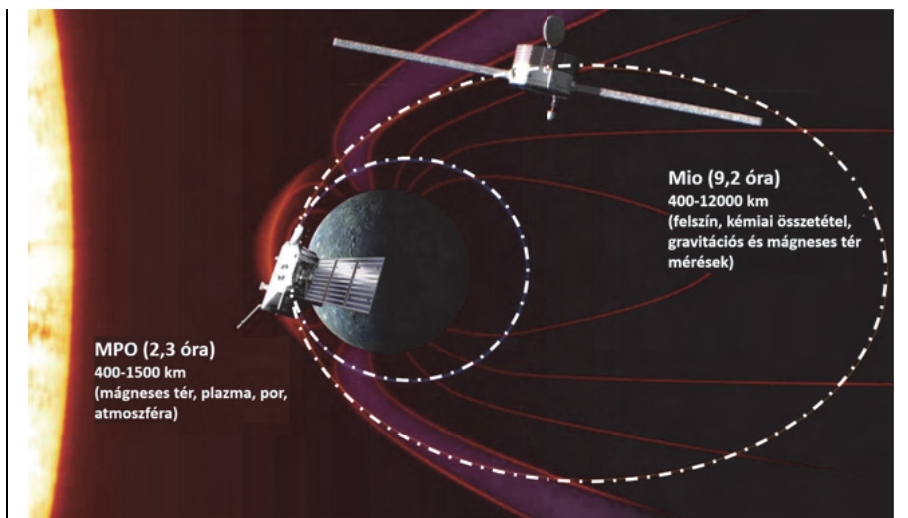


5. ábra: A BepiColombo interplanetáris útjához szükséges mechanikai egység, a két szonda, az önálló hajtóművel rendelkező transzfer modul, valamint a Mio hőpajzs. (Forrás: ESA)

A transzfer modul meghajtása szoláris elektromos hajtóműrendszerrel valósul meg, ami napelemek és manőverező ionrakéták kombinációját jelenti. Az ionhajtómű négy komponense egyenként 145 mN tolóerő kifejtésére képes, ezáltal jelenleg ez a világűrben valaha alkalmazott legnagyobb teljesítményű ilyen meghajtórendszer. Ugyancsak az MTM látja el energiával az odaút időtartamára részlegesen hibernált két keringő szondát is (az MPO tartja a rádiókapcsolatot a Földdel, a Mio pedig alvó üzemmódban van). A 2025. december 5-ére tervezett befogást követően a transzfer modul poláris pályára kerül, majd kis pályamódosítást követően eléri a végső pályát, 178 ezer km-es apohermiummal. Itt a két keringő egység leválik a transzfer modulról, majd kémiai üzemelésű meghajtó rakéták segítségével érik el a tervezett pályáikat. Ekkor fogják felébreszteni a Mio szondát is. A keringő egységek végső pályáit és pályaparamétereiket a 6. ábra mutatja.

Az MPO-nak 11 fedélzeti berendezése van, melyek többségét a túlhevülés elkerülése érdekében a szonda nadirpontjának közelében helyezték el, ez a keringés során mindig a bolygó felszíne felé néz majd. Az 1 méteres átmérőjű rádióantennája a szonda zenit felőli oldalára, egy rövid rúd végére került, a sáv szélesség éves szinten 1550 Gbit adat lehozatalát teszi lehetővé. A fedélzeten a következő műszerek találhatók: lézeres magasságmérő (BELA), gyorsulásmérő (ISA), magnetométer (MPO-MAG, MERMAG), sugárzásmérő és infravörös spektrométer (MERTIS), gamma-sugárzás- és neutron-spektrométer (MGNS), képképző röntgenspektrométer (MIXS), ultraibolya spektrométer (PHEBUS), rádióhullám-detektor (MORE), az exoszféra újratermelő és az onnan kilépő semleges részecskék kutatására létrehozott, több detektorból álló műszercsomag (SERENA – ELENA, STROFIO, MIPA, PICAM), spektrométerek és képképző berendezések rendszere (SIMBIO-SYS), valamint egy szoláris röntgenintenzitás-mérő és részecskespektrométer (SIXS).

A Merkúr mágneses terének átfogó vizsgálatára kifejlesztett Mio alakja szabályos nyolcszög alapú hasáb, tömege 285 kg. Fedélzetén 5 műszercsoport kapott helyet: egy hat detektorból álló plazma-részecskedetektor-csomag (MPPE – MEA1 és MEA2, MIA, MSA, HEP-ele, HEP-ion, ENA), magnetométer



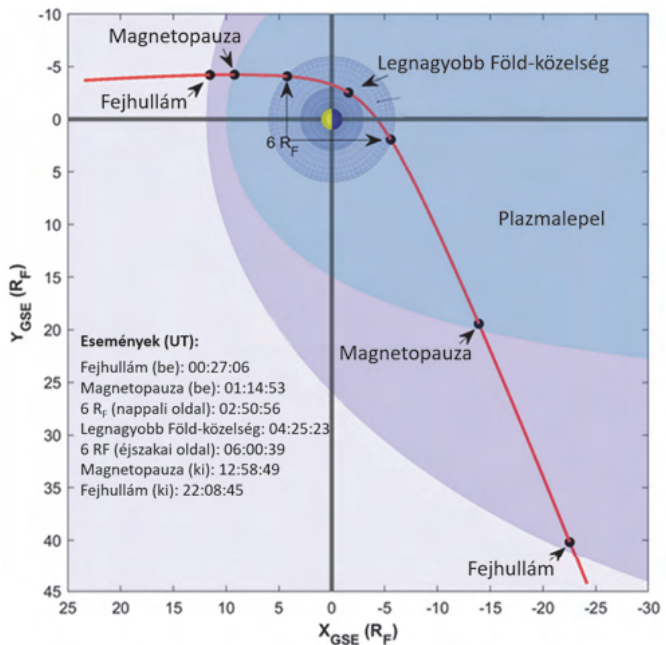
6. ábra: Az MPO és az MMO keringési pályái a küldetés időtartama alatt. (Forrás: JAXA, ESA)

(MMO-MGF), plazmahullám-detektor (PWI), egy, a nátrium atmoszféra vizsgálatára kifejlesztett spekt-rális képképző berendezés (MSASI), valamint egy por-detektor (MDM). A Mio szonda forgásstabilizált, forgástengelye a Merkúr egyenlítőjére merőleges. A tervek szerint évente 160 Gb-nyi adatot fog visz-szasugározni a Földre. A BepiColombo Merkúrra vonatkozó tudományos célkitűzéseiről [7] a Fizikai Szemlében 2020-ban megjelent cikkünkben [8] irtunk részletesebben.

A GRAVITÁCIÓS MANŐVEREK SORÁN VÉGZETT MÉRÉSEK

A transzfer modul a Merkúr körüli 2025-ös pályára állítást megelőzően összesen hét évig utazik az interplanetáris térben. Ezalatt az űreszköz a Földet egyszer (2020. ápr. 10.), a Vénuszt kétszer (2020. okt. 15. és 2021. aug. 10.), a Merkúrt pedig a megérkezését megelőzően összesen hat alkalommal közelíti meg (2021. okt. 2., 2022. jún. 23., 2023. jún. 20., 2024. szept. 5., 2024. dec. 2. és 2025. jan. 9.), hogy végül elérje a befogáshoz szükséges optimális sebességet. A negyedik Merkúr-megközelítést követően a BepiColombo már a bolygóéhoz hasonló pályán fog keringeni a Nap körül, és a Merkúr közelében marad. A gravitációs manőverek jó alkalmat kínálnak a BepiColombo fedélzeti műszereinek tesztelésére, tehát tudományos mérések mellett kalibrációs műveleteket is lehet végezni.

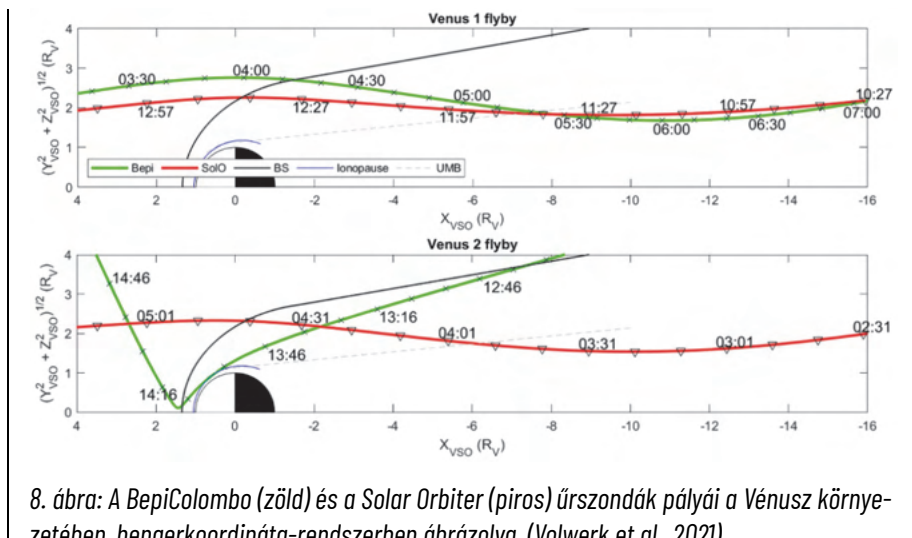
Az első ilyen célpont, a Föld megközelítésekor [9] a BepiColombo áthaladt a bolygó magnetoszféráján, melynek határfelületeit (fejhullám és magnetopauza) a magnetométer és a plazmaműszerek mérései révén pontosan beazonosíthattuk (7. ábra). Az ábra az űrszonda pályáját geocentrikus szoláris ekliptikai (GSE; az x tengely a Nap felé mutat, a z tengely pedig a Föld pályájára merőleges) koordinátarendszerben mutatja. A földi gravitációs manőver során a magnetosféra és a földi plazmakörnyezet külön-féle tartományaiban lehetőség nyílt a BepiColombóval és a Föld körül keringő műholdakkal együttesen koordinált észlelések elvégzésére is. A fejhullám előterében (a napszél áramlása felőli, ún. *upstream* tartomány) például a Geotail és az MMS (*Magnetospheric Multiscale Mission*) műholdakkal egyidejűleg vizsgálták az upstream régióban zajló mágneses hullámaktívítást, meg egészen $60 R_F$ (ahol $R_F = 6371$ km, a Föld sugara) távolságig észlelhető volt.



7. ábra: A BepiColombo pályája a 2020. április 10-ei Föld-megközelítés alkalmával. (Forrás: Mangano et al., 2021)

A BepiColombo a magnetoszféra terminátor közeli tartományában egyidejű méréseket végzett az Artemis műholddal, a csóva dinamikájának alaposabb megismeréséhez pedig a GOES-16 és -17, valamint a Cluster holdakkal szinkronizált tudományos adataival járult hozzá. A legnagyobb Föld-közelséget 12677 km-es távolságban érte el. A Hold megfigyelésére ekkor nem volt lehetőség, mert elég távol tartózkodott űreszköz trajektóriájától.

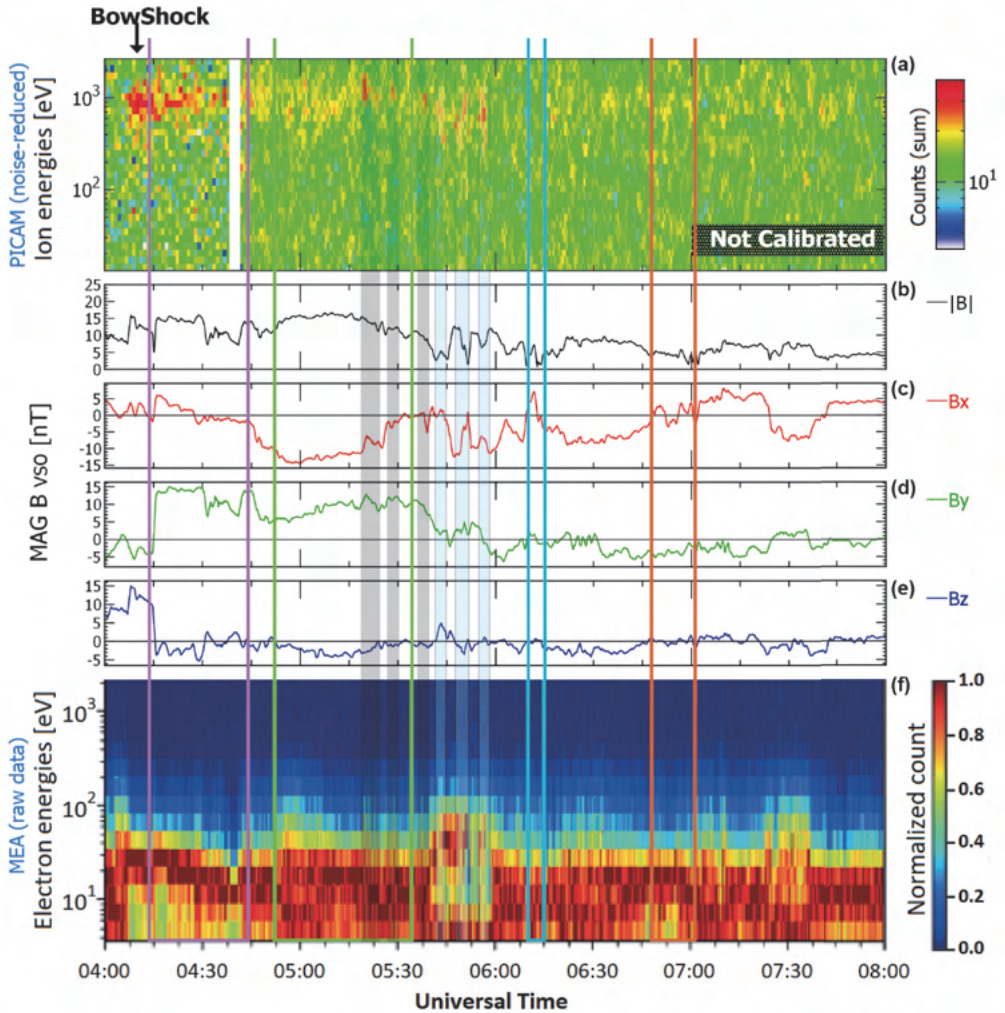
A következő két irányított gravitációs lassító manőverre a Vénusznál került sor [9,10]. A Vénusz körül az elmúlt két évtizedben hosszabb ideig csak két űreszköz tartózkodott, az ESA Venus Express űrszondája (2006–2014) és japán Akatsuki (2015–).



8. ábra: A BepiColombo (zöld) és a Solar Orbiter (piros) űrszondák pályái a Vénusz környezetében, hengerkoordináta-rendszerben ábrázolva. (Volwerk et al., 2021)

Az utóbbi néhány évben a BepiColombo mellett két másik, nemrégiben útjára indított űrszonda is igénybe vette a Vénusz gravitációs terének pályamódosító hatását. Ezek egyike a Parker Solar Probe [11], mely összesen hét Vénusz-megközelítést fog végrehajtani – ezek közül az első három (2018. okt. 3., 2019. dec. 26., 2020. júl. 11.) időben közel esett a BepiColombo megközelítési dátumaihoz (2020. okt. 15. és 2021. aug. 10.). A másik ilyen küldés a Solar Orbiter [12], melynek első Vénusz-manőverére 2020. dec. 27-én (két hónappal a BepiColombo után), a másodikra pedig mindössze egy nappal (2021. aug. 9-én) a BepiColombo érkezése előtt került sor. Mivel méréseik térben és időben közel zajlottak, a tudományos adatokat összehasonlító vizsgálatokhoz használták fel. A BepiColombo és a Solar Orbiter Vénusz körüli pályáit a 8. ábra mutatja.

A BepiColombo fedélzeti műszereinek többsége a Vénusznál végrehajtott gravitációs manőverek során aktív volt, és méréseikkel elsősorban a bolygó atmoszférájára (hőmérséklet- és sűrűségprofil, kémiai összetétel és globális cirkuláció), belső felépítésére, és a Nap-Vénusz kölcsönhatásra (szoláris sugárzás, nagyenergiájú részecskék, plazmakölcsönhatások, lokális interplanetáris mágneses tér, elektromos tér, plazma- és rádióhullámok) vonatkozó ismereteinket gazdagították. Az adatok feldolgozása és az eredmények publikálása folyamatosan zajlik.



9. ábra: Az első Vénusz-megközelítés során mért plazma adatok. (a) PICAM, (b)–(e) a mágneses térerősségvektor abszolút értéke és komponensei, (f) lineárisan normált MEA irányfüggetlen elektron beütésszám idő-energia spektrum. A függőleges vonalak az egyes plazmatartományokat jelölik [10]

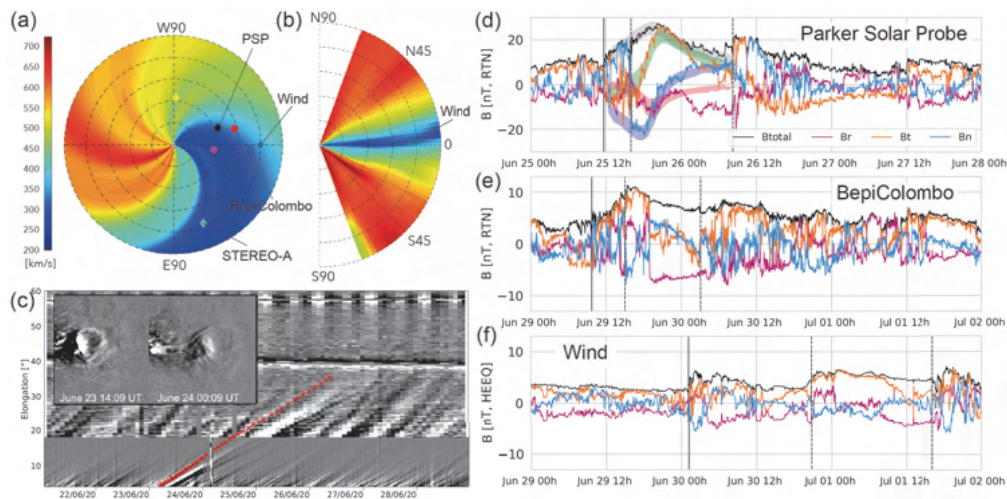
A 9. ábrán [10] az első Vénusz-megközelítés idején mért plazma adatok láthatók, melyek közül a felső panelen (a) ábrázolt PICAM adatok még kalibrálatlanok, de már háttérzajtól mentesek. A színek az ionok beütésszámait jelzi. A beazonosított magnetoszférikus tartományokat és határfelületeket a 9. ábrán különböző színű vonalak és sávok jelölik. A fejhullám átmenet 04:14-kor (UT) történt (lila vonal), majd a szonda átkerült a magnetoszféra-burokba. A csóva tartományát 04:48-kor érte el (zöld vonal), ahonnan átlépett a semleges lepel régiójába (kék vonalak). Ezt követően (06:46 és 07:01 között) a mágneses csóva hullámzását észlelték (szürke sávok), majd a BepiColombo kb. 14:00-ig a csóvában repült tovább. A STEREO és a SOHO napszondák megfigyelései szerint a BepiColombo ott tartózkodása

idején egy CME (*Coronal Mass Ejection*, koronakidobódás) érte el a Vénuszt, ami megmagyarázza a csóva hullámzó mozgását. Ettől eltekintve a Vénusz indukált magnetoszférájának konfigurációja általánosságban véve megfelelt a korábbi ismereteinknek.

Megemlíthető még, hogy a jelenleg is a Vénusz környezetében tartózkodó japán Akatsuki űrszonda UVI (*Ultraviolet Imager*, ultraibolya felvételeket készít 283 és 365 nm-en) és LIR (*Longwave IR Camera*, termális infravörös felvételeket készít a 8–12 μm -es tartományban) fedélzeti kamerái a gravitációs manőverek idején összehangolt méréseket végeztek a BepiColombo PHEBUS and MERTIS detektorai-val, valamint egyidejűleg földi észlelések is történtek.

KOORDINÁLT ÉSZLELÉSEK AZ INTERPLANETÁRIS TÉRBEN

Jelenleg több űrszonda tartózkodik a belső Naprendszerben, melyek közül némelyik már hosszabb ideje végez méréseket, mások azonban még küldetésük elején járnak (Parker Solar Probe, Solar Orbiter, BepiColombo). A közelmúltban már több alkalommal lehetőség nyílt szoláris eseményekre vonatkozóan a Naprendszer különböző pontjaiban tartózkodó űrszondák által mért adatok összevetésére, illetve a jövőben is terveznek ilyen mérési kampányokat [13]. Ezáltal jobban megérthetjük a napszélben terjedő struktúrák térbeli és időbeli fejlődését.



10. ábra: A 2020. június 23-án észlelt CME esemény. (a) WSA/THUX háttér napszél a szoláris egyenlítő síkjában, illetve (b) egy meridionális síkban a Föld hosszúságán (2020. június 27-én, 01:00 UT-kor) (c) STEREO-A H11/2 Jmap, a CME-ről készült H11 felvételekkel. A (d) panelen a Parker Solar Probe (felső), a BepiColombo (középső), valamint a Wind (alsó) űrszondák in situ mágneses-tér-mérései láthatók [14]

Egy öt űrszondát (Solar Orbiter, BepiColombo, Parker Solar Probe, Wind, STEREO-A) magában foglaló észlelési sorozat 2020 áprilisától kezdődően egy 1 éves intervallumot ölelt fel [14]. A tanulmány szerzői a STEREO-A helioszférikus képalkotó berendezéseit felhasználva olyan ICME (interplanetáris

koronkidobódás) eseteket kerestek, amelyeknél a belső Naprendszer különböző pontjaiban tartózkodó űreszközök nagyobb szeparáció esetén is in situ észlelhetnék a kifelé terjedő lökéshullámfrontot. Ennek során összesen 17 olyan szoláris eseményt vizsgáltak, amelyek térbeli kiterjedését és evolúcióját minden korábbinál részletesebben lehetett tanulmányozni. Az eredmények felhasználhatók az ICME-k mágneses struktúrájának modellezéséhez, a fluxuscsovek és lökéshullámok interplanetáris térben történő evolúciójának és globális alakzatának megismeréséhez, valamint a szoláris eredetű nagyenergiájú részecskék terjedésének tanulmányozásához. A 25. napciklus csak most kezd erősödni, és az ilyen és ehhez hasonló tanulmányok nagymértékben hozzájárulnak az űridőjárás működésének és hatásmechanizmusainak megértéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Orsini S. et al. (2010): SERENA: A suite of four instruments (ELENA, STROFIO, PICAM and MIPA) on board BepiColombo-MPO for particle detection in the Hermean environment. *Planetary and Space Science*, 58, 166
- [2] Steigerwald B. (2009): Magnetic Tornadoes Could Liberate Mercury's Tenuous Atmosphere, NASA Goddard Space Flight Center. https://www.nasa.gov/mission_pages/messenger/multimedia/magnetic_tornadoes.html
- [3] Broadfoot A.L. et al. (1974): Mercury's Atmosphere from Mariner 10: Preliminary Results. *Science*, 185, 166
- [4] Domingue D.L. et al. (2007): Mercury's Atmosphere: a Surface-Bounded Exosphere. *Space Science Reviews*, 131, 161
- [5] Thomas H. et al. (2011): MESSENGER Observations of the Spatial Distribution of Planetary Ions Near Mercury. *Science*, 333, 1862
- [6] Benkhoff J. et al. (2021): BepiColombo – Mission Overview and Science Goals. *Space Science Reviews*, 217, 90
- [7] Milillo A. et al. (2020): Investigating Mercury's Environment with the Two-Spacecraft BepiColombo Mission. *Space Science Reviews*, 216, 93
- [8] Bebesi Zs. et al. (2020): A BepiColombo űrmisszió mérföldkövei és tudományos célkitűzései a Merkúr bolygónál. *Fizikai Szemle*, 70, 236
- [9] Mangano V. (2021): BepiColombo Science Investigations During Cruise and Flybys at the Earth, Venus and Mercury. *Space Science Reviews*, 217, 23
- [10] Volwerk M. et al. (2021): Venus's induced magnetosphere during active solar wind conditions at Bepi-Colombo's Venus 1 flyby. *Annales Geophysicae*, 39, 811
- [11] Fox N.J. et al. (2016): The Solar Probe Plus Mission: Humanity's First Visit to Our Star. *Space Science Reviews*, 204, 7
- [12] Müller D. et al. (2020): The Solar Orbiter mission. *Astronomy & Astrophysics*, 642, A1
- [13] Hadid L.Z. et al. (2021): BepiColombo's Cruise Phase: Unique Opportunity for Synergistic Observations. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, DOI: 10.3389/fspas.2021.718024
- [14] Möstl C. et al. (2022): Multipoint Interplanetary Coronal Mass Ejections Observed with Solar Orbiter, BepiColombo, Parker Solar Probe, Wind, and STEREO-A. *The Astrophysical Journal Letters*, 924, L6

Az ESA Comet Interceptor üstökösküldetése

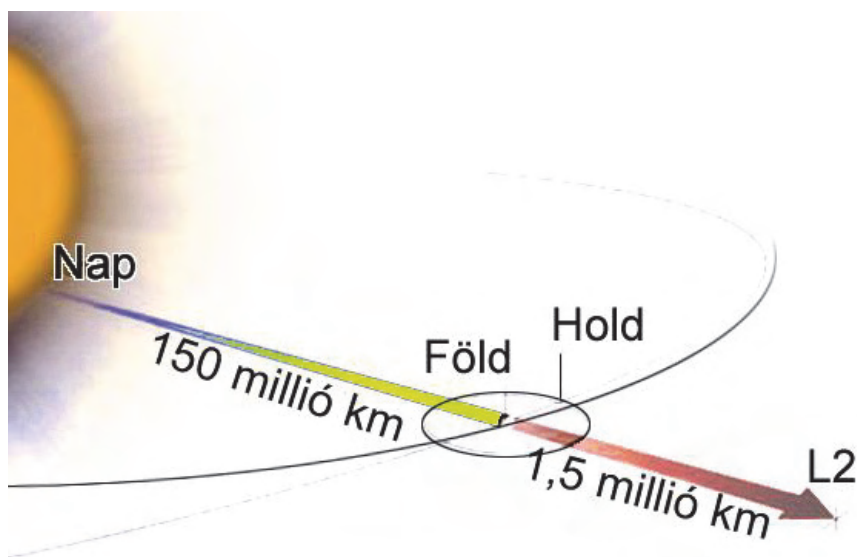
A Comet Interceptor űrszonda (röviden C-I) egy, a Napot elsőként megközelítő üstököst úgy fog megvizsgálni, hogy még a célpont kiválasztása előtt indítják, majd az űrben vár a megfelelő égitest felfedezésére, és ekkor indul el az objektum felé. A szonda több magyar részegységet is visz magával, többek között a kamera Digitális Feldolgozó (és Adatrögzítő) Egységét, amelynek tervezése és készítése itthon történik.

BEVEZETÉS

Az Európai Űrügynökség (ESA) Comet Interceptor űrszondájának feladata egy olyan üstökös meglátogatása, amely az óriásbolygók közötti keletkezését és a távoli üstökösfelhőbe kilökődését követően elsőként jön a Nap közelébe. Felszínének jellemzői és összetétele a Naprendszer őszanyagáról minden korábbinál érdekesebb új ismereteket adhat. Ilyen égitestet még sosem vizsgált űrszonda, hiszen annak felfedezése után alig egy év lenne az űreszköz elkészítésére és felbocsátására. Ennek megfelelően a Comet Interceptor startja után az L₂ Lagrange-pontban fog várakozni, amíg a Vera C. Rubin Observatory Legacy Survey in Space and Time (LSST) távcső fel nem fedez egy kedvező pályán mozgó ilyen üstököst, amelyet a szonda is elérhet (1. ábra).

Kereszturi Ákos¹,
Gross Péter²,
Gutay Gergely²,
Halász Nóra^{4,1},
Magari Zoltán²,
Makkai Hunor²,
Sódor Bálint³,
Tóth Imre¹,
Tróznai Gábor³

¹ELKH CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest
²REMRED Kft., Budapest
³SGF Kft., Budapest
⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, Budapest



1. ábra: A Comet Interceptor vázlatos helyzete az L2 pontban. (Forrás: ESA)

Az F-kategóriájú, vagyis gyors (F: *fast*) Comet Interceptor küldetés maximálisan 150 millió euró költségű (a felbocsátást kivéve), az Ariel űrtávcsővel együtt 2028-ban vagy 2029-ben egy Ariane-62 hordozórakétával indul a kourou-i űrkikötőből (Francia Guyana). Fő nehézsége, hogy a célpont és a találkozó paraméterei még nem ismertek, noha már most kell az űrszonda műszerezettségét és a megfigyelési rutinokat megalkotni. A randevúra akár 70 km/s találkozási sebesség mellett is sor kerülhet (a Giotto-szondáéhoz hasonló porpajzs védi az űreszközt), előre ismeretlen pályaelemek mellett [2]. A szonda a várakozással maximum 5 évet tölthet az űrben, ha addig nem akad neki ideális célpont, akkor valamely korábban ismert űstököst látogat meg. De szerencsés esetben a cél égitest akár egy csillagközi űstökös is lehet, amely éppen áthalad a Naprendszeren.

A megfigyelések a kóma és a mag jellemzőit két helyről is követik: a fő egység és egy japán CubeSat végzi a méréseket. A magyar szerepvállalás az űrszondánál az optikai kamera Digitális Feldolgozó (és Adatrögzítő) egységének tervezése és készítése (REMRED Kft., SGF Kft., ELKH CSFK Csillagászati Intézet), a hőszigetelés tervezése és készítése (ADMATIS Kft.), valamint a plazmafizikai műszerek esetében (ELKH Wigner Fizikai Kutatóközpont) zajlik.

AZ ŰSTÖKÖSÖK SZEREPE A NAPRENDSZER MEGISMERÉSÉBEN

Az űstökösök a Naprendszer őseredeti, primitív, vagyis egyszerű felépítésű kis égitestei, amelyek szinte még érintetlenül őrzik a bolygórendszerünk kialakuláskori fizikai-kémiai viszonyok lenyomatát, beleértve az illékony komponenseket is, „konzerváltak” azt és így szinte „időkapszulák” a Naprendszer kialakulásának megismerésében. A tudomány történetében az űstökösök vizsgálatának öt korszakát, fejezetét lehet megkülönböztetni. Ezeknek a korszakoknak a kiemelkedő eseményeit, mérföldköveit foglalják össze magyar nyelven megjelent írárok [3-5]. Az űstökösök űreszközökkel, űrtávcsövekkel, helyszíni (in situ) vizsgálatokat végző űrszondákkal folytatott vizsgálatai jelentik az űstökösök megismerésének *ötödik korszakát*, amely a mai napig is tart. Most ennek, a legfontosabb, az űstökösökről legtöbb információt adó korszak részének, az űstökösök helyszíni űrszondákkal történő közvetlen közeli helyszíni vizsgálatának egy következő állomását, az ESA Comet Interceptor küldetése előkészítésének eddigi fejleményeit ismertetjük.

A C-1 küldetés célja egy, az Oort-féle űstökösfelhőből a belső Naprendszerbe érkező dinamikailag új űstökös (*Dynamically New Comet*, DNC) magja közelében történő elrepülés (*flyby*) során az űstökös magjának, kómájának, valamint a megközelítési, illetve távolodási szakaszon a gáz és csóvájának tanulmányozása. Eddig ugyanis ilyen típusú űstököst még nem vizsgálhattunk közelről, így tehát a C-1 egy újabb mérföldkö lehet az űstökösök, és ezzel a Naprendszer megismerésében, valamint általa közelebb juthatunk a bolygórendszerünk keletkezési körülményeinek megértéséhez.

AZ ŰSTÖKÖSÖK TÍPUSAI A PÁLYA ALAPJÁN – FORRÁSVIDÉKEK A NAPRENDSZERBEN

Az űstökösök pálya szerinti osztályozására az égi mechanikai kör korlátozott háromtest-probléma (KKHTP) Tisserand-paramétere [6] a legalkalmasabb. A Tisserand-paraméter (vagy Tisserand-invariáns) csak a kör korlátozott háromtest-probléma égi mechanikai modell keretében létezik, mely a nagybolygó (például a Jupiter) pályájára körpályát tételez fel, ami megszorítás a nagybolygó pályájára. A Jupiter pályája közel kör

alakú, excentricitása 0,048 és az óriásbolygó a nagy tömegével dominálja a kis égitestek mozgását, vagyis a Jupiterre vonatkozó Tisserand-paraméter (T_J) jól alkalmazható a kis égitestek pálya alapján történő osztályozására. A Tisserand-paraméter a Jupiterhez való kötődés alapján az üstökösök egy korszerű, égi mechanikai alapon történő osztályozását teszi lehetővé, amelyet Levison munkája [7] mutat be. Régebben ugyanis az üstökösöket a pályájuk szerint a Nap körüli keringési idők alapján sorolták be: a 20 évnél rövidebb periódusúakat rövid keringési idejűeknek, 20 és 200 év közöttieket közepes (átmeneti) keringési idejűeknek, illetve a 200 évnél hosszabbakat hosszú keringési idejűeknek nevezték, a Naprendszer belső térségeit először meglátogató hosszú keringési idejűeket pedig dinamikailag új üstökösöknek.

Tehát a régebbi osztályozásban a Nap körüli keringési idő alapján önkényesen éles határok szerint sorolták rövid, hosszú periódusú, valamint dinamikailag új üstökösök osztályaiba az üstökösöket, de a Levison-féle taxonómia az égi mechanikai KKHTP alapján egy megalapozottabb klasszifikációt tesz lehetővé. Amikor $T_J > 3$, nincs erős csatolás a Jupiter és a kis égitest között és a kis égitest pályája nem metszi a Jupiter pályáját. A főv kisbolygóra Jewitt és mások definíciója [8] alapján $a < a_J$ és $T_J > 3,08$ (elméletileg 3, de a határesetben a pályaelemek miatt tolerancia limit kell, ezért a határ 3,08). A kentaurok esetében $T_J > 3$ és a kentaurok precíz definícióját [9] adta meg, e szerint $q < q_J$ és $a < a_N$, ahol $q_J = 5$ csillagászati egység (CSE) a Jupiter perihélium távolsága és $a_N = 30$ CSE a Neptunusz pályájának fél nagytengelye. Ilyen például az üstökösaktivitást mutató 2060 Chiron kentaur, valamint a kentaur-ekliptikai üstökös átmeneti objektum, a 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (29P/SW1) pályája.

A Jupiterre $T_J = 3$. Amikor $T_J \approx 3$, akkor nagyon erős a Jupiter hatása, nagyon erős a csatolás, mint például a Jupiter trójai kisbolygói és még a 2P/Encke-üstökös esetében is, amelyre $T_J = 3,026$ (itt lényegében 3-hoz még nagyon közeli a T_J) és $a < a_J$.

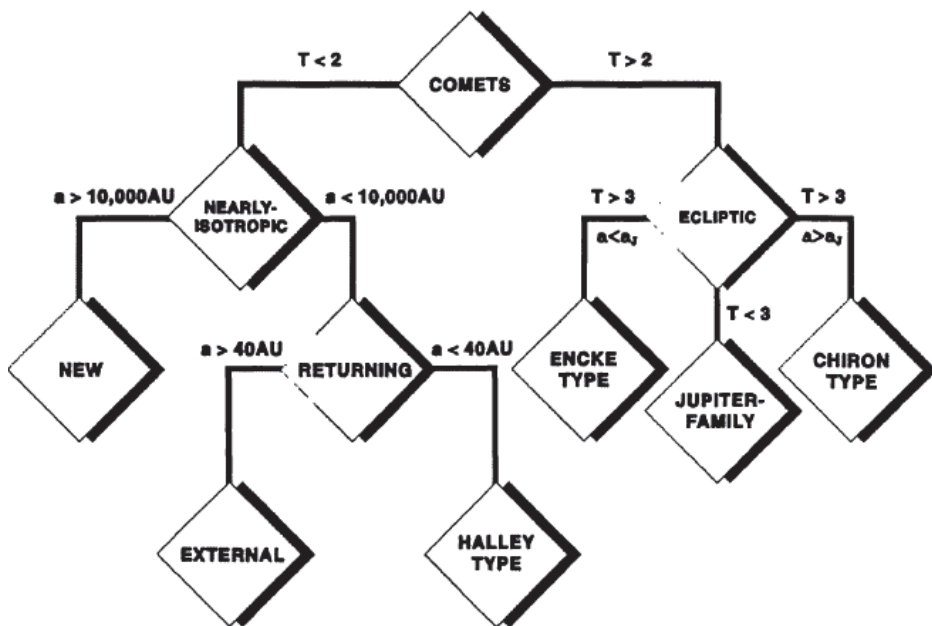
A $2 < T_J < 3$ tartományban nagyon erős a Jupiter hatása és ebbe a paramétertartományba esik a **Jupiter üstökös-családja (Jupiter Family Comets, JFC a szakirodalmi elnevezésük)**. A rövid keringési idejű és a földpálya síkjához kis pályahajlású pályán keringő Jupiter-család üstökösein kívül az Encke-üstökös és a hozzá hasonló pályájú üstökösök is az Ekliptika síkjához közel keringenek. Az Encke-üstökös Tisserand-paramétere (közelítőleg 3,03) a Jupiter-család Tisserand-paraméter-tartományának felső határához nagyon közeli, ezért az Encke-üstökössel kibővített Jupiter-családot ekliptikai üstökösöknek (*Ecliptic Comets*, ECs) nevezzük. Tehát az ekliptikai üstökösök = JFC + Encke-típusú üstökösök. Az ekliptikai üstökösök tanulmányozása a közelmúltban és a jövőben is ezekhez az üstökösökhöz indított és indítandó helyszíni űrszondák küldetésének célja volt és lesz, illetve nagy földi teleszkópok, valamint űrtávcsövek is megfigyelték és megfigyelik majd ezeket.

A $T_J < 2$ Tisserand-paraméterűek a **közel izotróp (Nearly Isotropic Comet, NIC) pályaeloszlású üstökösök**, mint például a Halley-üstökös családja, illetve az Oort-felhő üstököse. Az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösöknek retrográd pályája is lehet és ezeknek a Tisserand-paramétere negatív, mivel pályahajlásszögük (i) az Ekliptikához és a Jupiter pályasíkjához $90^\circ < i < 180^\circ$, vagyis $\cos i < 0$. Az üstökösök pályatípusainak mai modern, a Tisserand-paraméter segítségével történő osztályozása kiküszöböli a régebbi, a keringési időn alapuló – bár megfigyelési tapasztalatokon alapuló, de mégis csak önkényes – felosztását és a KKHTP keretében égi mechanikailag megalapozottabb taxonómiát tesz lehetővé. Megjegyezzük, hogy az Oort-felhőben nem csak klasszikus üstökösök vannak (becsült számuk mintegy 200 milliárd), ha-

nem mintegy 8 milliárd kisbolygó is (számarányuk 4%), amelyeket az ősi Naprendszerben a jeges-poros, kigázosodásra alkalmas űstökösmagokhoz hasonlóan az óriásbolygók szórta ki az Oort-felhőbe.

A közel izotróp (NIC) űstökösök két nagy csoportra oszthatók: (1) amelyek pályája fél nagytengelye tízezer csillagászati egységnél nagyobb, ezek valójában a dinamikailag új űstökösök („New” vagy DNC csoport) és ezek egyike lenne a C-1 küldetés célűstököse, illetve (2) a visszatérő csoport, amelynek még két alcsoportja van. A visszatérő (*returning*) alcsoport űstökösei pályájának fél nagytengelye 40 CSE-nél nagyobb, ezek a külső (*external*) csoportba tartoznak, illetve amelyek pályájának fél nagytengelye 40 CSE-nél kisebb, ezek a Halley-típusúak, amelyek közé a névadójuk, az 1P/Halley-űstökös is tartozik.

A Tisserand-paraméterrel, mint a dinamikailag különböző űstököstípusokat megkülönböztető paraméterrel összefüggésben megemlítjük, hogy az űstökösök eredetére, naprendszerbeli származási



2. ábra: űstökös taxonómia: az űstökösök pálya szerinti osztályozása ($T=T_J$; a a Jupiterre vonatkoztatott Tisserand-paraméter, a , a_J rendre az űstökös és a Jupiter pályájának fél nagytengelye [7])

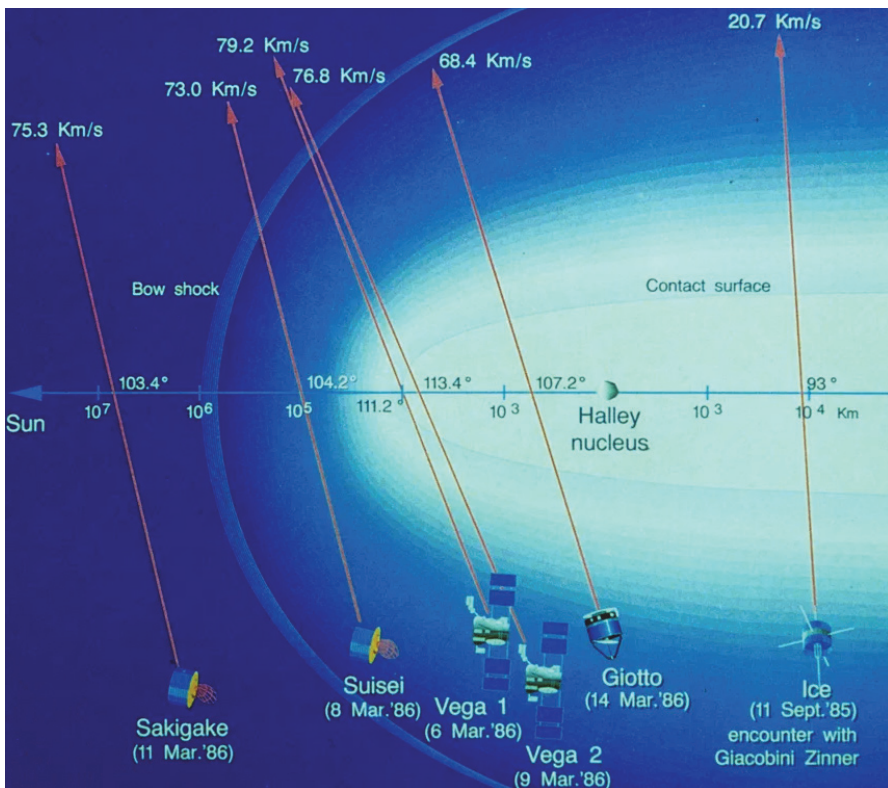
helyükre, forrásvidékeire nézve csak a 20. század közepén alakultak ki az első, ma is elfogadott elképzelések. Így tehát az ekliptikai űstökösök a Kuiper-övből származnak, a dinamikailag új (DNC) és visszatérő (external, illetve Halley-típusúak) forrásvidéke az Oort-felhő.

ŰRSZONDÁK A HALLEY-ŰSTÖKÖSNÉL 1986-BAN

Röviden eleveintsük fel, hogy az űstökösöket milyen helyszíni űrszondák tanulmányozták eddig közelről. Az űstökösök titkainak a valóban részletes megismerésében a legjelentősebb lépés az űstökös-

magok űrszondákkal közvetlen közelről történő első vizsgálata volt. Az űstökösök in situ vizsgálata 1985/1986-tól, a Halley-űstökös magjának űrszondákkal közvetlen közelről történt meglátogatásával vette kezdetét és ez a korszak ma is tart. Bár ezt a sort a 21P/Giacobini-Zinner-űstökös (21P/G-Z) NASA ICE (ISEE-3) szondája által történt még korábbi, közeli plazmafizikai vizsgálata nyitotta meg, és ez a szonda később a Halley-űstököstől nagyon távol a bolygóközi plazmát vizsgálta, amikor a többi Halley-szonda közelről vizsgálta az űstököst. Mivel az ICE szondán képfelvevő nem volt, így nem készíthetett közeli képeket sem a 21P/G-Z, sem a Halley magjáról. Végül is az első közeli űstökösmag-felvételeket a „Halley Armada”, vagyis a szovjet-nemzetközi VEGA-1 és -2, az ESA Giotto szondái készítették el, továbbá a japán ISAS Sakigake („Úttörő”), Suisei („Űstökös”), valamint távolról a NASA ICE, Pioneer-7, valamint a Pioneer-Venus Orbiter űrszondák vizsgálatai is alapvetően új ismereteket adtak az űstökös és bolygóközi tér kölcsönhatásainak részleteiről.

A Halley-űstökös mellett elrepülő (flyby) űrszondák küldetésével 1986-ban a tudomány történetében először készültek közeli felvételek egy addig csak messziről látott égitest, egy űstökös magjáról a VEGA-1 és -2, valamint a Giotto űstökösszondák képfelvevő kamerái által. A VEGA szondák televíziós képfelvevő rendszere, szoftvere, valamint az optikai és fotometriai kalibrációja a magyar fővallalkozásban készült az



3. ábra: A „Halley Armada” űrszondái találkozása a Halley-űstökössel 1986-ban. Az űstökös magjától mért távolság (logaritmus skála) és a találkozási sebességek is fel vannak tüntetve. (Forrás: ESA)

akkori MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetében (RMKI, ma ELKH Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézet), a fedélzeti adatgyűjtő egysége pedig KFKI-BME együttműködésben készült [12]. VEGA-1 1986. március 6-án mintegy 8889 km-re közelítette meg az űstökös magját, majd a VEGA-2 március 9-én 8030 km-es legközelebbi távolságban repült el a magtól. A Giotto 1986. március 14-én 596 km-re közel repült el az űstökös magjától. A relatív sebesség az űstökös magtól való legkisebb távolság elérése idején a VEGA-1 esetében 79,2 km/s, a VEGA-2 estében 76,8 km/s, a Giotto-szondánál 68,4 km/s volt (3. ábra). Ezek a nagy sebességek előrevetítik, hogy a tervezett C-1 és egy Oort-felhőből érkező űstökös találkozásokor legalább ekkora, de inkább még nagyobb találkozási sebességek várhatók, sőt, egy esetlegesen a csillagközi térből érkező kis égitesttel való találkozáskor akár 100 km/s-nál is nagyobb lehet a relatív sebesség. Ez mindenképp nagy kihívást jelent a C-1 szonda programjának megtervezésében, valamint a szonda teste és annak porvédő pajzsa tervezésében.

Már a Halley-űstökössel való találkozás megmutatta, hogy a Nap körül egy direkt irányban keringő űrszonda egy retrográd pályán keringő űstökössel való találkozása milyen nehézséget okoz: (1) nagy a találkozási sebesség (relatív sebesség), (2) az űstököshöz való legkisebb pályaszakasz igen rövid (nagyon gyorsan végbemegy a találkozás), ezért nagyon gyorsan kell a detektorokat kiolvasni és az adatot rögzíteni, a kamerák cél felé irányítása és célon tartása speciális igényekkel jár, (3) az űstökösről eredő porszemcsékkel való ütközés kárt okozhat a szondában, napelemekben és a műszerekben, sőt ki is billentheti a szondát az eredeti forgásállapotából, illetve a nagy hatótávolságú antennáját a Föld irányából.

A VEGA űrszondák magyar kutatók által létrehozott eredményei a nemrégiben elhunyt Szegő Károly (1943–2022) úrfizikus, a KFKI RMKI tudományos igazgatója koordinálásával jöttek létre. A nagyobb összefoglaló munkákban nem csak az űstökös magról szerzett új ismeretekről van szó, hanem az űstökös semlegesgáz-, plazma- és mágneses környezetéről, valamint a napszél-űstökös kölcsönhatásról is. Ezzel kapcsolatban is sok jelentős magyar eredmény született, hiszen a VEGA szondák fedélzetén lévő energikusrészecske-detektor (TÜNDE-M), plazmadetektor (PLAZMAG-1) jelentős magyar részvétellel készült az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézetében, illetve a magnetométer mérési eredményei is rendelkezésre álltak. A semleges gáz molekuláinak eloszlásáról és kinematikájáról az MTA KFKI RMKI-ban, valamint a nagy görbületes sugarú lökéshullámfronton (*bow shock*) kívül detektált nagyenergiájú ion-fluxus (pick-up ionok) kimutatásáról születtek egyedülálló eredmények. Az űstökös környezetében végbemenő részecskegyorsítási folyamatok megértéséhez magyar úrfizikusok eredményei jelentősen hozzájárultak.

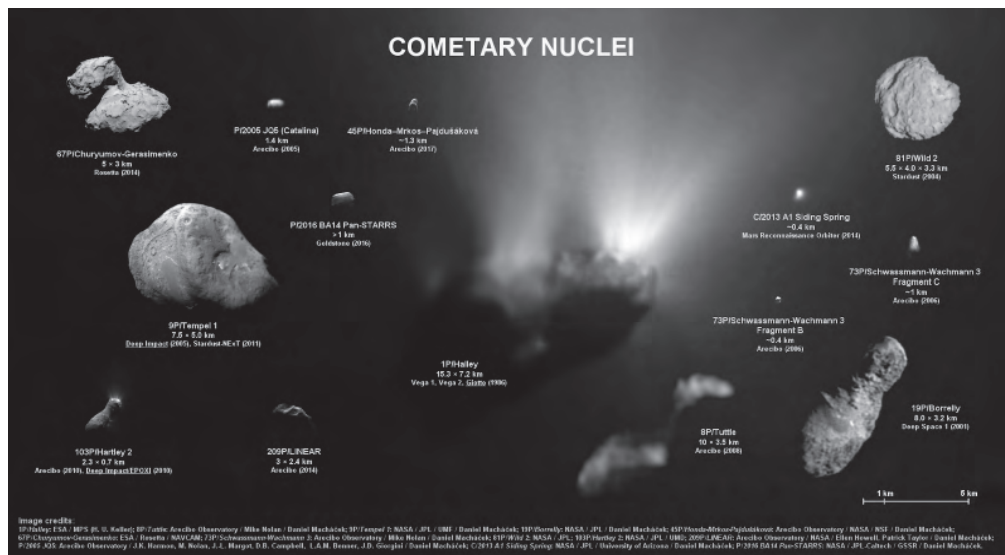
AZ ŰSTÖKÖSÖK HELYSZÍNI ŰRSZONDÁS VIZSGÁLATA A HALLEY UTÁN

Érdemes röviden visszatekinteni, hogy a Halley-űstökös után milyen helyszíni űrszondás vizsgálatok voltak, hogy ezeknek az eredményeivel majd összevethetők legyenek a tervezett C-1 küldetés eredményei. Azt is ki kell emelni, hogy több in situ űstökös-küldetés előkészítésében, illetve az egyes műszerek, berendezések elkészítésében jelentős és nemzetközileg elismert munkát végeztek magyar szakemberek, ami a jövő űrprogramjaiban való magyar részvételt is megalapozta (pl. NASA Deep Space-1, NASA Deep Impact, Hubble- és Spitzer-űrtávcsövekkel történt megfigyelésekkel előkészítve, ESA Rosetta + Philae leszállóegység).

A Halley-üstökössel való találkozása után ez idáig csak ekliptikai űstökösöket látogattak meg közelről űrszondák. Az ESA Giotto-űrszondája 1992-ben a 26P/Grigg-Skjellerup-üstökös közvetlen közelében végzett méréseket, de addigra sajnos már nem működött a képfelvévő rendszere, így az űstökös magjáról nem készülhettek közeli felvételek. Ezután kilenc évet kellett várni a következő űrszonda-üstökös közvetlen közeli találkozásra. Az első ionmeghajtású űrszonda, a NASA Deep Space-1 űrszondája 2001-ben a 19P/Borrelly-üstökös magjától mintegy 2200 km-re repült el. Ez volt a második űstökös, amelynek magjáról közeli részletes felvételeket sikerült készíteni. Az első pormintát egy űstökös kómájából a NASA Stardust űrszondája gyűjtötte be a 81P/Wild-2-üstökös magjától 237 km-re. A 2004. január 2-án történt elrepülése során gyűjtött mintát kapszulájában eljuttatta a Földre, laboratóriumi vizsgálatok céljából.

A NASA Deep Impact űrszondája egy aktív űrkísérlet volt, amelynek során egy 370 kg-os réztömböt navigáltak a 9P/Tempel-1-üstökös magjába mintegy 10 km/s sebességgel, abból a célból, hogy az ütközés következtében kidobódott űstökösanyagot, valamint a becsapódási alakzatot (krátert vagy mélyedést) tanulmányozni lehessen. A becsapódás 2005. július 4-én történt. Ez volt az első ember készített tárgy, amely egy űstökös mag felszínét elérte, becsapódott. A szonda továbbhaladó része mintegy 500 km-re közelítette meg az űstökös magját és a kidobott anyagfelhő elemzése lehetővé tette a mag felszín alatti néhány száz méteres rétegeből származó űstökösanyag összetételének meghatározását. A Deep Impact idején a Tempel-1-üstökös felszínén kialakult mesterséges becsapódási alakzatot elfedte a becsapódáskor felszabadult optikailag átlátszatlan por- és gázfelhő, illetve a továbbhaladó szondáról a rálátás rövid idő alatt a becsapódási hely a mag túlsó oldalára került és a képfelvévő rendszer már nem láthatta. A keletkezett becsapódási alakzatot a NASA Stardust űrszondája új programja, a Stardust-NexT (*Stardust - New Exploration of Tempel 1*) keretében.

Az űstökös magok közvetlen közelről történő kutatásának következő mérföldköve az ESA Rosetta űstökösprogramja, amelynek során az űrszonda mintegy tíz évig tartó bolygóközi út után 2014. augusztus



4. ábra: Az eddig meglátogatott űstökös magok összehasonlítása. (Forrás: Bruce Murray Space Image Library)

6-án pályára állt annak magja körül és a tervek szerint több mint egy évig folyamatosan megfigyelte, követte az űstörökűsmag aktivitásának alakulását a Naphoz közeledő pályaszakaszon. A program Philae elnevezésű leszállóegysége pedig 2014. november 12-én – bár némi viszontagságok, visszapattanások után, de simán – leszállt az űstörökűsmag felszínére és ott helyszíni méréseket végzett, illetve képfelvételeket készített [10-15].

A Rosetta 1993-tól az ESA Horizon 2000 programja bolygókutatási sarokkő küldetése lett. A Rosetta program megvalósításában az ESA-n kívüli országok és űrkutatási szervezetek kutatói, mérnökei, mint például a NASA intézményei, kutatói, mérnökei is részt vettek. A Rosetta űstörökűsprogramban, elsősorban a Philae leszállóegység legfontosabb berendezései és műszerei elkészítésében magyar mérnökök és kutatók is szerepet vállaltak. A Philae hibatoleráns központi vezérlő és adatgyűjtő számítógépét az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont (korábban KFKI RMKI) Űrtechnikai Laboratórium Számítógép Fejlesztési Osztály, illetve az SGF Kft. mérnökei fejlesztették ki. A Philae leszállóegység fedélzeti számítógépének közvetlen tervezésén és fejlesztésében közreműködött magyar mérnökök és kutatók: Baksa Attila, Balázs András, Bogdány János, Hernyes István, Pálos Zoltán, Spányi Péter, Sulyán János, Szalai Sándor, Szegő Károly, Várhalmi László és Vízi Pál. A leszállóegység elektromos tápellátó rendszere a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék Űrkutató Csoportjának jelentős közreműködésével készült Szabó József vezetésével – a csoport munkatársai Bánfalvi Antal, Csurgai-Horváth László, Kertész József, Rieger István, Szabó József és Rieger István voltak. A BME Mechatronikai Optikai és Gépészeti Informatikai (MOGI) Tanszék tudományos munkatársa, Kovács Gábor a Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung kutatóintézetében részt vett a Rosetta kameráinak optikai kalibrációjában. E cikk szerzői közül pedig Tóth Imre a francia Marseille-i Asztrofizikai Intézet (LAM/CNRS) munkacsoportjában vett részt az OSIRIS kamerák által készített képfelvételek feldolgozásában. A Philae SESAME-DIM por-detektora és ROMAP-SPM plazma-detektora fejlesztésében és megépítésében, illetve ezek földi kalibrációjában és tesztelésében, valamint a DIM földi ellenőrző rendszerének megépítésében, továbbá az ezekből kapott mérési adatok



5. ábra. A Comet Interceptor szonda idealizált fantáziaképe egy nagy űstörökűssel a Föld közelében. (Forrás: ESA)

kiértékelésében az MTA Energetikai Kutatóközpont (korábban KFKI AEKI) mérnökei és kutatói, Hirn Attila és Zábori Balázs vettek, illetve vesznek részt Apáthy István vezetésével [10].

Az űrkutatás történetében egyedülálló magyar mérnöki teljesítmény, az ESA Rosetta űrszondája leszállóegységén megépült műszerek elkészítése során végzett, kiemelkedő munkája elismeréseként Apáthy István, Balázs András és Bánfalvi Antal 2015. március 15-én megosztva megkapta a magyar állam legmagasabb tudományos kitüntetését, a Széchenyi-díjat.

A C-I SZONDA LEHETSÉGES CÉLOBJEKTUMAI TUDOMÁNYOS JELENTŐSÉGE

Az helyszíni űrszondákkal végzett eddigi vizsgálatokból is meglepő az, hogy mennyire sokfélék az üstökösök. Ez a sokféleség, diverzitás a magok méretének, alakjának és felszínének és más fizikai jellemzőinek nagyfokú különbözőségében, eltérésében nyilvánul meg. Több kérdést kell még megválaszolni az üstökösökkel és a velük szoros kapcsolatban levő más, egyszerű felépítésű kis égitestekkel kapcsolatban a jövő csillagászati és űreszközökkel történő vizsgálatai által. Például hogyan „működik” egy üstökös, ugyanis az üstökösaktivitás mechanizmusának részletei ma még nem vagy csak kevésbé ismertek. Hogy néz ki egy üstökös belseje, miért térnek el oly nagy mértékben egymástól az üstökösök? Az is érdekes lehet, hogy a ma ismert fő forrásvidékek (Oort-felhő, Kuiper-öv) mennyire eltérő fizikai és kémiai tulajdonságú üstökösöket tartalmaznak, sőt az is felmerül, hogy lehetnek-e Naprendszeren kívülről érkezett, tehát valahol máshol keletkezett üstökösök. A kisbolygók főövének üstökösei ott helyben keletkeztek-e vagy a külső Naprendszerből vándoroltak oda? Ha helyben alakultak ki, akkor pedig az aktivitásnak mi lehet a mechanizmusa és mennyiben tér az el a klasszikus üstökösök aktivitásától, egyáltalán hogy néz ki egy fővi üstökös belseje? Az is a közeljövő nagy átvizsgáló programjainak az egyik feladata, hogy feltérképezzék a Neptunuszon túli öveget, a belső és külső Oort-felhő háromdimenziós (térbeli) szerkezetét.

Az eddig üstökösöket közelről vizsgált űrszondák egy kivétellel ekliptikai üstökösöket vizsgáltak, csak egy esetben, a Halley-üstökös esetében volt példa egy Oort-felhővel kapcsolatos üstökös közeli tanulmányozására – bár az 1980-as évek technológiai szintjén készült, akkor csúcstechnikájának számítóműszerekkel. A 2020-as években azonban már fejlettebb eszközök állnak rendelkezésre üstökös-küldetések számára. A Nap közelébe először érkező, tulajdonképpen az Oort-felhőből milliárd évek múlva visszaérkező üstökösök megismerésének igénye azt követeli, hogy az eddig közelről még nem tanulmányozott, az Oort-felhőből érkező dinamikailag új (DNC) üstökösök közeli tanulmányozását is elkezdjük. Sőt, 2017-től kezdve egy új, addig nem ismert kiségitest-típus is felbukkant, amelyet szintén meg kellene közelebbről ismerni: a csillagközi térből érkező és a Naprendszeren átszáguldó üstökösök, illetve kigázosodást (szublumációt) nem mutató, a Naprendszer kisbolygóira hasonló kis égitestek. Az első ilyen azonosított apró égitest volt a 2017-ben felfedezett 11/’Oumuamua („Elsőnek érkező távoli hírnök” – a Hawaii-szigetek őslakói nyelvén), majd pedig a 2018-ban felfedezett, valódi üstökös-ként viselkedő 21/Borisov. Tehát egy soron következő üstökös-kutató űrszondának kétféle célobjectuma lehet: (1) az Oort-felhőből érkező objektum, illetve (2) egy, a csillagközi térből érkező, más csillag körül kialakult, de onnan elszökött (kidobódott) kis égitest, amely hosszú idő óta a Tejútrendszerben mozog és időnként egy-egy csillag közelébe kerül.

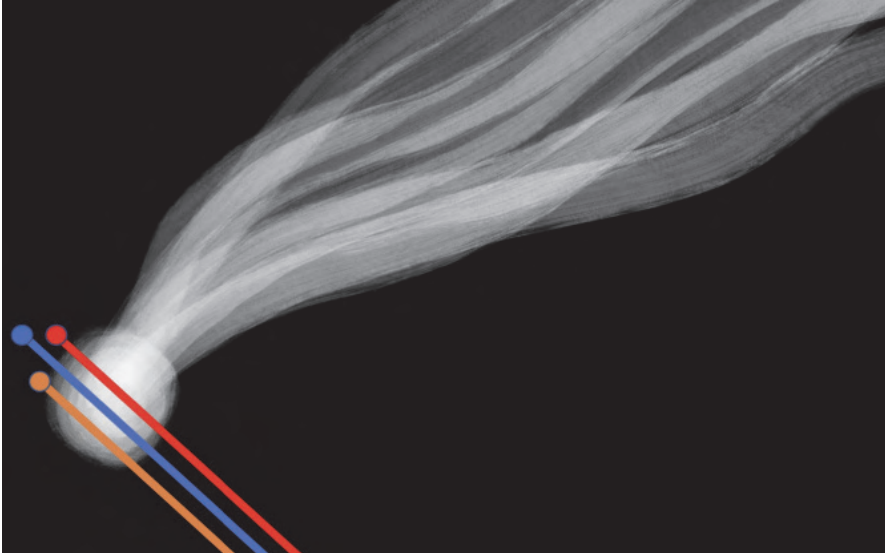
Az Oort-felhőből érkező űstököst vagy esetleg a csillagközi térből érkező kis égitestet közelről megfigyelő űrszonda miatt, milyen okból, milyen tudományos kérdések megválaszolására indulna útnak?

- 1) Az űstökösök megismerése folytatódna egy ilyen küldetéssel: a kialakulásuk és aktivitási mechanizmusaik megértése, a Nap közelében keringő ekliptikai űstökösök és a távoli Oort-felhőből érkező űstökösök közötti hasonlóságok és különbségek megállapítása, megismerése, magyarázata.
- 2) A Naprendszer kialakulása idejére jellemző őszanyag (különböző gázok fagyott jegei, poranyag) vizsgálata, az ősi Naprendszerben végbement fizikai és kémiai folyamatok megismerése és a hosszú idő alatt végbement különböző evolúciós (fejlődési) folyamatok azonosítása és hatásuk megismerése.
- 3) Mivel a korábbi helyszíni űrszondás űstökösvizsgálatok csak a Nap közelében átalakult, „elfejlődött” (*evolved*: fejlett, *matured*: idősödött) űstökösöket vizsgálták, egy új küldetés által a távoli Oort-felhőben, mint „hűtőszekrényben tárolt” űstökös magot (majd később többet is) lehetne tanulmányozni és összehasonlítani tulajdonságait az ekliptikai űstökösök fizikai és kémiai tulajdonságaival.
- 4) Esetleg más csillag körül kialakult kis égitest közeli vizsgálatával pedig ezek összehasonlíthatók lennének a naprendszerbeli kis égitestekkel, és fény deríthető arra, hogy milyen hasonlóságok és eltérések vannak a Naprendszer és egy más csillag körüli égitestek tulajdonságai és kialakulásuk folyamatai között.

A C-1 KÜLDETÉS VÁRHATÓ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

Mivel a C-1 (6. ábra) elsődleges célkitűzése a tudomány és a Naprendszer kutatása történetében egy, az Oort-felhőből érkező dinamikailag új űstökösnek a közeli megismerése, ezért az ilyen űstökösökről eddig szerzett megfigyelési eredmények alapján már lehet valamit mondani a várható eredményekről, a korábbi ismeretek megerősítéséről. Új, nem várt eredményekről is sejtések fogalmazódhatnak meg. Például az Oort-felhővel kapcsolatos Halley-űstökös közeli űrszondás vizsgálatából már előre sejthető a DNC-k néhány tulajdonsága, de a hasonlóságok mellett több eltérés is lehet a Halley-típusú űstökösök és DNC-k között.

Egy DNC űstökös mag mérete, alakja, forgási tulajdonságai, felszínének színe, kémiai összetétele, a mag felszíni szerkezeti morfológiája az első, ami a képfelvételekből vizsgálható (CoCa). A DNC magok között több nagyméretű (10 km-es vagy annál nagyobb átmérőjű) lehet, az ekliptikai (rövid keringési idejű) űstökösök magjához képest. Míg az ekliptikai űstökösök magjának alakja igen változatos lehet a két testből összetett („kuglibábu”) magtól kezdve (pl. 67P/C-G) a közel gömb alakú „tömzsi” testekig (pl. 9P/Tempel-1), addig a DNC-k között gyakoribb lehet az elnyújtott alakú, illetve két testből összetett „kuglibábu” alakú mag (I. Halley, 8P/Tuttle, vagy a Hale-Bopp-űstökös elnyújtott alakú magja). Az ekliptikai űstökösök méret és alak szerinti különbözősége az evolúció (aktivitási erózió) következménye, és ilyen alapon „fiatal” vagy „idős” kategóriába sorolhatók. Tehát a C-1 szonda valószínűleg egy nagyobb méretű és két kisebb testből összetett vagy elnyújtott alakú űstökös maggal fog találkozni. A DNC-k az Oort-felhőben nem mutattak kigázosodási, tömegvesztési aktivitást és így ezzel összefüggő eróziót, időbeli fejlődést, változást sem szenvednek.



6. ábra. A program tervezésekor született logo, amelyben a három egyenes vonalat a három szondát (köztük a tervezett két CubeSatot) jelképezi. (Forrás: ESA C-1 Mission)

A DNC magok tengely körüli forgási ideje lényegében hasonló lehet, mint az ekliptikai üstökösök esetében. Mivel a DNC-k nem voltak aktívak az Oort-felhőben, ezért a kigázosodással összefüggő nem gravitációs erők nem hatottak (rakétaszerű meghajtás vagy fékezés), így az Oort-felhőbe kikerülés idején megvolt forgásállapotuk megőrződött. A Naprendszer belső terébe való visszatérésük során csak a nagybolygók távolságában kezdődött meg a különböző gázok szublimációja: a szuperillékony szén-monoxid és szén-dioxid jegek a Neptunusz pályája környékén kezdenek kigázosodni, de erejük kicsi a mag forgásállapotának megváltoztatásához, a vízjég pedig mintegy 2,8 CSE-re a Naptól kezd szublimálni, de onnan a napközelség felé eltelő idő rövid ahhoz, hogy jelentős nem gravitációs hatás lépjen fel, így a mag forgó mozgásának paramétereiben nem várható változás.

A megfigyelési statisztikák szerint a DNC magok gyakrabban esnek szét, mint az ekliptikai üstökösöké. Várható, hogy esetleg a C-1 szonda célpontjának kiválasztott üstökös magja épp akkor esik szét, amikor a szonda már úton lesz a találkozás felé. Az is lehet, hogy a felfedezését követően esik szét egy, a C-1 szonda számára alkalmas DNC magja. Mindkét szétesési esetben a szonda pályáját úgy lehet tervezni, hogy biztonságos távolságban közelítse meg a magtöredékeket (a megnövekedett pormennyiség veszélyeztetheti a szondát). Az üstökösrag szétesése a magtöredékek közeli tanulmányozása által bepillantást enged a kis égitest belsejébe, az eredeti mag belső szerkezeti felépítése, őseredeti kémiai összetétele meghatározható lesz, és ezáltal az ősi Naprendszer összetétele is megismerhetővé válhat – legalábbis az üstökösrag kialakulási helyének akkori összetétele. Az eredményekből a DNC és szétesett ekliptikai üstökösragok szerkezeti felépítése és összetétele összehasonlítható lesz.

Jelenlegi tudásunk, a mai paradigma szerint a DNC magok kialakulása az óriásbolygók, vagyis a Jupiter–Neptunusz közötti térségben történt, 5–40 CSE közötti naptávolságban. A Jupiter pályájánál,

közel 5 CSE távolságban az ősköd hőmérséklete mintegy 200 K lehetett, a Neptunusz naptávolságában, közel 40 CSE-nél pedig csak mintegy 30 K. Például az 1990-es évek második felétől kezdve rendelkezésre álló, csúcstechnikájú nagy műszerek és érzékelők lehetővé tették, hogy a Hyakutake (C/1996 B2), Hale-Bopp (C/1995 O1) fényes, vagyis jól megfigyelhető nagy jelet adó űstökösök kémiai összetételét meghatározzuk. Az adódott, hogy ezek az űstökösök a Neptunusz pálya távolságában alakultak ki alacsony (~30 K) hőmérsékleten és onnan dobódtak ki az Oort-felhőbe, majd kerültek ismét napközelségbe a belső Naprendszerben. A C/1999 S4 (LINEAR) űstökös magjának szétválasztásakor részletes megfigyeléseket lehetett végezni – többek között az űstökös belsejének kémiai összetételét is meg lehetett határozni. A C/1999 S4 (LINEAR) DNC szétválasztásakor meghatározott kémiai összetétel a Jupiter-Szaturnusz közötti térségben történt, vagyis magasabb hőmérsékleten végbement kialakulásra utal. Várható, hogy a C-1 szonda által egy DNC közelében végzett kémiaiösszetétel-meghatározásokból, a különböző jegek előfordulásából az űstökös-mag keletkezési régióját, naptávolságát is be lehet majd határolni.

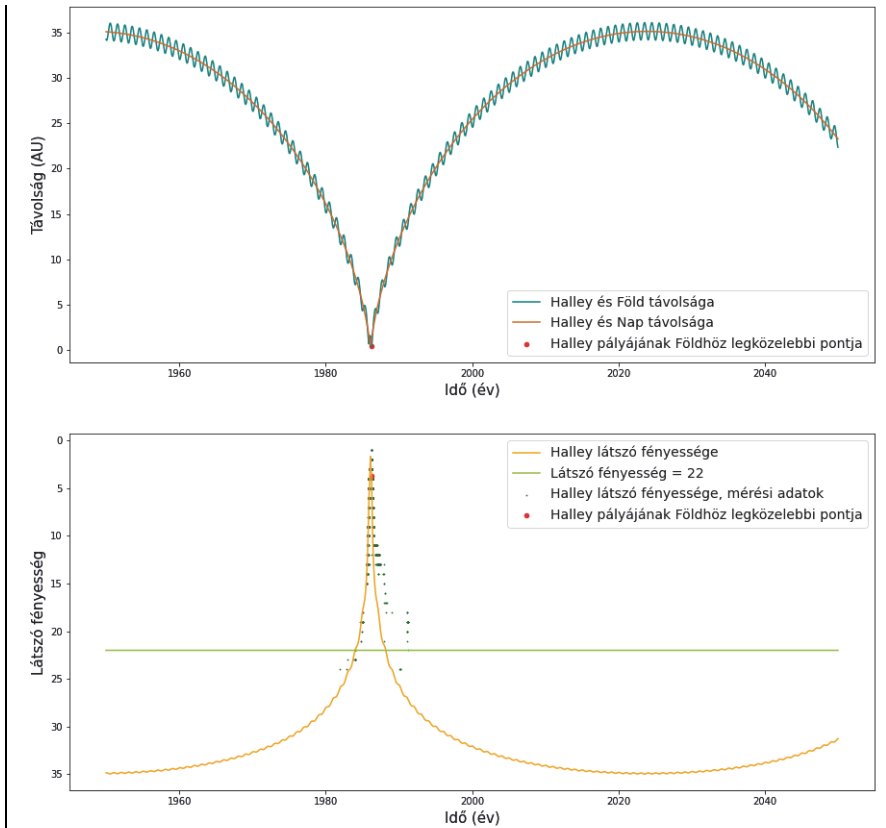
A DNC-k zöme a helioszféra határán túl végzi lassú keringését a Nap körül az Oort-felhőben, ahol a galaktikus kozmikus sugárzás részecskéi milliárd évek óta szabadon bombázzák a mag felszínét, hiszen nem védi légkör vagy mágneses tér a részecskéktől. Ennek hatására az űstökös-mag felszínén a molekulák kötéseit szétbontja a kozmikus sugárzás és sok összetett széntartalmú vegyület alakul ki, mint például aszfaltit vagy más széntartalmú polimerek. A mag felszíne sötét, alacsony fényvisszaverő képességű (albedójú) lesz és színe (a Naphoz képest) a szürkétől a sötét vöröses színig változik. A legnagyobb, 100 MeV – több GeV energiájú kozmikus részecskék a felszín alá több méterig lehatolva alakíthatják a mag anyagát és mintegy 100 millió év alatt létrejön az úgynevezett besugárzással képződött köpeny (*irradiation mantle*), ami főleg az Oort-felhő űstökös-magjaira jellemző. Ezt a köpenyt is részletesebben meg lehet majd ismerni a C-1 szonda közeli felvételein és színképi megfigyeléseiből.

Amennyiben a C-1 szonda egy, a csillagközi térből érkező és a belső Naprendszeren átszáguldó kis égitestet vizsgálna közelről, akkor annak más csillag körüli kialakulási folyamatairól, illetve a hosszú galaktikus útja során ért hatásokról is információt szerezhetünk. Az ilyen kis égitest akár egy katasztrofális ütközés által kidobott törmelék, azaz egy bolygó, hold vagy egy más csillag körül kialakult aszteroida darabja is lehet, vagyis alapvetően kőzet alapú, de lehet klasszikus jeges-poros űstökös is. Mindkét esetben a kis égitest tulajdonságai összehasonlíthatók lesznek a naprendszerbeli hasonló is égitestekéivel. Azonban a kis égitest felszínét hosszú idő alatt Tejútrendszerben megtett hosszú útja alatt jelentős kozmikus részecskesugárzás érte és ennek a felszínt átalakító, eróziós vagy éppen ellenkezőleg, a felszín anyagát összetömörítő hatása volt. Továbbá a felszínt és magának a testnek az alakját a csillagközi tér por- és gázanyagával történt nagy sebességű ütközési kölcsönhatások formálhatták, csiszolhatták. Az ilyen folyamatok következményeit is megfigyelheti majd a C-1 szonda. Továbbá, a 21/Borisov magja a napközelségben szétválasztott – így akár a C-1 szonda más csillag körül kialakult űstököscélpontjának a magja is szétválasztott. Ekkor a mag belsejébe, szerkezetébe, összetételébe is bepillantunk és képet kaphatunk arról, hol, hogyan és miből alakult ki a távolról hozzánk érkezett égi vándor. Például a 21/Borisov egy csillag körüli protoplanetáris korongnak a csillagtól távoli hideg, sok szén-monoxidot tartalmazó külső régiójából származik. Továbbá, a Borisov-űstökös porkómája

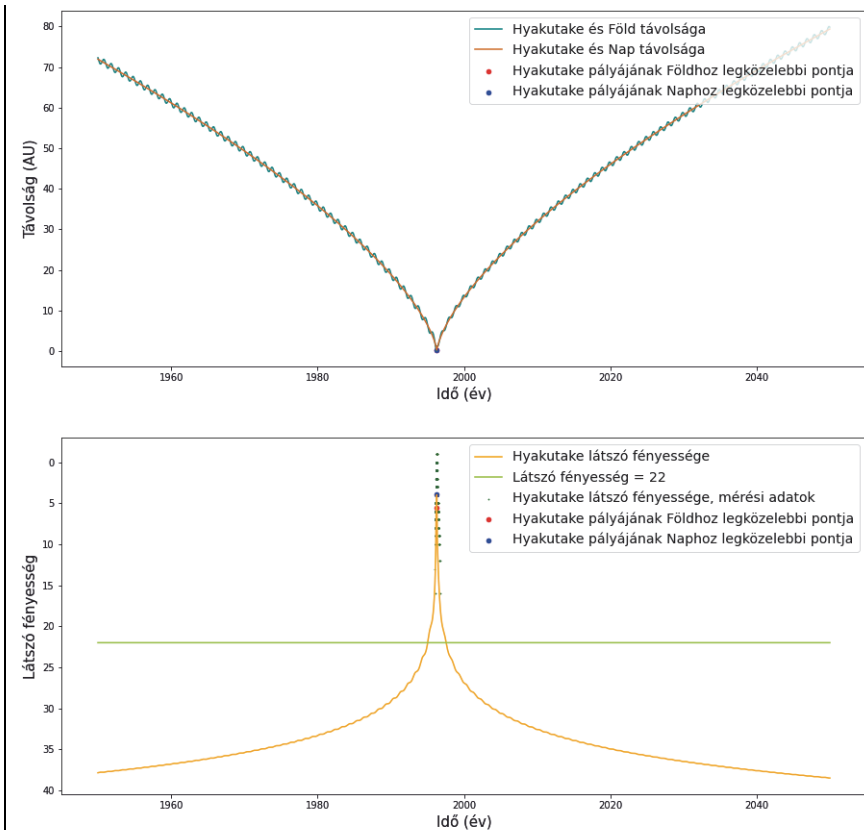
polarimetriailag homogén, ami a kis égitest nagyon egyszerű, őseredeti, szinte átalakulatlan ősi összetételére utal. Egy ilyen égitest pedig igazi csemege lenne a C-1 számára egy más csillag körüli ősi viszonyok megismeréséhez.

MENNYIVEL KORÁBBAN AZONOSÍTHATÓ A CÉLPONT?

Az űrszonda számára ideális űstökös jellemzőinek becsléséhez már ismert űstökösök fényességmenetét érdemes vizsgálni. Ezen belül fontos, hogy a kérdéses égitest mikor lépi át a +22 magnitúdós látszó fényességet, hiszen ekkor válnak megfigyelhetővé földi nézőpontból az LSST számára. Ennek a kiszámításához a python nyelven megírt Skyfield programcsomagot használtunk, Halász Nóra BSc szakdolgozata keretében. Az ebben a programcsomagban található csillagászati adatbázisok közül a Comets elnevezésű megfigyelt űstökösök adatait tartalmazza. Az ezek felhasználásával kapott fényességadatokat összevetve más forrásból származó, valós mérési adatokkal, ellenőrzésképpen láthatjuk, milyen a viszonyuk a mérési adatoknak a számolásainkhoz.



7. ábra: A Halley-üstökös nap- és földtávolsága pályája 1950 és 2050 közötti időszakra (fent), illetve az erre az időtartamra számolt látszó fényessége (folytonos vonal lent), összehasonlítva mérési adatokkal (pontok lent). (Forrás: Halász N.)



8. ábra: A Hyakutake-üstökös nap- és földtávolsága pályája 1950 és 2050 közötti időszakára (fent), illetve az erre az időtartamra számolt látszó fényessége (folytonos vonal lent), összehasonlítva mérési adatokkal (pontok lent). (Forrás: Halász N.)

Elsőnek a Halley-üstökös látszó fényességét vizsgáltuk, ehhez egy a teljes Nap körüli keringési periódusidejét magába foglaló időtartamot néztünk: 1950-től 2050-ig. Minden nap első óráját vizsgálva mérési pontként, ahhoz rendeltünk Naptól és Földtől való távolság adatokat, kiszámolva látszó fényességét. Ehhez felhasználtuk a Halley már említett Skyfield Comets adatbázisában szereplő adatait: g magnitúdó = 4, k magnitúdó = 6. Ezeket használja az ún. g - k magnitúdó modell: a g magnitúdót, mint az üstökös abszolút fényességét, illetve a k magnitúdót, amely az üstökös fényesedési ütemét jellemzi. Ez utóbbi kisbolygok esetén az 1 értéket venné fel, a most vizsgált két üstökös esetén pedig ennél nagyobb értékeket láthatunk. Tehát a Halley esetén a már említett adatokkal való számolás után a 7. ábrán látható grafikonokat kapunk.

A vízszintes sáv jelzi, hogy a Halley-üstökös mikor lépi át a grafikonon is szereplő +22 magnitúdós értéket. Ennek a kezdete: 1984. január 5. és amikor utoljára észlelhető, az pedig 1988. március 21. Ebben a két időpontban az üstökös a Földtől mért távolsága 7,23 és 7,32 CSE, a Naptól pedig 8,19 és 8,16 CSE. Ebben az időtartamban a számolásunk alapján 1986. április 14-én van az üstökös a pályájának Földhöz

legközelebbi pontjában (830 nappal az első észlelés után, 707 nappal az észlelés vége előtt). Ekkor, a Földhöz legközelebbi helyzetében, a Földtől való távolsága 0,39 CSE.

Hasonló módon a Hyakutake-űstökösre (amely kisebb, ezért több égitestet reprezentálhat) is elvégezve ezeket a számításokat, ábrázolva a Naptól és a Földtől való távolságát, a látszó fényességét, a 8. ábrán látható eredmény születik. A Hyakutakének a g és k magnitúdója 10 és 4.

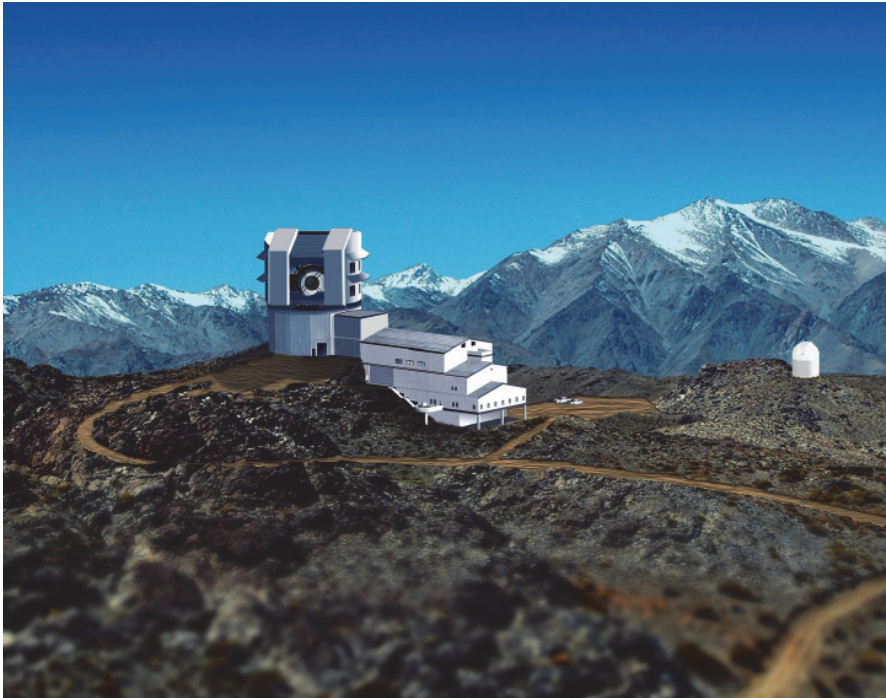
A 8. ábrán a vízszintes sáv itt is azt jelzi, hogy a Hyakutake-űstökös mikor lépi át a grafikonon is szereplő +22 magnitúdó értéket. Az így kijelölt időtartam pedig, amikor érzékelhető: 1995. január 20-tól 1997. július 30-ig. Ennek kezdetén a látszó fényessége 21,99, a Földtől való távolsága 6,29 CSE, a Naptól való pedig 6,30 CSE. A kijelölt időtartam végén ezek a következőképpen alakulnak: a látszó fényessége szintén 21,99, a Földtől 6,13 CSE, a Naptól pedig 6,39 CSE távolságra helyezkedik el. Ezalatt a Földtől mérhető minimális távolsága 0,16 CSE, ami 1996. március 18-án figyelhető meg, 46 nappal az észlelhetőség kezdete után és 74 nappal annak vége előtt.

Látható, hogy a Halley-űstökös, amelynek magja $15 \text{ km} \times 8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ átmérőjű, 830 nappal a földközelség előtt, míg a Hyakutake, melynek magja kb. $4,8 \text{ km}$ átmérőjű, 423 nappal a földközelség előtt válik megfigyelhetővé. Mindez demonstrálja, hogy egy a Naphoz elsőként közel jutó égitest elérésére már az űrben lévő szonda szükséges, igazolva a C-I program szükségességét.

A LEHETSÉGES ÚTVONAL TERVEI AZ L₂-TŐL A CÉLOBJEKTUMIG

A megközelítésre alkalmas célobjektum felfedezése után csak rövid idő áll majd rendelkezésre a célpont eléréséhez. A célobjektum lehet DNC vagy akár egy, a csillagközi térből érkezett kis égitest. Az űrszonda Földről történő elindítása után a Nap-Föld-űrszonda égi mechanikai háromtest-probléma Nap-Föld-félegyenesén levő L_2 Lagrange-pont körüli parkoló pályára kerül, és mint egy űstökös vadász, ott áll „lesben”, várva a kedvező pillanatot (maximum 5-6 évig) és a földi utasítást, hogy űtnak induljon egy frissen felfedezett, dinamikailag új űstökös felé. Az olyan DNC, amely elérhető naptávolságban kerülne a földpálya és a földpálya síkja közelébe, elég ritka, de az L_2 pontban tervezett 5-6 éves várakozási idő alatt a mai statisztika szerint lehet legalább egy alkalmas célűstökös. Egyébként az L_2 pont körüli parkoló pálya úgynevezett halópálya, amely a Nap-Föld- L_2 félegyenes Nap körül forgó (a Föld és az L_2 kering a Nap körül) koordinátarendszerében közel periodikus pálya.

A ma még ismeretlen új űstököst az égboltfelméréseket végző 8,4 méteres tükörátmérőjű LSST távcsövével (Vera C. Rubin Observatórium, korábbi elnevezéssel Large Synoptic Survey Telescope, Chile, Cerro Pachón csúcs, 2715 m tengerszint feletti magasságban, 9. ábra) pár éven belül elinduló felmérése segítségével keresnék elsősorban. Az LSST nagy látómezejű, nagy érzékenyséű csúcstechnikájú detektora elegendően gyorsan letapogatja az égboltot, így egy halvány mozgó objektum az égbolt rendszeres monitorozásával felfedezhető vele és a közelítő pályája is meghatározható. Az eddigi statisztikák szerint a teleszkóp az első 3 évben fel tud majd fedezni a C-I szonda számára elérhető alkalmas objektumot. Persze jó, ha minél hamarabb felfedezik (6-12 hónap időelőnyvel) a lehetséges célobjektumot, hogy a pályáját minél pontosabban meg lehessen határozni, és az űrszonda útját a találkozásig meg lehessen tervezni.

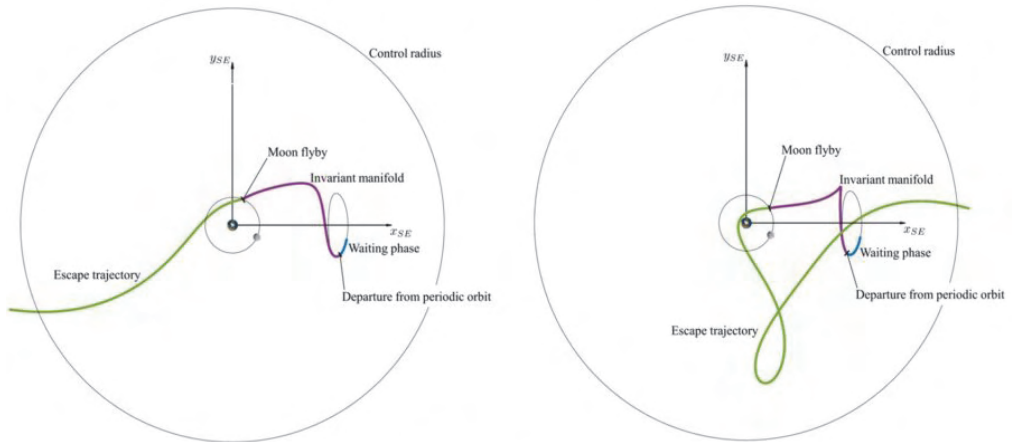


9. ábra: A tervezett LSST fantáziarajza (Forrás: LSST Corporation, LSST Science Book, Version 2.0, November 2009)

Felmerül a kérdés, milyen pályán indítva lehet majd eljuttatni az L_2 pontban parkoló Comet Interceptor űrszondát a célüstököshöz? Ezt a kérdést vizsgálta Joan Pau Sánchez és munkacsoportja [2] a Cranfield Egyetem Légi- és Űrtechnológiai Iskolája keretében (Egyesült Királyság), további angol, spanyol, olasz űrkutatási és csillagászati intézetek kutatóival közös munkában, és találták meg a problémára a választ, ami attól függ, hogy a célobjektum az L_2 ponthoz képest hol metszi a földpálya (Ekliptika) síkját. Tehát a szonda útvonala, útvonalterve attól függ, hogy ez a metszéspont milyen távol van az L_2 ponttól, illetve magától a Föld Nap körüli pályájától (a földpálya félnagy tengelye, a Naptól való közép-távolsága 1 CSE, azaz mintegy 149,6 millió km) (10. ábra).

A találkozásra az űstörökspálya és az Ekliptika metszéspontjai közül a megfelelőbb pont közelében kerülne sor. Csak olyan találkozási pont jöhetne szóba a tervek szerint, amely a Naptól 0,8–1,2 CSE távolságra lenne, vagyis a földpálya közelében. Sánchez és munkatársai az L_2 pont elhagyására két útvonalat határoztak meg annak függvényében, hogy a találkozási pont a Föld keringéséhez képest a Föld előtt, illetve mögötte lemaradva van-e. A pályamanőverekhez hintamanővert is alkalmaznak majd a Hold, illetve a Föld lendítő hatását kihasználva. A Föld elé indításkor csak a Hold hatását használják ki erre, míg a Föld mögé indítva a Hold, majd a Föld hatásait is felhasználják.

A mai nagy teleszkópoknak és érzékeny, nagy látómezejű CCD-kameráknak köszönhetően a Comet Interceptor számára évente akár három megfelelő űstörökscélpont is lehetséges, és a szonda hat évre



Two example comet intercept transfers for interception points below and above 1 AU.

10. ábra: Két példa az űrszonda útjára a találkozó pontjáig. (Forrás: Sánchez és munkatársai, 2021)

tervezett működése során legalább egy elérhető. Ha a szonda tervezett várakozási ideje alatt nem lenne a „láthatáron” dinamikailag új űstörös vagy a csillagközi térből a Föld pályája közelébe kerülő objektum, akkor tartaléknak a már ismert és látványosan magtöredékeire esett 73P/Schwassmann-Wachmann-3 ekliptikai űstörös van kijelölve a 2021-ben érvényes ESA tervek szerint.

A COMET INTERCEPTOR MŰSZEREZETTSÉGE

A szonda teljes tömege 800 kg, ami magában foglalja a testének, berendezéseinek és tudományos műszereinek, valamint a pályamanőverekhez szükséges üzemanyagnak a tömegét. Az energiaellátását oldalra kinyitható napelemtáblák biztosítják. A hordozórakéta orr-résében 4,3 m átmérőjű és mintegy 2,8 m magas, a 2019-es terv szerint henger alakú test, de 2021-ben már kocka alak szerepel a tervekben.

A fő szonda (A) műszerei

- CoCa – optikai kamera (~CaSSIS)
- MANIaC – tömegspektrométer (Rosina)
- MIRMIS – infravörös kamera
- Por- és mágneses érzékelő (DFP műszercsomag): DISC – porbecsapódás-érzékelő, COMPLIMENT – plazma- és mágnesesmező-érzékelő, FGM – magnetométerek, LEES – elektron-detektor, SCIENA – ion- és semlegesrészecske-detektor

A C-I küldetést Geraint H. Jones, a University College London (UCL) Matematikai és Fizikai Tudományi Fakultása Űr- és Klímafizikai Tanszéke bolygókutató professzora és Colin Snodgrass, az Edinburgh-i Egyetem Fizika és Csillagászat Iskolája kutatója koordinálják. Ők a C-I ötletgazdái, akik kitalálták a küldetést, a programjavaslatot kidolgozták és a program megvalósítását irányítják.

A C-1 programban számos ESA tagország – köztük hazánk is, valamint Japán (B1 mini CubeSat szonda) és amerikai kutatók is részt vesznek. A küldetés tudományos adatainak kiértékelésében magyar résztől az ELKH Wigner FK (úrfizika, bolygóközi és üstökösplazma kölcsönhatásának vizsgálata) és a CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete (üstökös-mag és közvetlen környezete vizsgálata) vesz részt. A szonda műszereinek (főleg a CoCa, *Comet Camera*) elkészítésében is részt veszünk a következő űrtechnikai cégekkel: a kamera digitális processzor modulja szoftverének kifejlesztésében (SGF Technológia Fejlesztő Kft.), illetve a hardver elkészítésében (REMRED Space Technologies – Technológia Fejlesztő Kft.), valamint a hőszabályzó és hőszigetelési rendszer elkészítésében (ADMATIS Kutató, Gyártó és Kereskedelmi Kft.).

Köszönetnyilvánítás

A Comet Interceptor-űrszonda CoCa műszeréhez kapcsolódó DPM magyar közreműködést egy PRODEX pályázaton keresztül a Külgazdasági és Külügyminisztérium támogatja.

Irodalomjegyzék

- [1] Snodgrass C., Jones G.H. (2019): The European Space Agency's Comet Interceptor lies in wait. *Nature Communications*, 10, 5418
- [2] Sánchez J.P. et al. (2021): ESA F-Class Comet Interceptor: Trajectory design to intercept a yet-to-be-discovered comet. *Acta Astronautica*, 188, 265
- [3] Tóth I. (2014): Az üstökösök megismerésének mérföldkövei. In: *Meteor Csillagászati Évkönyv 2015*, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 242
- [4] Tóth I. (2015): Az üstökösök megismerésének mérföldkövei 2. Üstökös-kutatás az űrkorszakban. In: *Meteor Csillagászati Évkönyv 2016*, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 243
- [5] Tóth I. (2022): A külső Naprendszer kisebb égitestjei és törpebolygói. in: *Csillagászat*, szerk. Szabados L., Akadémiai Kiadó, Budapest, megjelenés alatt
- [6] Érdi B. (1989): Égi mechanika. in: *Csillagászat*, szerk. Marik M. Akadémiai Kiadó, Budapest, 111
- [7] Levison H.F. (1996): Comet taxonomy. In: *Completing the Inventory of the Solar System*, Astronomical Society of the Pacific Conference Proceedings, 107, 173
- [8] Jewitt D. et al. (2015): Nucleus and mass loss from active asteroid 313P/Gibbs. *Astronomical Journal*, 150, 76
- [9] Jewitt D., Kalas P. (1998): Thermal observations of centaur 1997 CU26. *Astrophysical Journal Letters*, 499, L103
- [10] Apáthy I., Hirn A. (2015): Magyar részvétel a Rosetta-űrszonda leszállóegységének tudományos kísérleteiben. *Meteor*, 45(1), 4
- [11] Both E. (2003): A Rosetta űrszonda. *Természet Világa*, 134(1), 3
- [12] Szegő K., Tóth I. (1985): A VEGA-program. *Fizikai Szemle*, 35(7), 241
- [13] Szegő K. (2004): A Rosetta-űrmisszió. *Magyar Tudomány*, 111(8), 879
- [14] Szalai S., (2016): A Rosetta-Philae sikere magyarok részvételével. *Fizikai Szemle*, 66(10), 322
- [15] Tóth I. (2017): Rosetta-összefoglalás 1. *Aero Magazin*, 19(1), 46

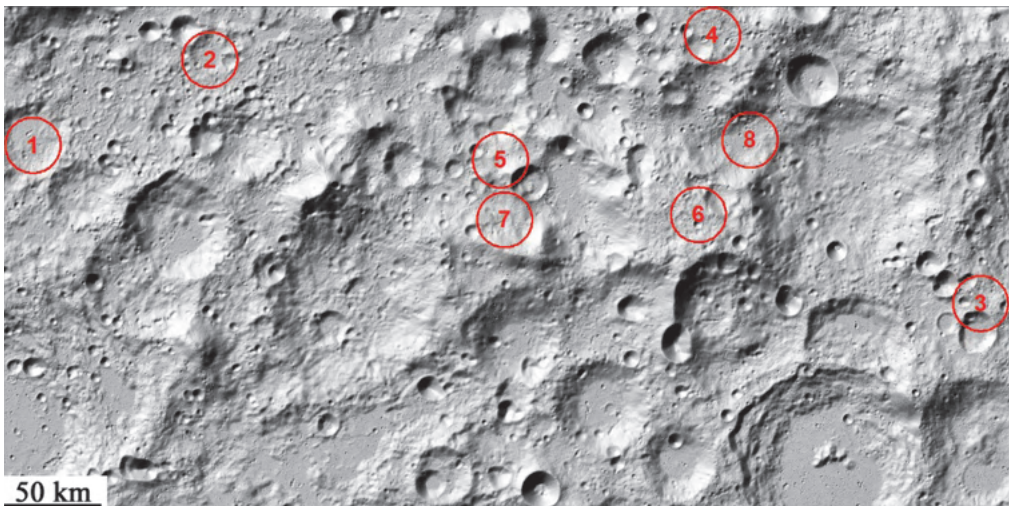
Holdi sarkvidéki űrszondaleszállóhely- jelöltek GIS alapú elemzése

Tomka Richárd

ELKH Csillagászati
és Földtudományi
Kutatóközpont
Csillagászati
Intézet és
Földrajztudományi
Intézet, Budapest

BEVEZETÉS

A Luna-27 űrszondás küldetés az Orosz Szövetségi Űrügynökség (Roszkoszmosz) és az Európai Űrügynökség (*European Space Agency, ESA*) együttműködésében tervezett projekt, melynek célja egy leszállóegység fúrásával nyert ásványi és vízjégminta elemzése a Hold déli poláris területéről [1]. Az eredmények a régió erőforrásainak [2] felbecslését segítenék, figyelembe véve azok területi eloszlását [3], későbbi hasznosíthatóságait is [4], valamint annak a megértését, hogy miként kerülhetett a jég Hold sarkvidékére [5]. A projekt megvalósulásához szükséges előkészítő munkák között szerepel a leszállóhely pontos kijelölése is, amihez különböző szempontok figyelembevétele szükséges. A jelenlegi feldolgozási fázisban nyolc leszállóhelyjelölt elemzése van folyamatban, közülük végül a legmegfelelőbb paraméterekkel rendelkezőt választják majd ki. A rendelkezésre álló adatok lehetővé teszik, hogy térinformatikai (*Geographic Information System, GIS*) környezetben is vizsgálhatók legyenek, és ezáltal a választás alapjául szolgáló információkat nyerhessünk ki belőlük.



1. ábra: A leszállóhelyjelöltek pozíciói. A Hold déli pólusa a kép aljának közepén elhelyezkedő éles peremű Shackleton-kráter közelében van. (Forrás: NASA)

FELHASZNÁLT ADATOK

A geoinformatikai programok sajátsága, hogy két fő adatszerkezetet képesek kezelni: a rasztereket és a vektorosokat. A raszteres adatmodell alapja a térben helyhez köthető digitális képek megjelenítése, amihez a program koordinátákkal látja el azokat elemi részeit (pixeljeit). Fontos tulajdonsága a felbontás, amelyen az egyes pixelek által a valóságban elfoglalt méretet értjük (m/pixelben szokás jellemezni). Az ábrázolt képek további szerkesztési és feldolgozási műveletek alanyaiként szolgálhatnak. A vizsgált területekről a Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) [6] keringőegység különféle eszközei állítanak elő felvételeket. A kiválasztási folyamat során a felszínről kétféle felvételtípus és az azokból származtatott térképek használhatók.

Az egyik típusnál, az ún. passzív távérzékelési módszerrel készültek a felvételek a Hold felszínről visszaverődő napsugárzás alapján születnek. Ezek felbontása nagyon jónak mondható, ugyanakkor nem engednek betekintést olyan helyekre, ahová a napsugárzás nem jut be. Ilyenfajta állományokat a Narrow Angle Camera (NAC) készít 1 m/pixel felbontásban. A képek szabadon hozzáférhetők és letölthetők a <https://ode.rsl.wustl.edu/moon> oldalon. A másik típusnál, az ún. aktív távérzékelési módszerrel készítették esetében az észlelést végző eszköz bocsátja ki azokat a jeleket is, amelyek a felszínről visszaverődve szolgáltatják az információt a detektáláshoz. Az így készült adatállományok gyengébb felbontásúak, ugyanakkor segítségükkel olyan felszínrészletek is elének tárulnak, amelyeket a Nap sugárzása nem világít meg. Az elemzésben résztvevő területekre a Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) [7] eszköze készít lézeres magasságméréseket. Felbontásuk függ attól, mely holdi szélességről származnak. Mivel a keringő űreszköz pályáinak felszíni vetületei a pólustól távolodva egymástól távolabbiak, így mintavételezése is hézagosabb lesz, ami a felbontás csökkenésével jár. Utóbbi értéke 20 és 60 m/pixel között változik. A munkához felhasznált adatok forrása: http://imbrium.mit.edu/DATA/LOLA_GDR/.

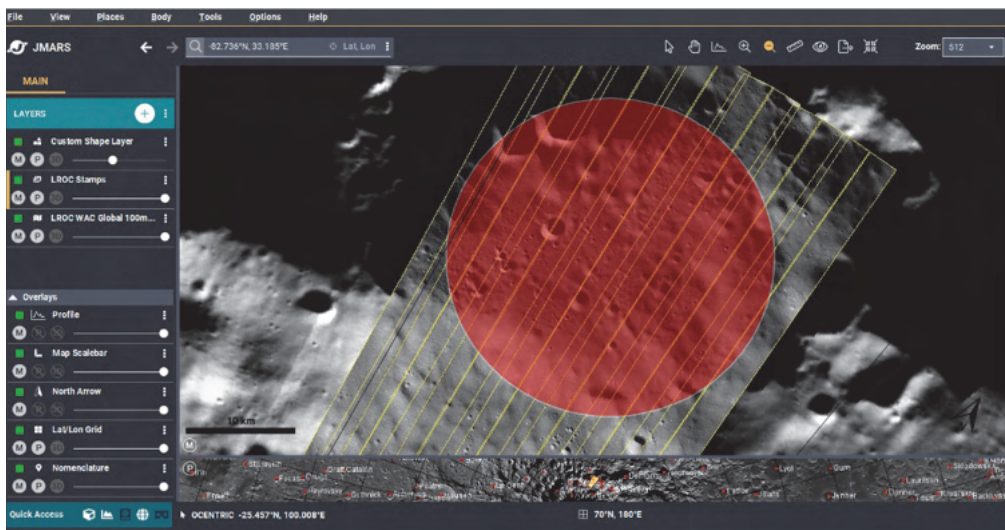
Neutron-spektrométeres méréseket a Lunar Exploreron Neutron Deterctor (LEND) elnevezésű műszer végez. Az eszköz 1-2 méteres felszín alatti mélységig képes detektálni annak neutronsugárzását és a részecskék energiáját. Mindezek felett a felszínre eső besugárzás tartalmát Nap-láthatósági térképeken lévő adatokkal mérhetjük, melyeket szintén a LOLA által készített domborzatmodellhez viszonyítjuk.

A vektoros adatmodell (shape fájlok) három alaptípust foglal magába: pont, vonal és poligon. A valós térbeli pozícióhoz kapcsolás itt pontokban, egy dimenzióval nagyobb kiterjedés esetén az alakzat töréspontjaiban tárolt koordinátákkal valósul meg. Ezek a szerkezetek alkalmasak több tulajdonság tárolására is attribútum táblájukban, akár automatikus kalkulálással (pl. hossz, terület), akár manuális bevitellel (pl. észlelés dátuma), ezáltal alkalmasak a relációs adatbázisokra jellemző lekérdezési műveletekre, kiegészítve helyalapú szelekciós lehetőségekkel is (pl. egy poligonba eső pontok kiválasztása). Modellezett hőmérsékletadatok vesszővel elválasztott (.csv kiterjesztésű) fájlokban állnak rendelkezésre, melyek vektoros adattá konvertálhatók.

ADATFELDOLGOZÁS

A rendelkezésre álló adatainkból különféle eljárásokkal nyerhetők ki hasznos információk, a feladatot az ArcMap nevű térinformatikai szoftver 10.4-es verziójával hajthatjuk végre. NAC képek esetében

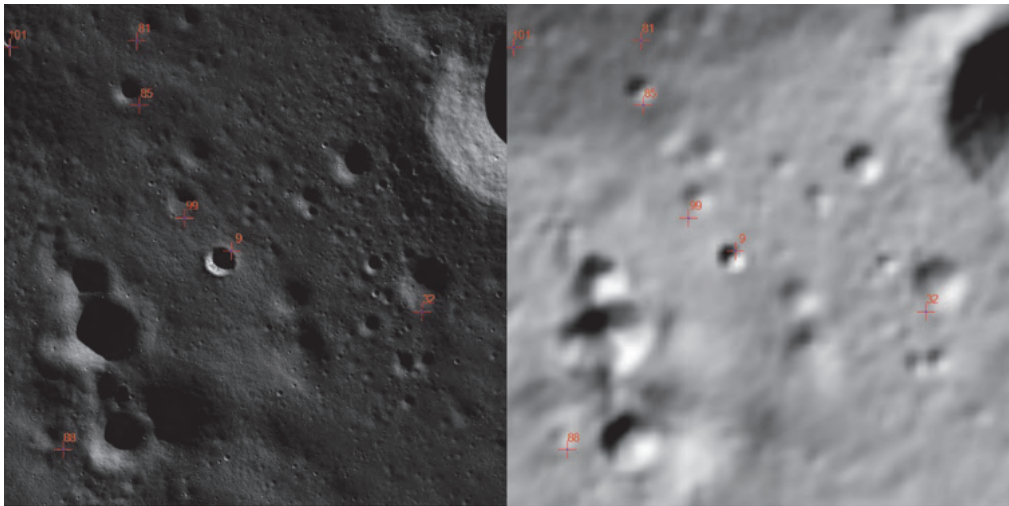
szükséges a képek előszűrése is, mivel fontos, hogy mind egyéni szinten (megfelelő megvilágítási viszonyok közepette készüljenek), mind csoportos szinten (egy leszállóhelyre eső képek minél homogénebbek legyenek) megfelelőkkel dolgozzunk. A NAC képek előzetes megtekintésére, válogatására alkalmas Jmars nevű szabadon hozzáférhető térinformatikai program [8] lehetőséget nyújt olyan hibák kiszűrésére is (pl. adathiányos, helytelen koordinátákkal rendelkező képek felfedezése), melyek a leíró adatok alapján rejtve maradnának. A kiválasztott képek letöltésük után térinformatikai környezetbe illesztése következik. Egy-egy leszállóhelyet rendszerint 15–25 NAC kép fed le, melyeket több lépcsős folyamatban lehet megfelelő pozíciójukba helyezni. A NAC képek letöltés után még nem rendelkeznek koordinátákkal, amelyeket egy referencia shape fájl segítségével regisztrálhatunk beléjük oly módon, hogy a képek sarkait a koordinátákkal rendelkező shape fájl sarkaihoz rendeljük, georeferáljuk. A négy hozzárendelt koordináta alapján a program kiszámolja a kép többi pixelének koordinátáit, és elhelyezi az adatrétegek között. Így azonban nem jutunk még megfelelő helyzeti pontossághoz. Ezért a második szakaszban az egyes képek határait illesztjük össze, mivel kisebb pontatlanság is egymás mellett elcsúszó képeket eredményez. Ennél a szakasznál sok illesztőpont felvétele szükséges, képenként általában 50–150 darab. A szomszédos képek viszonylatában is rendezett lokációt létrehozó torzítás után alkalmas az állomány az egységes fájlba írásra, ezáltal közösen kezelhetővé válik – a szükségtelen részek, melyek túlnyúlnak a leszállóhelyeken, leválaszthatók.



2. ábra: A 8-as leszállóhely jelöltet lefedő NAC képek előválogatás utáni megjelenítése a Jmars programban. A jobbra felfelé elnyúló sávok keretei jelzik az egyes felvételek határait

Az egybedolgozott ún. mozaikolt képre még egy illesztési procedúra vár, melyben azt a LOLA által készült, georeferenciával ellátott domborzatmodellhez illesztjük. Ehhez általában 50–100 illesztőpont felvétele szükséges. Ennek végrehajtásához a mindkét állományban megjelenő markáns felszínformák (pl. kráterperemek) összeegyeztetése szolgáltató jó alapot. Az így létrehozott NAC mozaik elég pontos ahhoz, hogy koordinátáit helyesen használhassuk fel. Mindez főként kisebb formák lehatárolá-

sához alkalmas, amelyeket a domborzatmodell már nem mutat ki. Kulcsszerep jut a mozaiknak ezáltal a kisebb kráterek digitalizálásában [9–11], melyeket kiexportálva és a CraterStat nevű programban felhasználva a felszín korát becsülhetjük meg.



Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
19	122851,509951	181950,418691	122753,917768	181943,381276	0	0	0
20	114572,414972	172115,177725	114528,600796	172084,660515	0	0	0
21	112467,965603	190584,637966	112371,285405	190535,289008	0	0	0
22	129297,683335	173226,644278	129264,932984	173242,203299	0	0	0
23	129654,275089	172488,235197	129566,128483	172384,628665	0	0	0
24	119351,585640	194358,234643	119257,969881	194277,836449	0	0	0
25	132766,760856	196071,830405	132687,253632	196034,783740	0	0	0
26	113931,920483	193079,028096	113469,907534	193014,380503	0	0	0
27	131204,117241	185237,949876	131168,009473	185230,088603	0	0	0
28	133356,634130	177128,346481	133294,436697	176974,557104	0	0	0
29	108994,902786	190498,773041	108907,988590	190434,163687	0	0	0
30	125215,978227	188031,775090	125143,683569	187939,422291	0	0	0
31	130370,360271	179884,587647	130299,150930	179739,875682	0	0	0
32	115942,409230	185579,814155	115839,791536	185460,953374	0	0	0
33	127943,420378	179631,883803	127885,220661	179613,648013	0	0	0
34	127520,280411	191930,478009	127351,554410	191842,449554	0	0	0
35	132552,217925	181748,679386	132352,332287	181643,122655	0	0	0
36	136894,755127	181500,306845	136759,807751	181341,824515	0	0	0
37	108850,790282	177422,893339	108847,797760	177412,174991	0	0	0
38	116223,445413	170916,945523	116217,821139	170957,366875	0	0	0
39	116949,167900	180243,750071	116898,463225	180200,627112	0	0	0
40	116717,679766	180959,962803	116700,404665	180971,000069	0	0	0
41	113178,342474	190214,872857	113131,498244	190167,009086	0	0	0
42	129571,711730	183728,924985	129429,289796	183590,093383	0	0	0
43	122218,183937	173225,823593	122140,248878	173183,304806	0	0	0
44	134647,307764	181431,165003	134644,535666	181304,690591	0	0	0
45	112082,669916	182195,520784	112036,556875	182200,365174	0	0	0
46	114694,084370	194237,802955	114661,173874	194161,418429	0	0	0
47	113282,410503	181479,535544	113229,777178	181294,933090	0	0	0
48	115885,593109	186644,634198	115878,966270	186674,227816	0	0	0
49	120097,409917	188967,228946	119991,064325	188911,381740	0	0	0

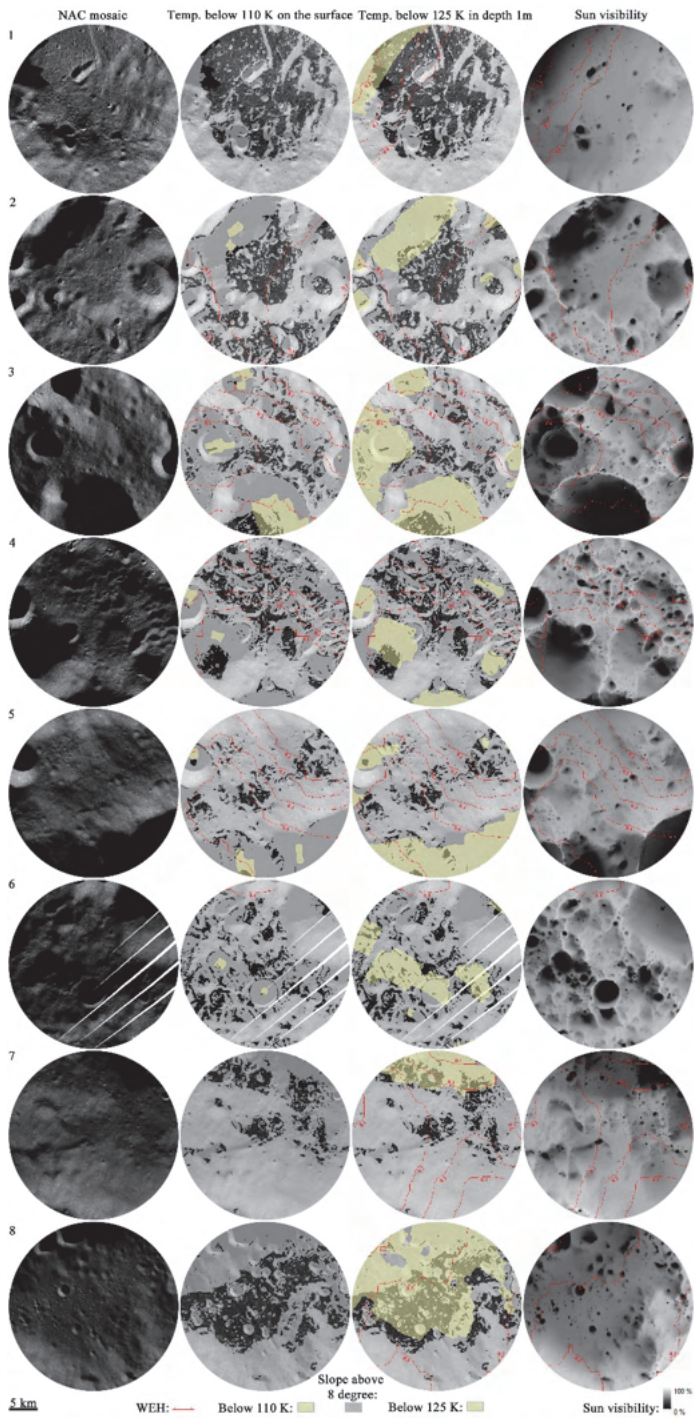
3. ábra: NAC mozaik georeferálása jellegzetes geomorfológiai formák alapján. A táblázat a mozaikon kijelölt pontok (Source oszlopok) és a domborzatmodell alapján hozzájuk rendelt lokációk koordinátáit (Map oszlopok) tartalmazza

A LOLA domborzatmodellből levezetett térképek generálhatók, a további elemzésekhez többek között lejtőszög, lejtőkiettség, míg vizuális megjelenítéshez domborzatárnyékolás. Modellezett hőmérsékletadatok [12] pont típusú shape fájlalba importálása a szöveges fájl koordinátamezőit felhasználva lehetséges. A létrejött pontok azonban esztétikailag nem megfelelőek, mivel szemcsés megjelenést köl-

csönöznek. Az adatpontok digitális képpé alakításához interpoláció szükséges. A legmegfelelőbb interpolációs módszer az Inverse Distance Weighting (IDW), amely a pontok közötti üres térrészekre úgy kalkulál hőmérsékletet, hogy az egyes adatpontokat távolságuk függvényében veszi számításba az általunk meghatározott méretű pixelek értékeinek előállításakor.

EDDIGI EREDMÉNYEK

Az eredmények kiértékelése gyakran több adat együttes értelmezését igényli. A 4. ábra első oszlopában a NAC mozaikok áttekintő képet nyújtanak a leszállóhelyjelöltek felszíni morfológiai sajátosságairól. A második és harmadik oszlop képein azok a részek láthatók tisztán, amelyek 8 foknál kisebb lejtőszöggel rendelkeznek, a magasabb értékűek elhomályosítottak. Fontos, hogy a leszállóhely viszonylag sík térrészen legyen majd kijelölve, a szonda biztonságos landolása érdekében. Ugyanebben a két oszlopban vonalakkal kötöttük össze az azonos neutrontartalommal bíró területeket, ami a felszín alatti jég előfordulásának valószínűségére utal.



4. ábra

Ugyancsak a fagyott víz jelenlétére enged következtetni a hőmérséklet különböző mélységekben modellezve meghatározott értéke. A felszínen a 110 K alatti (az első, valamint a hetedik és nyolcadik leszállóhely jelölt területére nem esik ilyen érték), míg 1 méteres mélységben a 125 K alatti érték teszi lehetővé a jég előfordulását. A hőmérséklet területi eloszlását a második és harmadik oszlopban világos, de átlátszó réteg jelöli. A megvilágítási viszonyok mellett, hogy szintén szerepet játszanak a jég tartós megmaradásában, a sonda által elérhető területeket is limitálják, mivel az napenergiát használ. A negyedik oszlop a Nap besugárzásának időbeli százalékos értékeit tünteti fel szürke skálán, míg a vonalak itt is a jelenlévő neutron mennyiségére utalnak.

TOVÁBBI TEENDŐK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Az eddig elemzett adatok mellett további tényezőket is számba veszünk a jövőben. A Föld-láthatósági állományok a szondával zajló kommunikáció szempontjából bírnak jelentőséggel, mivel lényegi kérdés, mikor tud az irányítóközpont kapcsolatot tartani a leszállóegységgel. A feldolgozási folyamat következő fázisában a nyolc leszállóhelyjelölt területén belül kell megfelelő helyszíneket kiválasztani a rendelkezésre álló, valamint a feldolgozásra váró adatok helyes értelmezésével. Jelenleg zajlanak az ESA munkatársainak számításai a kritikus értékek meghatározására, amivel az optimális pont kijelölhető a felszínre éréshez.

A megfelelő leszállóhely kijelölése segíthet olyan sikeres vizsgálatokhoz, amelyek alapján a holdi kőzetek jobban megismerhetők [13]. A fentiekben bemutatott térinformatikai alapú adatfeldolgozás jelentős manuális munkát és egyedi döntéseket igényel, az automatikus algoritmusok és leválogatások használatával összekapcsolva. Az itt végzett munka „piaci rést” tölt be az egyébként jelentős erőforrásokkal bíró, de a tudományos és technikai kapacitások összekapcsolásában nem minden területen erős ESA munkájában, ahol hazánk értékes térinformatikai eredményekkel tud hozzájárulni a készülő űrszondákhoz.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát a H82 POLICETECH ESA projekt, valamint a Külgazdasági és Külügyminisztérium segítette.

Irodalomjegyzék

- [1] Parvathy P. et al. (2021): *Lunar Volatiles and Solar System Science. Bulletin of the American Astronomical Society*, 53, 068
- [2] Bérczi Sz. et al. (2009): *Concise Atlas of the Solar System (11): Petrographic Textures and Evolutionary Processes from the Chondritic Parent Bodies, Moon and Mars. 40th Lunar and Planetary Science Conference*, 1718
- [3] Hargitai H. (2019): *Building a Cartographic Planetary Feature Database: The Significance of Feature Maps. 50th Lunar and Planetary Science Conference*, 3157
- [4] Hargitai H. (2002): *Access to entertainment and information programming for the crew as part of the communication system of future Mars mission or Lunar Base. 34th COSPAR Scientific Assembly, 2097*

- [5] Kereszturi A. (2021): Jég a Hold sarkvidékén. In: *Meteor Csillagászati Évkönyv 2022, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 213*
- [6] Mazarico E. et al. (2018): *Orbit determination of the Lunar Reconnaissance Orbiter: Status after seven years. Planetary and Space Science, 162, 2*
- [7] Lemelin M. et al. (2020): *Analysis of the Topographic Roughness of the Moon. Journal of Geophysical Research: Planets, 125, e06105*
- [8] Gorelick N.S. et al. (2003): *JMARS: A Multimission Data Fusion Application. 34th Lunar and Planetary Science Conference, 2057*
- [9] Kereszturi A., Steinmann V. (2019): *Terra-mare comparison of small young craters on the Moon. Icarus, 322, 54*
- [10] Hargitai H. et al. (2006): *Impacts: Its Processes, Traces and Effects - a Textbook. 37th Lunar and Planetary Science Conference, 1282*
- [11] Kereszturi A., Steinmann V. (2017): *Characteristics of small young lunar impact craters focusing on current production and degradation on the Moon. Planetary and Space Science, 148, 12*
- [12] King O. et al. (2020): *The Oxford 3D thermophysical model with application to PROSPECT/Luna 27 study landing sites. Planetary and Space Science, 182, 104790*
- [13] Rezes D. (2021): *A holdi meteoritok szerepe Földünk égi kísérőjének kutatásában. Űrtan Évkönyv 2020, Magyar Asztronautikai Társaság, Budapest, 61*

Évszakos jégsapka peremének vizsgálata a Mars déli féltekéjén

Gergác Mira Anna^{1,2}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

²ELKH CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

A Marson kulcskérdés a víz mai előfordulási esélyének, lehetőségnek a megértése. Ez vizsgálható a tavaszi jégfoltok elemzésével a bolygó déli féltekéjén, melyek a pólussapka visszahúzódása nyomán visszamaradtak, és idővel az erősödő besugárzás révén nem kizárható, hogy területükön a cseppfolyós fázis is megjelenik. A megvizsgált 110 képből az látszik, hogy kisebb jégfoltok leggyakrabban a -40° és -50° szélesség között helyezkednek el 150° - 180° tartományban. Méretük 1,5 métertől egészen 300 méterig terjedhet és a jég jellemzően 19-133 marsi napig marad meg.

BEVEZETÉS

Mivel a Mars légkörének és felszíni törmelékta karójának kicsi a hővezető képessége [1,2], ezért a zsugorodó pólussapka visszahúzódása után is maradhatnak kisebb jégfoltok [3] a felszínen ott, ahol gyenge megvilágítást kaptak, például lejtőszögön vagy árnyékoló felszínformáknál. Az ilyen területeket is eléri nyáron a napfény, ilyenkor a jég gyorsan melegedhet – egyelőre nem tudni, hogy ekkor megjelenhet-e esetleg cseppfolyós fázis [3,4] vagy sem, ami az élet lehetősége szempontjából is fontos kérdés [5-7].

MUNKAMÓDSZEREK

A kutatás keretében a Mars déli féltekéjén az évszakos pólussapka visszahúzódása után megmaradt jégfoltokat azonosítottam a Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) űrszonda optikai felvételein, amelyek a JMars szoftverrel kereshetőek a -40° és -70° szélesség, valamint a Nap 140° és 200° ekliptikai hosszúsága között (*solar longitude*, Ls: a Mars-Nap szög az északi tavaszi napéjegyenlőségtől számítva, amikor Ls=0°; értéke a marsfelszíni évszakokra jellemző). A képeken látható alakzatok kinézete szemmel, szakirodalmi publikációk alapján jellemezhető, s a felvételek kategorizálhatóak visszamaradt jégfoltot tartalmazó és anélküli képekre. Előfordulásuk és jellemzőik statisztikailag vizsgálhatóak.

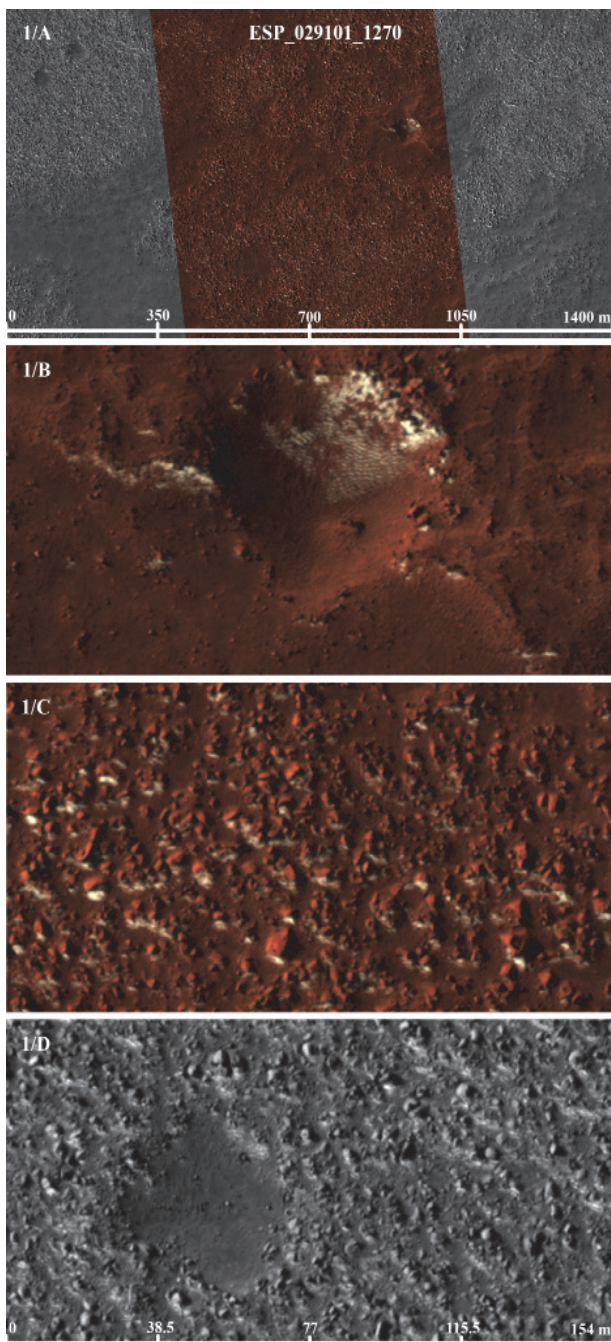
EREDMÉNYEK

A kutatás során a rendelkezésre álló, keresési paramétereknek megfelelő nagyjából 1400 képből 110 került elemzésre, ebből 37-en mutatkozott jégfolt, azonban az adatbázis bővülőben van. Kezdsnek minden világos folt a potenciális jég kategóriába került, több tucat kép vizsgálata után azonban pontosabb kritériumok fogalmazódtak meg, ennek megfelelően nem tekintendők kisebb jégfoltoknak a

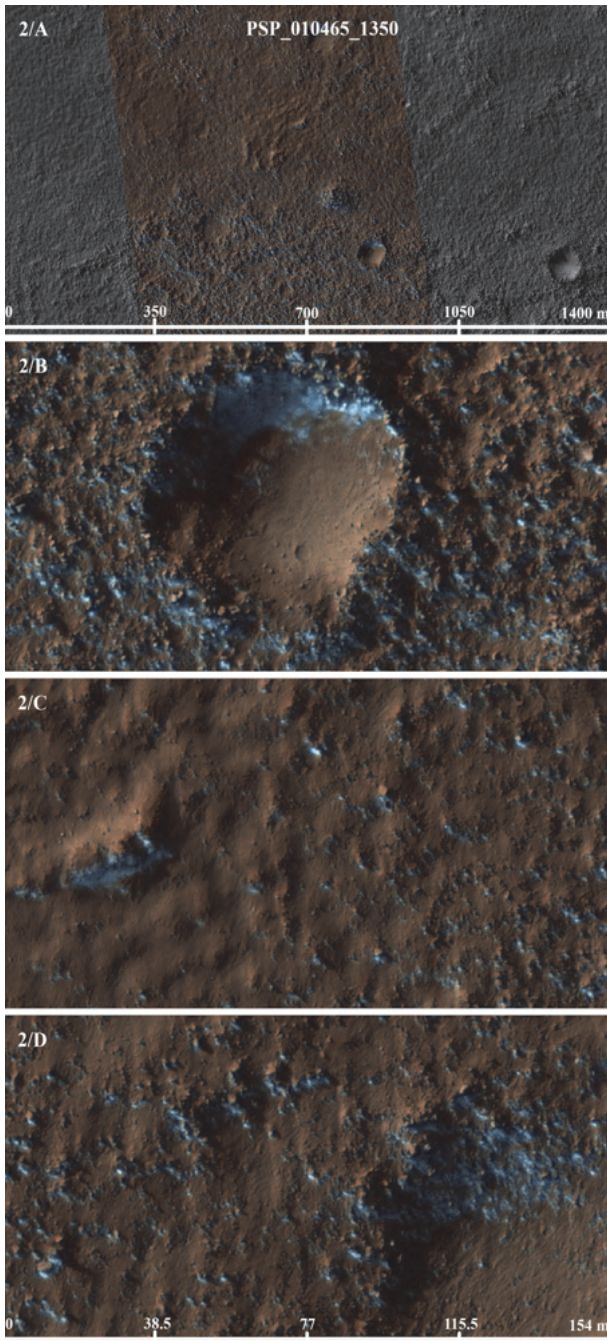
világos sziklák (árnyékok vetnek, illetve néha világos folt látható a déli oldalukon), emellett a felhők és a kiterjedt porborítások (világos foltok) diffúz peremük alapján jelentősen elütnek a kisebb jégfoltoktól.

Az eredmények azt mutatják, hogy a jégfoltok optikai megjelenés alapján elkülöníthetők az egyéb világos alakzatoktól, mint például a szikláktól és kiterjedt felhőktől. A vízjég jelenlétének bizonyítása közvetlenül egyelőre nem lehetséges. További kérdés, hogy a jégfoltok vízjégből vagy szén-dioxid jégből állnak-e. Erre egyelőre nincs pontos válasz, s mivel a szén-dioxid jég sokkal alacsonyabb hőmérsékleten szublimál (nyomástól függően kb. 140 K [8]), mint a vízjég (páratartalomtól függően 240–220 K a Marson), az alábbiakban azonosított jégfoltok feltehetőleg főleg vízjégből állnak, de ennek eldöntése a kutatás következő lépése lesz. A színes IRB és RGB HiRISE (*MRO High Resolution Imaging Science Experiment*) képeken a jég környezeténél jelentősen világosabb, „hideg árnyalatú”, jellemzően kékes-fehéres folt, míg a világos kőzetek általában sárgás árnyalatúak. A jég jellemzően követi az árnyékoló felszíni formát, pontosabban annak árnyékát.

Dimbes-dombos helyeken és sziklamezőkön sok jégfolt fordul elő, míg sík terepen inkább csak egy-kettő, azok is laposabb mélyedések ol-



1. ábra: Jégfoltok az ESP_029101_1270 HiRISE képen (1/A) és példák a kinagyított jeges területekre (1/B, 1/C, 1/D). Képközép koordinátái: $-52,617^\circ$ szélesség, $113,6^\circ$ hosszúság, $L_s=186,477^\circ$



2. ábra: Jégfoltok a PSP_010465_1350 HiRISE képen (2/A) és példák a nagyított jeges területekre (2/B, 2/C, 2/D). Képközép koordinátái: $-44,874^\circ$ szélesség, $213,4^\circ$ hosszúság, $L_s=144,419^\circ$

dalában vagy repedésekben. A jég mindig az árnyékoló domborzati formák árnyoldalán van (jelen esetben a déli pólus felőli oldalon).

A jégfoltok átmérője a képeken 5 pixel és 1000 pixel (azaz 1,5 m és kb. 300 m) között mozog, azonban míg a kisebb átmérőjűek jellemzően oválisak, a nagyobbak inkább elnyúltak. Ha a foltok nincs éles határa, az akár köd vagy felhő is lehet, emellett a jégfoltok nem vetnek árnyékot, mivel a marsi légkörből kiváló H_2O mennyisége ehhez túl kevés (gyakran látni olyan világos foltokat melyek kicsi árnyékot vetnek, ezek sziklák lehetnek, amelyek odafigyeléssel kiszűrhetőek). A legtöbb megfelelő kép -40° és -50° marsrajzi szélesség között található, rajtuk kisebb jég $L_s=150-180^\circ$ évszakos fázis között figyelhető meg - ekkor húzódik vissza ebből a szélességi zónából az évszakos jégsapka.

A kiválasztási kritériumoknak megfelelnek az 1. és 2. ábrán látható világos foltok, mindegyik rendre az árnyékoló felszínformák déli pólus felőli oldalán van és nem vetnek árnyékot. Jellemző foltokat látni 2/B képen, kráterek árnyékos oldalán gyakran találni a kritériumoknak megfelelő világos foltot. Sokszor ilyen helyen maradnak meg a legtovább a foltok a pólussapka elhúzódása után.

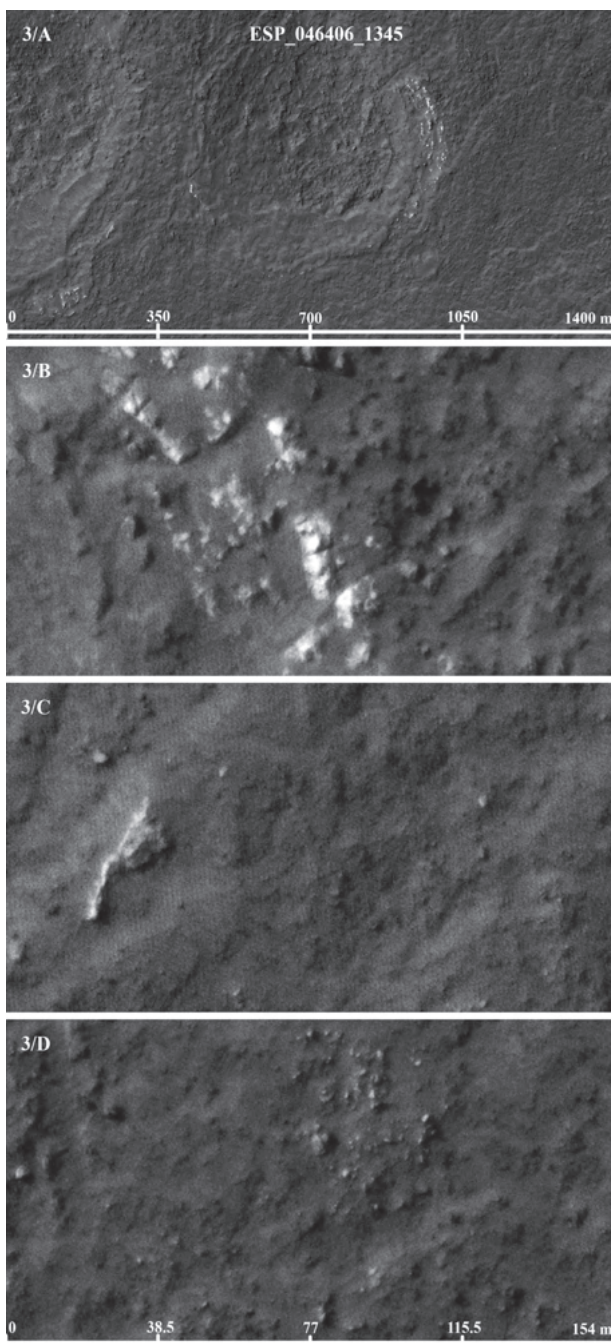
Világos foltok az 1/D képen is megfigyelhetőek, azonban ezek

a foltok kevésbé ütnek el a környezettől, így gondolhatnánk akár világosabb árnyalatú homoknak is. A környező, jégnek azonosított foltokból azonban következtethetünk arra, hogy itt is jég az, amit látunk, azonban sok helyen nem látni árnyékoló felszíninformát, amely védelmet biztosítana a besugárzástól. Ezek alapján nem lehetünk biztosak a foltok jegességében. Ebből is látszik, hogy sokat segít a beazonosításban a színinformáció.

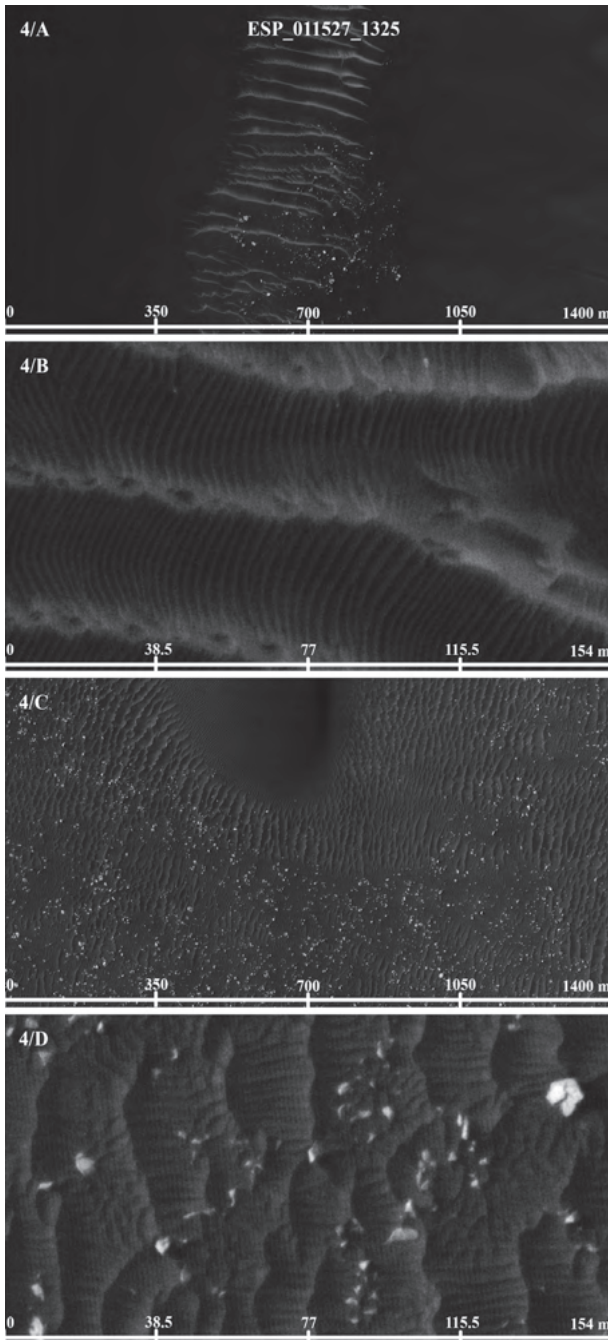
ELLENPÉLDÁK

Ha megnézzük a 3. ábrát, akkor láthatjuk, hogy bár apró fehér foltok vannak a képen, azok mind a kiemelkedések napsütötte oldalán helyezkednek el. A 3/B és 3/C képeken éles és kontrasztos a határuk, valamint 3/B-n és 3/D-n kicsi árnyékot is vetnek. Ezek alapján a foltok kőzetblokknak minősülnek.

A 4. ábra első áttekintő képén (4/A) hullámfodros felszín látni, a domborzati formán világos foltokat. Elsőre gondolhatnánk, hogy jeget látunk, hiszen a folt követi a fodrokat, azonban ha jobban megvizsgáljuk (4/B), akkor látni, hogy a foltok a napsütötte oldalon helyezkednek el, valamint a foltok meglehetősen diffúzak. Így kizárhatjuk a jég jelenlétét. Valószínűleg azért világos ott a felszín, mert megvilágítja a homokot a fény. A



3. ábra: Példák világos kőzettömbökre az ESP_046406_1345 HiRISE képen és kinagyított részletein (9/A, 9/B, 9/C, 9/D). Képközép koordinátái: $-45,124^\circ$ szélesség, $357,75^\circ$ hosszúság, $L_s=172,084^\circ$



4. ábra: ESP_011527_1325 HiRISE kép (10/A, 10/C) és részletei (10/B és 10/D). Képközép koordinátái: $-47,232^{\circ}$ szélesség, $19,478^{\circ}$ hosszúság, $L_s=189,102^{\circ}$

képen kisebb, hullámfodroknak nevezett szélformát látni.

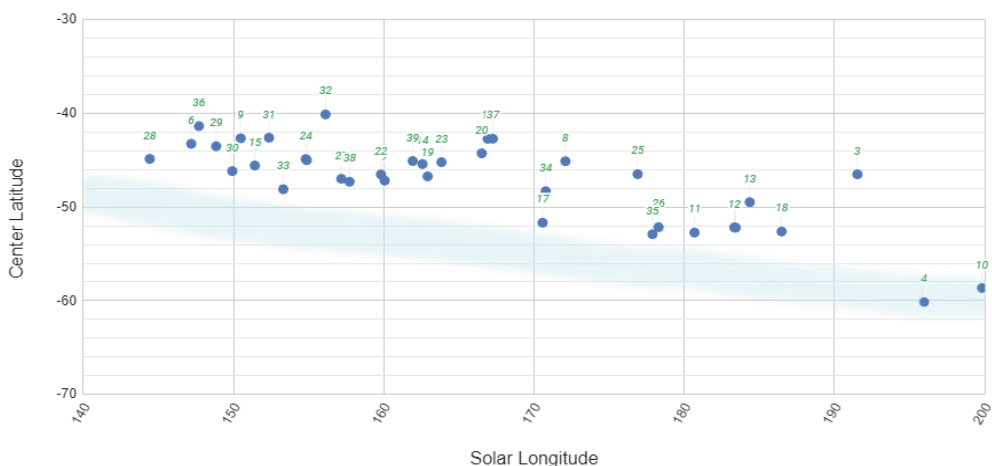
A második áttekintő képen (4/C) árnyékban elhelyezkedő, vagy akár szikla-szerű, kisebb jégfoltokat láthatnánk. Azonban nem követik az árnyékoló domborzati formát, tehát nem elnyúlt alakjuk van, mint a domborzati egyenetlenségnek, amelyek védhetik a foltokat a napfénytől. Ha jobban megvizsgáljuk a képet, akkor látni, hogy a világos foltok árnyéket vetnek, napsütötte oldalon vannak és néhol ki is lógnak a homokból. Ezek alapján világos sziklákat látunk, nem jeget.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A Mars déli féltekéjén az évszakos pólussapka visszahúzódása után visszamaradó jégfoltok azonosíthatóak a HiRISE felvételek alapján. A jég szinte mindig árnyékoló formák pólus felőli oldalában figyelhető meg. Az azonosítást segíti, ha RGB felvételt vizsgálunk, ugyanis a folt árnyalata is fontos információ.

Az 5. ábra a kiválasztási kritériumoknak megfelelő foltokat mutató képek marsrajzi szélességét ábrázolja a kép készítési idejének függvényében. Az idő balról jobbra halad az ábrán, a déli pólussapka pereme pedig ennek megfelelően lefelé (a déli pólus felé) húzódik, amelyet diffúz kék sáv jelez. Az így

A déli pólussapka visszahúzódása után visszamaradt jégfoltokat mutató képek helyzete



5. ábra: A kritériumoknak megfelelő képek (a grafikonon kék pontok) követik a visszahúzódó szén-dioxid-jég-sapka szélesség szerint átlagolt TES (Thermal Emission Spectrometer) ún. Crocus vonalát (világoskék sáv) [9]

kapott ábra szépen mutatja, hogy a kérdéses jégfoltok a Mars déli szén-dioxid-jégének évszakos visszahúzódása után maradtak vissza [9].

Az 5. ábrán látszik, hogy a pontok kis lemaradással követik a szélességi fok szerint átlagolt TES Crocus vonalat (azon hideg környezet határát, amin még létezhet szén-dioxid-jég). Mindezek alapján kb. 10–70 Ls (azaz 19–133 marsi nap) időtartamon keresztül maradhatnak vissza jégfoltok vizsgált területeken.

A kutatás keretében a következő lépésben a Mars Odyssey THEMIS (Thermal Emission Imaging System) felvételek alapján vizsgáljuk a megfigyelt foltok helyén és idején jellemző hőmérsékletet [10], ami segíthet a szén-dioxid-jégből és a vízjégből álló foltok elkülönítésében. Néhány megfigyelés alapján [11] ugyanis nem lehetetlen, hogy szén-dioxid-jégből álló foltok viszonylag alacsony szélességen, a pólussapka visszahúzódása után is előfordulhatnak. Ezt követően éghajlati modellek eredményeivel [12] lehet összehasonlítani azonosított foltok előfordulási viszonyait.

Amennyiben a fenti lépések is megtörténtek, és mind szén-dioxid-, valamint vízjegek is előfordulnak az azonosított foltok esetében, CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) felvételek alapján a két jégtípus [13] elméletileg elkülöníthető egymástól.

A fentiekben bemutatott visszamaradó jégfoltok fontos célpontok lehetnek a következő keringő egy-egy számú, továbbá a helyszíni kutatómunka tervezésében is számíthat az ilyen jégfoltok előfordulása [14, 15]. Emellett a vizsgálat segíthet a bolygó fejlődéstörténete jeges vonatkozásainak tisztázásában [16–19]. Magának az esetleges cseppfolyós fázisnak az azonosítása nehéz feladat, de további célzott mérések révén, ha rendszeresen víz jelenne meg ezeken a helyszíneken, akkor ennek esetleges kémiai következményei is elemezhetőek lennének, valamint a jég előfordulásával kapcsolatos légköri paraméterek becslése is pontosítható [20].

Irodalomjegyzék

- [1] Grott M. (2021): Thermal Conductivity of the Martian Soil at the InSight Landing Site From HP3 Active Heating Experiments. *Journal of Geophysical Research*, 126, E006861
- [2] Kereszturi Á. (2012): Mars – fehér könyv a vörös bolygóról. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest
- [3] Langevin Y. et al. (2009): Investigations of selected areas of the south seasonal cap of Mars in early 2009. *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-8148
- [4] Pál B., Kereszturi Á. (2017): Possibility of microscopic liquid water formation at landing sites on Mars and their observational potential. *Icarus*, 282, 84
- [5] de Vera J.-P. et al. (2014): Results on the survival of cryptobiotic cyanobacteria samples after exposure to Mars-like environmental conditions. *International Journal of Astrobiology*, 13, 35
- [6] Marschall M. et al. (2012): Migrating and UV screening subsurface zone on Mars as target for the analysis of photosynthetic life and astrobiology. *Planetary and Space Science*, 71, 146
- [7] Horváth A. et al. (2009): Analysis of Dark Albedo Features on a Southern Polar Dune Field of Mars. *Astrobiology*, 9, 90
- [8] Kelly N.J. et al. (2006): Seasonal polar carbon dioxide frost on Mars: CO₂ mass and columnar thickness distribution, *Journal of Geophysical Research*, 111, E03S07
- [9] Frédéric S. et al. (2009): Albedo control of seasonal South Polar cap recession on Mars. *Icarus*, 200, 374
- [10] Ahern A.A. et al. (2021): Thermophysical Properties and Surface Heterogeneity of Landing Sites on Mars From Overlapping Thermal Emission Imaging System (THEMIS) Observations. *Journal of Geophysical Research*, 126, E006713
- [11] Piqueux S. et al. (2016): Discovery of a widespread low-latitude diurnal CO₂ frost cycle on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 121, 1174
- [12] Giuranna M. et al. (2019): The current weather and climate of Mars: 12 years of atmospheric monitoring by the Planetary Fourier Spectrometer on Mars Express. *Icarus*, 353, 113406
- [13] Brown A.J. et al. (2014): Interannual observations and quantification of summertime H₂O ice deposition on the Martian CO₂ ice south polar cap. *Earth and Planetary Science Letters*, 405, 102
- [14] Orgel Cs. et al. (2014): Scientific Results and Lessons Learned from an Integrated Crewed Mars Exploration Simulation at the Rio Tinto Mars Analogue Site. *Acta Astronautica*, 94, 736
- [15] Kereszturi Á. (2011): Geologic field work on Mars: distance and time issues during surface exploration. *Acta Astronautica*, 68, 1686
- [16] Nagy B. et al. (2020): The Thermal Behavior of Ice-Bearing Ground. *Astrobiology*, 20, 701
- [17] Séjourné A. et al. (2018): Grid-mapping the northern plains of Mars: using morphotype and distribution of ice-related landforms to understand multiple ice-rich deposits in Utopia Planitia. *Journal of Geophysical Research*, 124, 483
- [18] Orgel Cs. et al. (2018): Gridmapping the Northern Plains of Mars: A New Overview of Recent Water- and Ice-Related Landforms in Acidalia Planitia. *Journal of Geophysical Research*, 124, 454
- [19] Changela H. et al. (2021): Mars: New insights and unresolved questions. *International Journal of Astrobiology*, 20, 394
- [20] Pál B. et al. (2019): Global seasonal variations of the near-surface relative humidity levels on present-day Mars. *Icarus*, 333, 481

Az ESA a jeges holdak nyomába ered: Voyage 2050

Kisvárdai Imre

Eötvös Loránd
Tudományegyetem
Természet-
tudományi Kar,
Budapest

BEVEZETÉS

Az Európai Űrügynökség (ESA) 2019. március 4-ei kezdettel kiírt egy pályázatot, amelynek keretein belül minden kutató vagy tudományos csoport előterjeszhetett egy javaslatot az ügynökség *Voyage 2050* felhívására [1,2]. A felhívás a *Cosmic Vision* tervezési szakasz lejárt utáni időszakra, azaz a 2030-as évek közepétől számított két évtizedre vonatkozott. „Most, hogy a *Cosmic Vision* határozott alakot öltött és a 2030-as évek közepéig tartó küldetéseink számára biztos tervnek tekinthető, meg kell határoznunk azt a technológiát és tudást, amelyekre szükségünk lesz az évtizedek múlva induló küldetéseinknél, és ezért kell minél hamarabb kijelölnünk tudományos témákat a *Voyage 2050* tervhez” – nyilatkozta Günther Hasinger, az ESA tudományos igazgatója. 2021. június 11-én meg is született a döntés. Ennek értelmében a majdnem 100 előterjesztett javaslatból kiválasztották a három fő témát, amelyek köré a *Voyage 2050* épülni fog.

Az első nagyszabású küldetés (*large-class mission*) témája az óriásbolygók holdjai lesznek. A nemzetközi együttműködéssel lezajlott Cassini-Huygens küldetés és az ESA hamarosan induló JUICE (*Jupiter Icy Moons Explorer*) űrszonda örökségét gyarapítva a küldetés új, fejlett eszközökkel kutatná a kapcsolatot a holdak felszín közeli környezete és belső szerkezete között, valamint az élet lehetséges előfordulását jelző biomarkereket. A küldetés részei lehetnek felszíni leszállóegységek és drónok is.

A második téma a mérsékelt exobolygóktól a Tejútrendszerig nevet viseli. Galaxisunk a sötét anyag és csillagközi anyag mellett több százmillió csillagot és bolygót tartalmaz, de az ismereteink rólok egyelőre meglehetősen hiányosak. Habár az exobolygók további kutatása kiemelt fontosságú annak érdekében, hogy Európa megőrizze vezető szerepét ezen területen a Cheops, Plato és Ariel küldetések vége után is, nehéz döntést kell hoznia az érintett tudományos közösségnek, hogy a Tejútrendszer középső, a csillagközi por miatt nehezen vizsgálható régióit vagy a mérsékelt klímával rendelkező Naprendszeren kívüli bolygókat kutassuk, mivel ezzel kapcsolatban az ESA még nem jutott elhatározásra.

A harmadik téma a korai Univerzum új vizsgálati módszereivel kapcsolatos. A témában indítani kívánt küldetések olyan alapvető fizikai és asztrofizikai kérdésekre keresik majd a választ, mint például hogy hogyan kezdődött a Világegyetem, illetve hogyan alakultak ki és fejlődtek az első kozmikus szerkezetek és fekete lyukak. Ezen kérdések megválaszolására új mérési módszereket alkalmaznak majd,

például a gravitációs hullámok nagy pontosságú észlelése vagy a kozmikus háttérsugárzás magas érzékenységu spektrószkópiái vizsgálata. A fő témák mellett számos közepes kategóriájú küldetést (*medium-class mission*) tervez az ESA a Voyage 2050 keretein belül a csillagászat, asztrometria, fizika és asztrofizika tudományterületein.

KÜLDETÉS AZ ÓRIÁSBOLYGÓK HOLDJAIHOZ

A Jupiter Galilei-holdjainak felfedezését követő három és fél évszázad során az óriásbolygó-rendszerek iránti tudományos érdeklődés mérsékelt maradt. Azonban az első, a Pioneer és Voyager űrszondák által az 1970-es és 80-as években végzett közeli megfigyelések után az irántuk mutatott érdeklődés elég nagy lett ahhoz, hogy küldetések motivációjául szolgáljanak. Kérdések merültek fel az óriásbolygók és holdjaik belső szerkezetével és a légkörük kialakulásával, fejlődésével kapcsolatban. A szakértők felismerték, hogy önmagukban is nagyon összetett rendszerekről van szó, főleg a gravitációs és elektromágneses kölcsönhatásokhoz köthető folyamataikat és a dinamikus plazma-, gáz- és porkörnyezetüket tekintve.

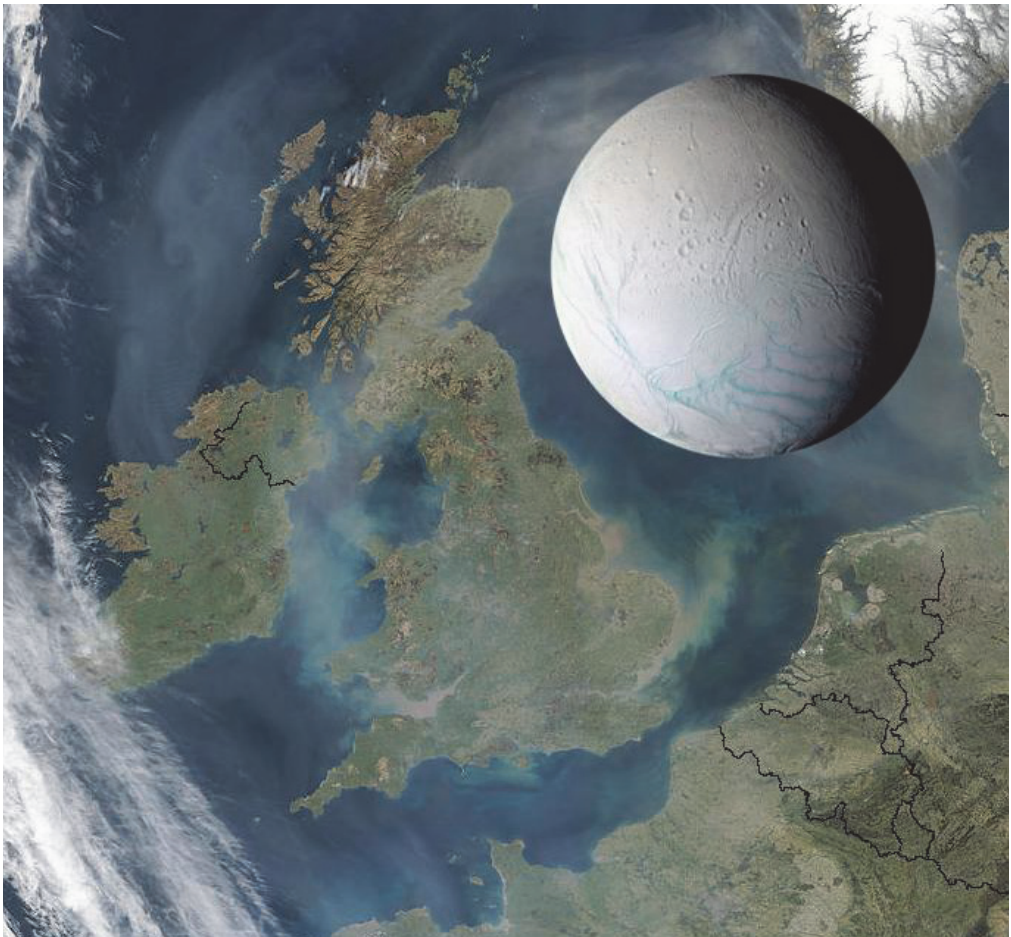
A részletes vizsgálatokhoz azonban keringőegységekre volt szükség. Az első ilyen az 1995-től 2003-ig a Jupiter körül keringő Galileo-űrszonda volt, amelyet a 2004-től 2017-ig a Szaturnusz körül keringő Cassini követett. Utóbbinak része volt a Huygens leszállóegység, a 2005-ben a Szaturnusz Titan holdjára juttatott szonda is. Ezen felfedezési hullám legmegdöbbentőbb eredményei közé tartozik a Jupiter Europa holdjának és a Szaturnusz Enceladus holdjának külső jégburka alatt elhelyezkedő vízréteg felfedezése. Ebben a két évtizedben fedezték fel az első exobolygókat is, közülük néhány óceánbolygó a naprendszerbeli jeges holdak nagy testvéreinek is tekinthető.

A Galileo és Cassini küldetések kimagasló tudományos sikereik ellenére számos megválaszolatlan kérdést hagytak maguk után. Természetesen emberi szemmel az egyik legérdekesebb kérdés a külső naprendszeri holdakon (legfőképpen az Európán és Enceladuson) az élet jelenléte. A legesélyesebb élőhelyjelöltek a Földön csak az 1970-es években felfedezett, óceánközépi hátságokban található „feketefüstölgők” lehetnek. A Cassini által kimutatott hidrogénmolekulák jelenléte, ami az Enceladus óceánjának fenekén lévő hidrotermális képződményekre utal, egy remek példa, hogy miért kell további vizsgálatokat folytatnunk a holdak élhetőségével kapcsolatban.

Minden hold egyedi és rengeteg érdekes, megmagyarázatlan jelenség figyelhető meg rajtuk. Ezek a mai technológiának köszönhetően már vizsgálható módokon kötik össze a belső összetételt, struktúrát a felszínükkel és a külső környezetükkel. A Naprendszer első és harmadik legnagyobb holdja, a Ganymedes és a Callisto rendkívül összetett belső szerkezettel rendelkeznek, amelynek része egy dinamikáját tekintve még mindig ismeretlen, mély, vízben gazdag réteg. A JUICE küldetés mindkét hold rejtélyeinek nyomába ered. A Titan különösen izgalmas égitest, mivel két folyadék réteggel is rendelkezik (egy felszín alatti óceánnal és egy felszíni szénhidrogéntengerrel), amelyek valószínűleg kriovulkanizmussal kötődnek egymáshoz. Hasonló jelenséget figyelhetünk meg az Európán és az Enceladuson, viszont a két hold esetében a rétegek közötti összeköttetést a későbbiekben – a mainál fejlettebb technológiával – közvetlenül a helyszínen, *in situ* műszerekkel is vizsgálhatjuk.

ENCELADUS

A szaturnuszi holdrendszer titkainak feltárása során számos igazán lenyűgöző dolgot fedeztek fel. Az olyanokon túlmenően, mint a metántavak a Titánon és a Halálcsillaghoz kísértetiesen hasonlító hold, a Mimas, az is világossá vált, hogy a külső naprendszerbeli holdak belső óceánokat és esetlegesen földönkívüli életet is rejthetnek. Az Enceladus, a Szaturnusz hatodik legnagyobb holdja is közéjük tartozik. Rendkívül érdekes jellemzőkkel rendelkezik, például hosszú, csíkszerű kék jégpatakok, valamint csodálatos vízjéggejzirek figyelhetők meg rajta, melyeket rendszeresen észleltek a Hold déli sarkából kirobbanni. Ezek felvetik a folyékony víz lehetőségét a felszín alatt, sőt, akár az életét is. A hold átmérője 504 km, ami kisebb, mint a Budapest–Prága távolság légvonalban. A felszínén a nehézségi gyorsulás mértéke csupán százada a földiének, ennek köszönhetően juthatnak a vízjéggejzirek által kilövellt részecskék több száz kilométer magasba, illetve léphetnek ki a Szaturnusz E-gyűrűjébe.



1. kép: Az Enceladus és az Egyesült Királyság méretének összevetése. (Forrás: NASA / JPL / Space Science Institute)

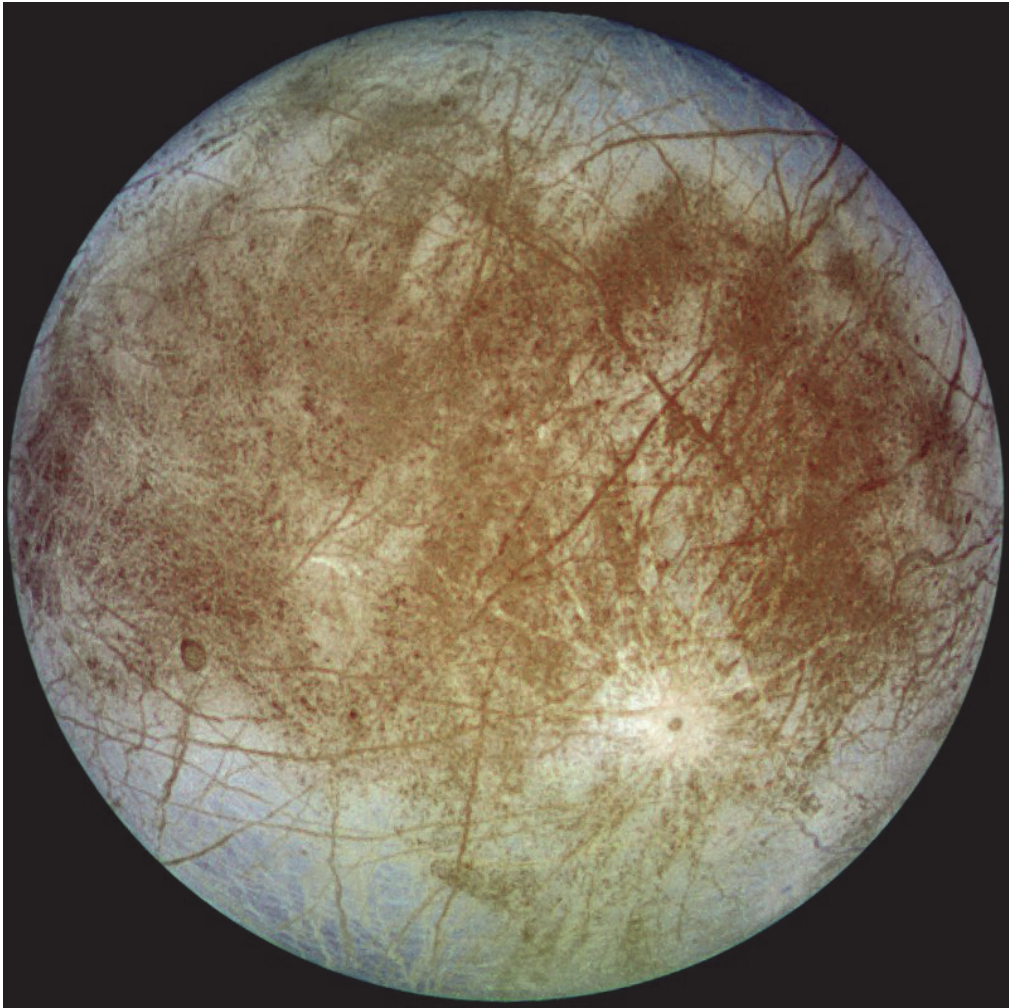
Felszíne: Az Enceladus sűrűsége $1,61 \text{ g/cm}^3$, ami nagyobb, mint a Szaturnusz többi közepes méretű, jeges holdjának. Ez arra utal, hogy nagyobb százalékban tartalmazhat szilikátokat és vasat. A síkságokat friss, tiszta jég uralja, amely az Enceladusnak a Naprendszer talán legjobban tükröződő felületét adja. Ezeken a területeken kevés kráter található, ami arra utal, hogy valószínűleg néhány százmillió évesnél fiatalabbak. A régiók viszonylagos fiatalsága azt is jelzi, hogy kriovulkanizmus és más folyamatok aktívan megújítják a felszínt. A régebbi felszín nem csak kráterekkel borított, hanem számos törést is megfigyeltek rajta – eszerint a felszín deformációnak volt kitéve a kráterek kialakulása óta. A Cassini legutóbbi megfigyelései közelebről is bepillantást engedtek a kráterek eloszlására és méretére. Ezeket a formakincseket a Nemzetközi Csillagászati Unió (IAU) az *Ezerégyéjszaka meséi* könyvének Burton fordításában lévő szereplők és helyek után nevezte el – például Seherezáde-kráter, Diyar-síkság, vagy Anbar-mélyedés. Egyes területeken krátermentes régiók láthatók, jelezve a geológiailag közelmúltbeli jelentős felszínképződés eseményeit. A repedések, síkságok, hullámos domborzat és egyéb kéregdeformációk is jelzik, hogy az Enceladus geológiailag aktív.

Belső szerkezete: A jégtakaró alatti óceán [3] létezése tudományos vita tárgya 2005 óta, amikor a kutatók először figyeltek meg az Enceladus déli-sarki felszínéről feltörő, vízgőzt tartalmazó csóvákat. Ezek a gejzírek másodpercenként 250 kg vízgőzt képesek kilövellni akár több mint 2000 km/h sebességgel, és elérhetik a felszín feletti 500 km-es magasságot is. Nem sokkal később, 2006-ban megállapították, hogy az Enceladus kitörései a Szaturnusz E-gyűrűjének forrásai, és aktívan után pótolják azt. A Cassini-Huygens-szonda mérései szerint ezek a kilövellések nagyrészt vízgőzből, valamint olyan ritkább komponensekből állnak, mint a molekuláris nitrogén, metán és szén-dioxid. További megfigyelések egyszerű szénhidrogének, például metán, propán, acetilén és formaldehid jelenlétét igazolták. A képkötés, tömegspektrometria és magnetoszférikus adatok kombinált elemzése szerint a megfigyelt déli sarki csóva túlnyomós felszín alatti kamrákból származhat.

A kitörések intenzitása jelentősen változik az Enceladus saját pályáján való elhelyezkedésének függvényében. Alapvetően a csóvák körülbelül négyszer fényesebbek, amikor az Enceladus apoapszisban van (a Szaturnustól legtávolabb). Ez összhangban van azokkal a geofizikai számításokkal, amelyek azt jósolják, hogy a déli sarki repedések kevésbé lesznek összenyomva apoapszisban. A Cassini-küldetés 2014-es adatai igazolták a déli sarki felszín alatti, folyékony vízből álló óceán létezését, amelynek vastagsága 40 km körüli. Emellett a 2005. július 14-i átrepülés során a Cassini-szonda a déli sarkvidéken nagy mennyiségben kiszivárgó belső hő jelenlétét is észlelte. Az itteni hőmérséklet túl magas volt ahhoz, hogy a napsugárzásnak legyen tulajdonítható, és a gejzírekkel együtt azt jelezte, hogy a bolygó belseje még mindig geológiailag aktív. A Szaturnusz körül keringő Enceladus librációjának méréseit értelmező további tanulmányok határozottan arra utalnak, hogy az egész jeges kéreg leválik a kőzetmagról, ami azt jelentené, hogy a felszín alatti óceán az egész bolygóra kiterjed.

Léggör: Az Enceladus jelentősebb légkörrel jelentkezik, mint az átlagos naprendszerbeli holdak, de az még így is nagyságrendekkel ritkább, mint a kőzetbolygók atmoszférái. A légkör forrását a periodikus kriovulkanizmusnak tulajdonítják, ami gázok és gőzök kiszökéséhez vezet a hold belsejéből. A gyenge

léggört bizonyítják a Cassini-űrszonda 2005-ben végzett magnetométeres méréseinek eredményei. Ez az ion-ciklotronhullámok fokozott teljesítményének észleléséből állt, amit ionizált részecskék és a mágneses mező kölcsönhatása okoz. A következő két találkozás során a magnetométer kutatócsoportja megállapította, hogy az Enceladus légkörében lévő gázok a déli sarkvidéken koncentrálnak, és a légkör sűrűsége a pólustól távolabb sokkal kisebb. A gejzirkilövellések tartalmához hasonlóan az atmoszféra is elsősorban vízgőzből áll (91%), de kisebb koncentrációban más komponensek, például molekuláris nitrogén (4%) és szén-dioxid (3,2%) jeleit is detektálták. Bizonyítékot találtak egyszerű, kis szénatomszámú szénhidrogénekre is, amelyek metán (1,7%), valamint nyomokban propán, acetilén és formaldehid formájában vannak jelen.



2. kép: A Galileo által készített kép az Europa Jupiter felőli oldaláról. (Forrás: NASA / JPL / Space Science Institute)

EUROPA

A 3100 km-es egyenlítői átmérőjével az Europa kb. 10%-kal kisebb, mint a Föld holdja. Tehát ha a mi Holdunkat kicserélnénk az Európára, nagyjából ugyanakkora méretűnek tűnne az égen, de fényesebben ragyogna, mivel az Europa felszíne vízből áll, ezért majdnem hatszor több fényt ver vissza. Az Europa a Jupiter körül a bolygótól átlagosan körülbelül 671 ezer kilométerre kering, amely maga nagyjából 780 millió kilométerre, vagyis 5,2 csillagászati egységre kering a Nap körül. A holdat először Galileo Galilei észlelte 1610-ben. Emiatt az Európát és a Jupiter másik három nagy holdját – az Iót, a Ganymedest és a Callistót – Galilei-holdaknak is nevezzük.

Az első vízre utaló jeleket a hold felszíne alatt csak 369 évvel később vették észre, amikor a két Voyager szonda átrepült a Jupiter rendszerén, elkészítve az első részletes képeket. A rövid átrepülés után az Europa magára maradt 1995-ig, amikor is a Galileo-űrszonda lett az első, amely a Jupiter körül keringett. Nyolc éven keresztül volt pályán, és a rendelkezésünkre álló legrészletesebb Europa-adatokat szolgáltatta. A Galileo-szondát 2016-ban a Juno követte, amely jelenleg is a Jupiter körül kering. Eddig még nem került olyan közel az Európához, mint a Galileo, de a tervek szerint 2022 végén mindössze 320 kilométerrel repül el a hold felszíne felett.

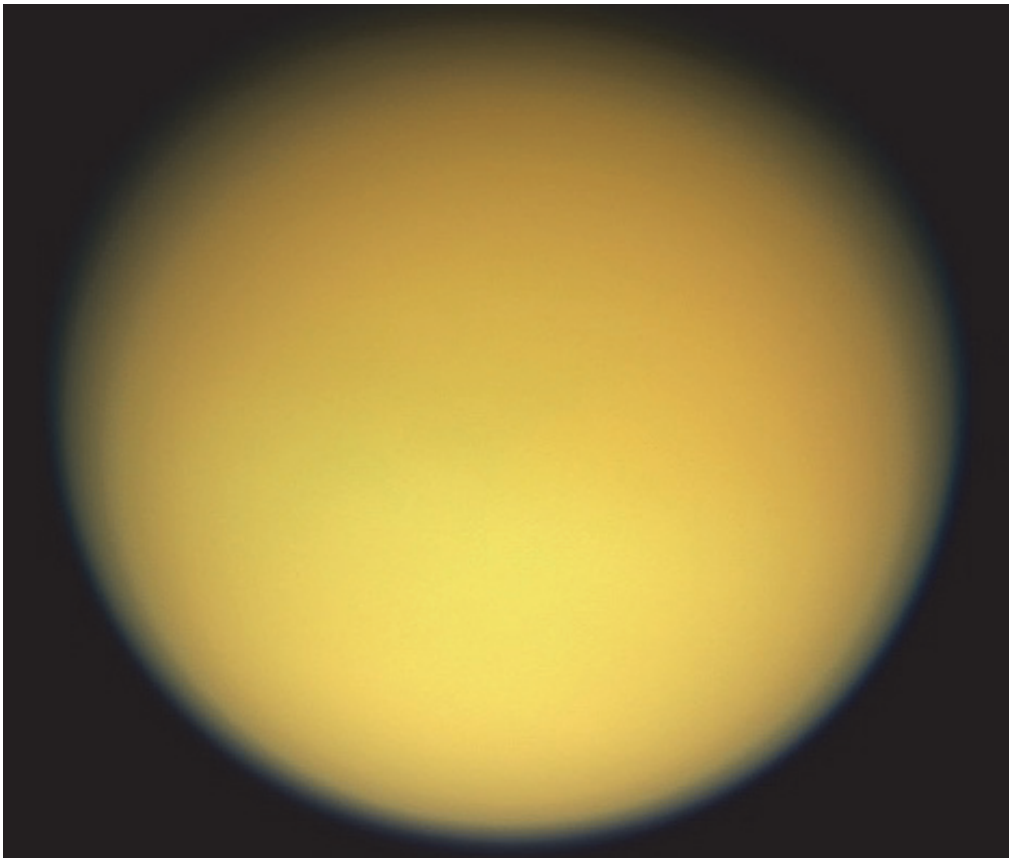
Felszíne: Az Enceladushoz hasonlóan az Europa jeges felszínét is hosszú, lineáris törések keresztezik. A megfigyelhető kráterek kis száma alapján a kutatók arra következtetnek, hogy a hold felszíne nem haladja meg a 40–90 millió éves kort, ami geológiai értelemben fiatalnak számít (a becslések szerint a Callisto, a Jupiter másik holdjának felszíne több milliárd éves lehet). A hold számos repedésénél és a felületén foltokban vörösesbarna anyag figyelhető meg, amelynek összetétele pontosan nem ismert, de valószínűleg sókat és kénvegyületeket tartalmaz, amelyek a jéggel keveredtek és sugárzás hatására módosultak. A Galileo érdekes mélyedéseket és dombokat fedezett fel, amelyek arra utalnak, hogy az Europa jégrétege lassan kavarog vagy áramlik (a hűvösebb, sűrűbb jég lesüllyed, míg a melegebb, kevésbé sűrű jég felemelkedik) az alulról érkező hő hatására [4]. A hosszú, lineáris törések gyakran csak 1–2 kilométer szélesek, de több ezer kilométer hosszúak is lehetnek az Europa felszínén. Némelyik több száz méter magas gerincként emelkedik ki. A Galileo „káoszrégióknak” nevezett felszínformákat is felfedezett, ahol a töredezett, táblás tájakat titokzatos vöröses anyag borítja. A szonda mérési adatait tanulmányozó kutatók 2011-ben arra jutottak, hogy a káoszrégiók olyan helyek lehetnek, ahol a felszín összeomlik a jégbe ágyazott, lencse alakú tavak felett.

Belső szerkezet: A bolygónkhoz hasonlóan az Európának is vasmagja, szilikátköpenye és sós vízü óceánja van. A Földtől eltérően azonban az Europa óceánja egy valószínűleg 15–25 km vastag jéghej alatt fekszik, és becsült mélysége 60–150 km. Míg a belső óceán létezésére utaló bizonyítékok erősek, a biztos megerősítéshez egy jövőbeli küldetés szükséges. A Galileo-űrszonda egyik legfontosabb mérési eredménye megmutatta, hogy a Jupiter mágneses tere miként változik meg az Europa körül. Az eredmények szerint egy speciális mágneses mezőt indukál az Európában a felszín alatti elektromosan vezető folyadék mély rétege. Az Europa jeges összetétele alapján a kutatók úgy vélik, hogy ennek a mágneses térnek a legvalószínűbb forrása egy globális sós vízü óceán. Ez a mérés a mai napig a legmeggyőzőbb bizonyítékunk a felszín alatti óceán létezésére.

Légkör: Sokáig azt hittük, hogy az Európán csak gyenge oxigén atmoszféra van, de 2013-ban a NASA bejelentette, hogy a Hubble-űrtéleszkópot használó kutatók bizonyítékot találtak arra, hogy az Europa aktívan vizet lövell ki az űrbe. Ez azt jelenti, hogy a hold most is geológiailag aktív. Ha az utólagos megfigyelések megerősítik, a vízcsóvákat a jövő küldetése is tanulmányozhatják, hasonlóan ahhoz, ahogy a Cassini mintát vett a Szaturnusz Enceladus holdjának csóvájából

TITAN

A Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titan egy jeges világ, amelynek felszínét teljesen eltakarja az aranyló ködös légkör. A Titan Naprendszerünk második legnagyobb holdja, nála csak a Jupiter Ganymedes holdja nagyobb, mindössze 2%-kal. A 2575 km sugarú Titan a Föld holdjánál, de még a Merkúr bolygónál is nagyobb. A Titan körülbelül 1,2 millió kilométerre van a Szaturnustól, amely maga kb. 1,4 milliárd kilométerre kering a Naptól, vagyis 9,5 csillagászati egységre. A Titannak 15 napra és 22 órára van szüksége a Szaturnusz körüli teljes pályájának megtételéhez. A Titan is kötötten kering a Szaturnusz körül, ami azt jelenti, hogy a Holdhoz hasonlóan a Titan is mindig ugyanazt az „arcát” mutatja a bolygónak.



3. kép: A Titanról a Cassini által 2005. február 15-én készített kép. (Forrás: NASA / JPL)

Felszíne: A Titan felszíne a Föld felszínéhez egyik leginkább hasonlító hely a Naprendszerben, bár sokkal alacsonyabb hőmérsékleten és eltérő kémiai összetétellel. Itt olyan hideg van (-179 Celsius-fok), hogy a vízjég a kőzet szerepét tölti be. A Titan holdon lehet vulkáni tevékenység is, de olvadt kőzet helyett folyékony víz tölti be a láva szerepét. A Titan felszínét az áramló metán és etán formálja, ezek vájtak folyóvölgyeket, és töltenek meg nagy tavakat folyékony szénhidrogénekkal. A Földön kívül a Naprendszerben egyetlen bolygónak sincs ilyen komplex folyadékrendszer a felszínén. Sötét dűnék hatalmas régiói húzódnak a Titanon, elsősorban az egyenlítői régiók körül. Ezekben a dűnékben a „homok” sötét szénhidrogén-szemcsékből áll, amelyekről azt feltételezik, hogy úgy nézhetnek ki, mint a kávézacc. Külsőleg a magas, vonalas dűnék nem különböznek az afrikai Namib-sivatagban láthatóktól. A Titanon kevés megfigyelhető becsapódási kráter van, ami azt jelenti, hogy felszínének viszonylag fiatalnak kell lennie, és a folyamatok bizonyos kombinációi eltüntetik a becsapódások bizonyítékait. Ebből a szempontból is hasonló a Földhöz; bolygónk krátereit az áramló folyadék, a szél, valamint a kéreg lemeztektonikával történő pusztulásának ereje törli el. Ezek az erők a Titanon is jelen vannak, csak más formában.

Belső szerkezet: A Titan belső szerkezete nem teljesen ismert, de a Cassini-Huygens-küldetés adatain alapuló modell szerint a Titannak öt rétege lehet. A legbelső réteg egy kb. 4000 km átmérőjű kőzetmag, felette egy vízjéghéj található. A nagynyomású jeget sós, folyékony vízréteg veszi körül, melynek tetején vízjég külső kérgé fekszik. Ezt a felületet olyan szerves molekulák vonják be, amelyek eső vagy más módon homok és folyadék formájában leülepedtek a légkörből. A felszínt sűrű légkör övezi.

Légkör: Naprendszerünk több mint 150 holdnak ad otthont, és ezek közül a Titan az egyetlen hold vastag légkörrel. A Titan felszínén a légnyomás kb. 60%-kal nagyobb, mint a Földön – nagyjából ugyanakkora nyomást érezne az ember, mintha 15 méter mélyen úszna. Mivel a Titan kisebb tömegű, mint a Föld, gravitációja nem vonzza olyan erősen a légkört, így az a földre képest 10-szer magasabbra tud emelkedni. A Titan atmoszférája nagyrészt nitrogénből (kb. 95%) és metánból (5%) áll, kis mennyiségű egyéb szén alapú vegyületekkel keverve [5]. Magasan a hold légkörében a metán és a nitrogén molekulákat a Nap ultraibolya fénye és a Szaturnusz mágneses mezeje által felgyorsított, nagy energiájú részecskék hasítják szét. Ezeknek a molekuláknak a darabkái újraegyesülnek és különféle szerves anyagokat hoznak létre. Ezek a molekulák egyfajta szmogot keltenek – sűrű, narancssárga színű ködöt, amely megnehezíti a hold felszínének vizsgálatát. A nehéz, szénben gazdag vegyületek egy része leülepedik a hold felszínén, és a „homok” szerepét tölti be a Titan hatalmas dűnemezeiben. A metán pedig felhőkké kondenzálódik, amelyek időnként metánesókkal áztatják a felszínt. A Titan légkörében lévő metán az, ami lehetővé teszi a bonyolult légköri kémiai folyamatokat, de eredete továbbra is rejtély marad. Mivel a napfény folyamatosan lebontja a hold légkörében, valamilyen forrásnak pótolnia kell azt, különben idővel kimerül. A kutatók azt gyanítják, hogy a metánt kriovulkanizmus juttathatja a Titan légkörébe, de az elmélet még nem bizonyított.

A VOYAGE 2050 CÉLJAI – AZ ÉLET NYOMÁBAN

A Szaturnusz és a Jupiter összes holdja egy összetett bolygórendszer része, amelyek megismeréséhez át kell lépnünk a múltbeli és a folyamatban lévő küldetések határain. A holdak egymással kölcsönhatásban álló rétegekből állnak, a magtól az exoszféra át a magnetoszféráig. Például a Ganymedes a

mágneses mezőjével saját magnetoszférát alkot a Jupiterén belül. A Titan felszíne és légköre is a környező plazma és mágneses mező nagy amplitúdójú ingadozásainak van kitéve. Az Enceladus csóvája is kölcsönhatásba lép a plazmával és ez egy áramlási rendszer kialakulásához vezet, amely a Szaturnusz „sarki fényeit” okozza. E folyamatok kutatása nem csak azért fontos, hogy megértsük a mai állapotokat, hanem azért is, hogy megismerjük a potenciálisan lakható égitestek eredetét és fejlődését. A külső Naprendszer sok holdja, köztük a legkisebbek is, szerves anyagokat tartalmaznak. Azonban a legnagyobb jeges holdak és az Enceladus sokkal nagyobb jelentőséggel bírnak az asztrobiológiai vizsgálatokat tekintve, mivel kielégítik a lakhatóság minden előfeltételét: folyékony víz, hőenergia, összetett kémiai folyamatok és szerkezeti stabilitás [6]. Az összetett kémiai reakciók megindulása szempontjából kulcsfontosságú a folyékony víz érintkezése az égitestben lévő szilikát kőzetekkel. A belső szerkezet ismerete tehát alapvető szerepet játszik annak megítélésében, hogy mennyire kedvezőek a feltételek az összetett kémiai folyamatokhoz. A Voyage 2050 küldetése a jeges holdak alábbi kérdéseinek megoldásaira fognak irányulni:

- Az óceánbolygók lakhatósága, a belső szerkezet jellemzése, a felszín alatti óceánok, és a holdak teljes topográfiájának feltérképezése, erre alkalmas műszerekkel.
- Biomarkerek keresése és a prebiotikus kémiai folyamatok azonosítása a felszínen, a légkörben és az óceánbolygók belsejében távérzékeléssel, illetve *in situ* módszerekkel.
- A belső és a felszíni környezet kapcsolatának vizsgálata, különös tekintettel ennek mechanizmusára.
- A Ganymedesnél a JUICE, az Europa esetében az Europa Clipper foglalkozik e kérdésekkel. A Voyage 2050 küldetés ezért főleg más jeges holdakat célozna meg, különösen a Titant és az Enceladust, de akár egy kisebb küldetés az Európát is érintheti.

A technológia várhatóan nem jelent majd nagy kihívást a keringőegységek elkészítésével és pályára állításával kapcsolatban. A napelemes technológia fejlesztése kulcsfontosságú volt az ESA programjában az elmúlt években, és ennek köszönhetően nagyobb energiaigényű, fejlettebb műszerek is felszerelhetők a szondákra. Habár a felszín közvetlen vizsgálata örvend a legnagyobb tudományos érdeklődésnek, ez nagy technológiai kihívást jelent. Az ESA terveiben emiatt fontos szerepet tölt be az ezt lehetővé tevő eszközök kifejlesztése, a minél nagyobb tudományos siker érdekében.

Irodalomjegyzék

- [1] *Call for White Papers for the Voyage 2050*, <https://www.cosmos.esa.int/documents/1866264/1866292>
- [2] *Cosmic Vision Overview*, <https://sci.esa.int/web/cosmic-vision/-/46510-cosmic-vision>
- [3] Choblet G. et al. (2017): *Powering prolonged hydrothermal activity inside Enceladus*. *Nature Astronomy*, 12, 84
- [4] Lowell R.P. et al. (2005): *Hydrothermal systems on Europa*. *Geophysical Research Letters*, 32, L05202
- [5] Niemann H.B. et al. (2005): *The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe*. *Nature*, 438, 779
- [6] Pál B. (2019): *Lakhatóak lehetnek a jégbolygók is*. <https://www.csillagaszat.hu/hirek/lakhatóak-lehetnek-a-jégbolygók-is/>

Fiatal csillagok vizsgálata a Gaia űrtávcső adatai alapján

FIATAL CSILLAGOK FÉNYESSÉGVÁLTOZÁSAI

A Naphoz hasonló csillagok molekulafelhőkben születnek gravitációs összeomlás során [1,2]. A felhő összeomlása következtében kialakuló protocsillagra folyamatosan áramlik az anyag a környezetéből, és egy, a protocsillagot körülvevő akkréciós (tömegbefogási) korongból hullik a csillagkezdemény felszínére. Az anyaggyűjtés folyamata közben a behulló anyag egy része a protocsillag pólusaitól kifelé áramlik kifúvások formájában, aminek hatására a protocsillag a környezetében lévő anyagot eltakarítja. Ennek a folyamatnak az időskálája körülbelül 100 000 év. A protocsillagban beindul a deutérium fúziója. Az így kialakult T Tauri típusú fiatal csillag (2 naptömeg alatt) már optikai tartományban is látható.

A fiatal csillagok nagy része fényességváltozásokat produkál napos, hetes vagy hónapos időskálán [3]. A fényességváltozások többféle fizikai okra vezethetők vissza. A periodikus változások egy része abból ered, hogy a csillagot a korongban lévő anyag egy része időnként elfedi, és ez a fényesség periodikus csökkenéséhez vezet. Ennek egyik prototípusa az AA Tauri. A fényességváltozások más része abból ered, hogy a korongból az anyag nem egyenletesen áramlik a csillagra. Ez a jelenség napos–hetes változásokat okoz a fiatal csillagok fényességében kis, néhány tized magnitúdós amplitúdóval. A fiatal csillagok egy része hosszabb távú fényességváltozást is mutat, éves–évtizedes időskálán, 2–5 magnitúdós amplitúdóval. Ezek az eruptív fiatal csillagok, ahol a kifényesedést az okozza, hogy egy instabilitás hatására az akkréciós korongból a csillagra hulló anyag mennyisége ideiglenesen megnő [4].

Az eruptív fiatal csillagoknak két főbb típusát különböztetjük meg. Az EXor típusú eruptív fiatal csillagok éves időskálájú, 2–4 magnitúdó amplitúdójú kifényesedést produkálnak, amelyek néhány évenként megismétlődnek [5]. A FUor típusú eruptív fiatal csillagok akár 5 magnitúdót is fényesednek, és évtizedekig a kitérés állapotában maradnak [4]. A FUor és EXor típusokon kívül más, köztes állapotú eruptív fiatal csillagok is léteznek. A fénygörbe azonban önmagában még nem elegendő a fiatal csillagok klasszifikálására. Különösen a kifényesedés kezdeti fázisában optikai és közeli infravörös spektroszkópia szükséges. Az egyik alapvető különbség a FUor és EXor típusú csillagok között, hogy míg az előbbiek spektrumában jellemzően abszorpciós vonalak vannak, az utóbbiakéban emissziós vonalak. Mindkét típus az epizodikus akkréció (tömegbefogás) példája, ami a csillagkeletkezés egyik alapvető problémájára, az úgynevezett luminozitás-problémára adhat megoldást. Eszerint a fiatal csillagok átlagosan egy magnitúdóval halvá-

Nagy Zsófia,
Ábrahám Péter,
Kóspál Ágnes,
Szabados László,
Fernando Cruz-
Sáenz de Miera,
Eleonora Fiorellino,
Kiss Csaba,
Kun Mária,
Marton Gábor,
Sunkyung Park,
Michał Siwak,
Szabó Zsófia,
Szegeci-Elek Elza

ELKH Csillagászati
és Földtudományi
Kutatóközpont,
Konkoly Thege
Miklós Csillagászati
Intézet, Budapest

nyabbak, mint amilyenek az elméleti modellek alapján várnánk [6]. Ha minden fiatal csillag átmegegy egy eruptív fázison, az epizodikus akkréció megoldást jelent a luminozitás-problémára.

A fiatal csillagok fényességváltozásának tanulmányozásához a fényességük rendszeres mérése szükséges. Ehhez segítséget nyújtanak az égboltfelmérő programok, amelyekből jelenleg több is működik. A Zwicky Transient Facility (ZTF) kétnapos gyakorisággal készít felvételt optikai tartományban az északi égboltról. Az All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) a Föld több pontjáról méri az eget 24 távcsővel, és 9 és 18 magnitúdó közötti objektumok fényességéről szolgáltat adatokat. Az Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) felmérés a chilei Las Campanas Observatórium 1,3 méter átmérőjű távcsőjével történik. Ezek a felmérések vagy csak az égbolt egy meghatározott részére koncentrálnak (ZTF, OGLE), vagy inkább a fényesebb objektumok detektálására alkalmasak (ASAS-SN). A következőkben bemutatandó Gaia űrtávcső égboltfelmérése az előbb felsoroltakkal szemben az egész égboltot lefedi és halványabb objektumok detektálására is alkalmas.

A GAIA ŰRTÁVCSŐ ÉS A GAIA SCIENCE ALERTS RENDSZER

Az Európai Űrügynökség (ESA) által üzemeltetett Gaia asztrometriai űrtávcső 2014 óta szolgáltatja több mint egymilliárd csillag pontos pozíció- és fényességadatait. A 68 cm átmérőjű tükörrel ekvivalens fénygyűjtő képességű űrtávcső 3 és 20,7 magnitúdó közötti fényességű csillagok mérésére alkalmas.

A Gaia adatait nagyjából kétevenként publikálják, kivéve azokról a forrásokról, amelyek hirtelen fényességváltozáson mennek keresztül. A rövid idő alatt kifényesedő vagy elhalványodó csillagok fénygörbéjét a Gaia Science Alerts (tudományos riasztás) rendszerben (<http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/home>) publikálják [7], amivel lehetővé teszik, hogy ezeket az objektumokat más műszerekkel is megfigyelhessük, fotometriai és spektroszkópiai módszerekkel. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (CSFK) Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetében működő egyik csoportban azt vizsgáljuk, hogy a Gaia Science Alerts rendszerben nyilvánosságra hozott objektumok közül melyek a fiatal csillagok, illetve hogy mi a fényességváltozások fizikai eredete.

A Gaia Science Alerts adatbázisához használt algoritmus azonban kezdetben nem volt elég hatékony a fiatal csillagok fényességváltozásainak azonosításában, mivel más típusú objektumok alapján fejlesztették ki. Kutatócsoportunk egy része így egy ESA szerződés keretében továbbfejlesztette a Gaia Science Alerts rendszerhez használt algoritmusokat, hogy a fiatal csillagok jellegzetes fényváltozásait jobban felismerjék. Ennek eredményeképpen néhány év alatt jelentősen nőtt a fiatal csillagok aránya a riasztásokon belül.

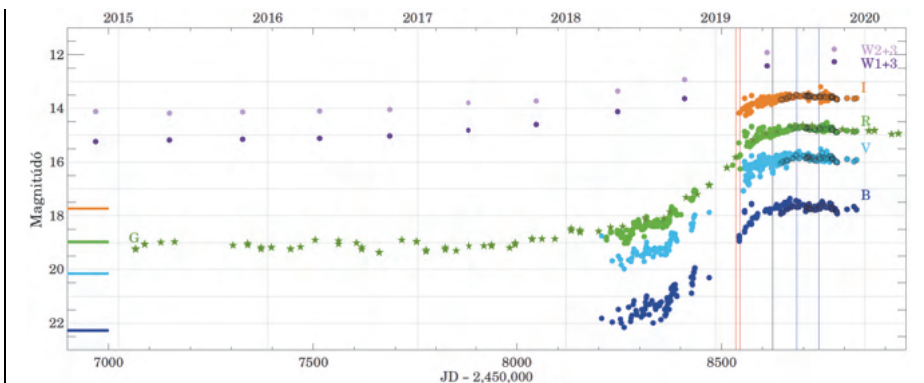
A GAIA SCIENCE ALERTS RENDSZERBEN KÖZZÉTETT FIATAL CSILLAGOK FOTOMETRIÁJA ÉS SPEKTROSKÓPIÁJA

Ha a Gaia Science Alerts rendszer egy potenciális fiatal csillagra riasztást ad, a meglévő, nyilvános archívumokban található adatok adnak arra vonatkozó információt, hogy a riasztott objektum valóban fiatal csillag-e. Amennyiben igen, további méréseket gyűjtünk, hogy a fényességváltozások fizikai okát felderítsük. A csillag fényességét mérjük optikai tartományban 1 méter körüli átmérőjű távcsövekkel, többek

között a Pizskéstetői Obszervatóriumból, illetve a lengyelországi Mount Suhora Obszervatóriumból. Erre azért van szükség, mert a Gaia Science Alerts rendszer átlagosan havonta egy adatpontot szolgáltat csillagonként, valamint a mérés csak egyetlen széles sávú színszűrővel történik, míg az asztrofizikai vizsgálatok általában többszín-fotometriát igényelnek. Az optikai fotometria mellett fontos, hogy a csillagok fényességét közeli infravörösben is mérjük, erre a célra elsősorban a Kanári-szigeteken és Chilében található távcsöveket használunk. A csillag fényességének mérése mellett fontos, hogy a csillag spektrumát is mérjük, mind optikai, mind közeli infravörös tartományban. Az általunk használt műszerek között van a Nordic Optical Telescope (NOT, La Palma, 2,56 m átmérő), a Telescopio Nazionale Galileo (TNG, La Palma, 3,58 m), a Gran Telescopio Canarias (GTC, La Palma, 10,4 m), a Liverpool Telescope (Tenerife, 2,0 m), a New Technology Telescope (NTT, La Silla, 3,58 m), a Large Binocular Telescope (LBT, Arizona, 8,4 m), a Very Large Telescope (VLT, Cerro Paranal, 8,2 m) és az Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, San Pedro de Atacama) távcsőrendszer. Ezeket a kutatásokat – a távcsöidőre benyújtott pályázatok írásától kezdve az adatok elemzéséig – több nemzetközi együttműködés részeként végezzük. A legfontosabb együttműködéseink a következő intézetek munkatársaival vannak: INAF-Osservatorio Astronomico di Roma (Olaszország), Varsói Egyetem (Lengyelország) és California Institute of Technology (USA).

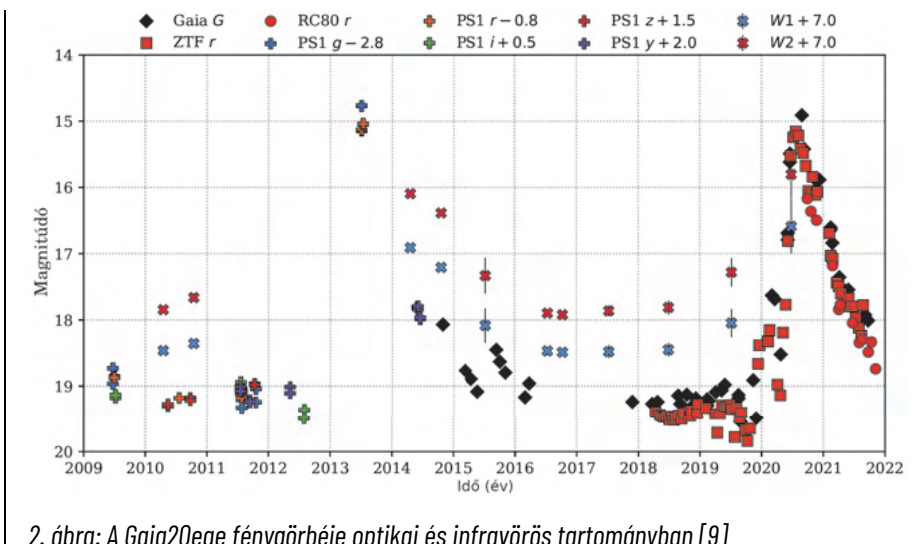
Csoportunk több Gaia riasztáshoz kapcsolódó fiatal csillag adatait elemezte, a következőkben ezek egy részét ismertetjük.

A Gaia18dvy több mint 4 magnitúdót fényesedett 2018 és 2019 során optikai tartományban (1. ábra). A fényesedés amplitúdója és időskálája egy FUor típusú eruptív fiatal csillagra utalt [8]. A csillag FUor eredetének igazolása optikai és közeli infravörös spektroszkópiával történt.



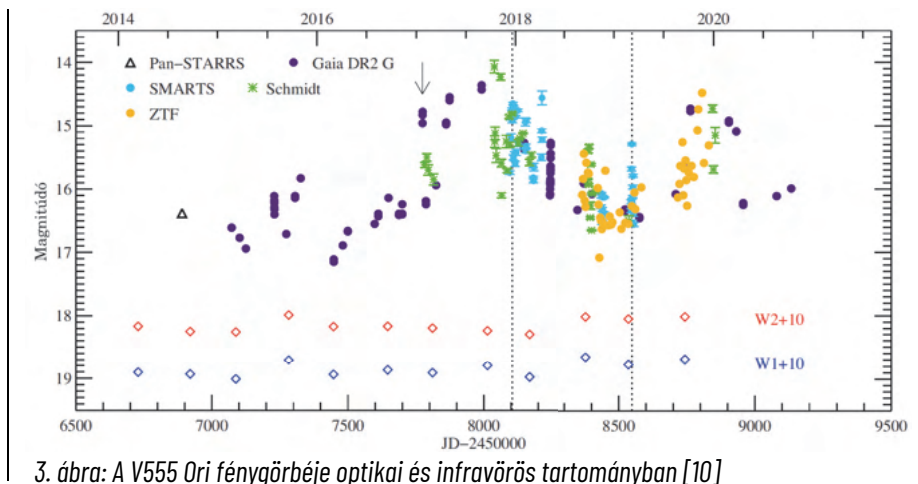
1. ábra: A Gaia18dvy fénygörbéje optikai (B,V,G,R,I) és infravörös (W1,W2) tartományban [8]

Egy másik Gaia riasztásban szereplő forrás, a Gaia20eae az eruptív fiatal csillagok másik típusába sorolható: egy EXor [9]. Ez a forrás 2020-ban 3 magnitúdót fényesedett, és archív adatok alapján egy korábbi hasonló kifényesedése is azonosítható volt (2. ábra). A fényesedés amplitúdója és a kitérés ismétlődése EXorra utalt. Az optikai és közeli infravörös spektrumok is megerősítették ezt a következtetést: a Gaia20eae spektruma nagyon hasonló az EXor típusú eruptív fiatal csillagok prototípusa, az EX Lupi spektrumához.



2. ábra: A Gaia20eae fénygörbéje optikai és infravörös tartományban [9]

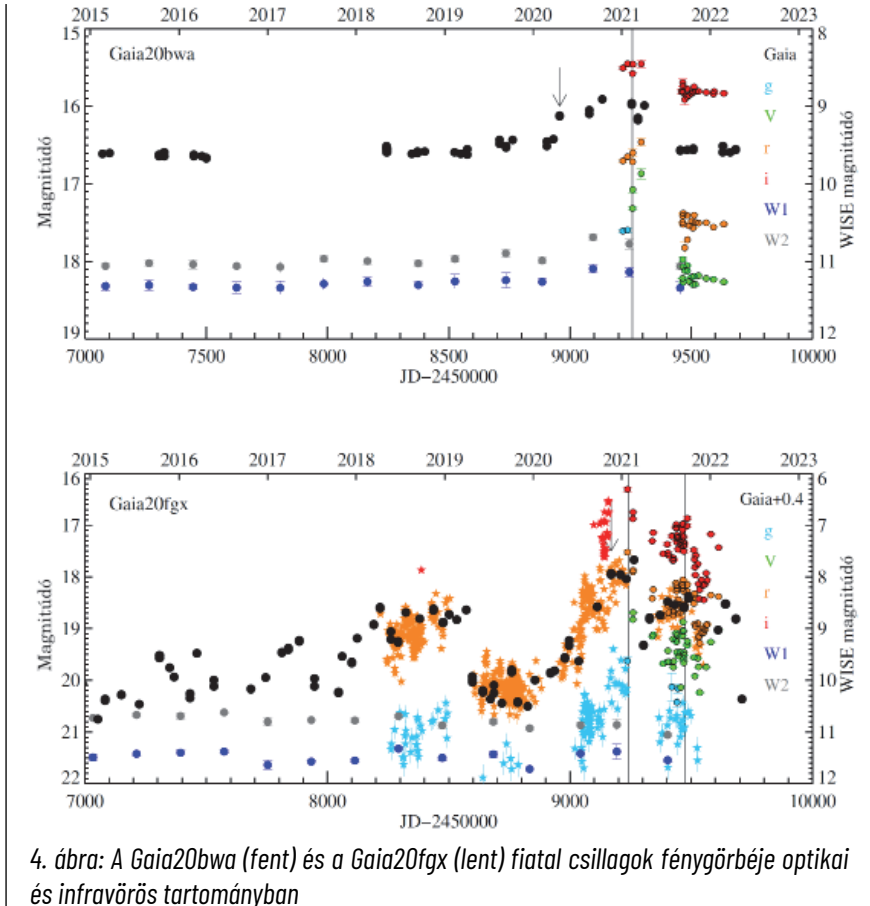
A V555 Ori nevű T Tauri típusú csillag 1,5 magnitúdós fényesedése miatt került be a Gaia riasztások közé (Gaia17afn) 2017-ben. A fényesedés időskálája körülbelül egy év volt, és a kifényesedés 2019–2020 fordulója körül megismétlődött (3. ábra). Bár a fényesedés időskálája és amplitúdója alapján egy EXor típusú fiatal csillag is lehetett volna, a mérések alapján sikerült igazolni, hogy másról van szó [10]. A fénygörbék egy része ugyanis néhány napos kvázi-periodikus fényesség-ingadozást is mutatott. Ez a jelenség tipikus tulajdonsága az AA Tauri típusú csillagoknak, amelyeknél az akkréciós korong egy része a csillagot periodikusan elfedi. Az összes fotometriai és spektroszkópai mérés erre a következtetésre vezetett.



3. ábra: A V555 Ori fénygörbéje optikai és infravörös tartományban [10]

A Gaia20fgx és Gaia20bwa fiatal csillagok hasonló időskálájú, nagyjából egyéves kifényesedést mutattak. A Gaia20bwa kifényesedésének amplitúdója 0,5 magnitúdó volt, a Gaia20fgx esetében pedig 2,5 magnitúdó. Az időskála alapján mindkét csillag kifényesedése utalhatna EXor típusú eruptív fiatal

csillagra, míg a fényesedés amplitúdója alapján a Gaia20fgx esetén valószínűbb, hogy eruptív fiatal csillag (4. ábra). Ezeknél a forrásoknál is a spektroszkópia adta meg a hiányzó információt. Az optikai és közeli infravörös spektrumok alapján becslést végeztünk az akkréciós ráta értékére, vagyis arra, hogy egységnyi idő alatt mennyi anyag hullik a csillag körüli korongból a csillagra. Azt találtuk, hogy az akkréciós ráta nem volt olyan magas, mint az eruptív fiatal csillagoknál, hanem ahhoz hasonló, mint amit más, nagyjából ekkora tömegű T Tauri típusú fiatal csillagoknál mértek. Így a Gaia20bwa és Gaia20fgx a hasonlóságuk ellenére nem eruptív fiatal csillagok.



ÖSSZEFOGLALÁS

A Gaia Science Alerts rendszer már az eddigi eredmények alapján is sikeresnek bizonyult fiatal csillagok fényességváltozásának azonosításában. A rendszer által riasztott források között több érdekes fiatal csillagot azonosítottunk: egy FUor típusú eruptív fiatal csillagot (Gaia18dvy), egy EXor típusú eruptív fiatal csillagot (Gaia20eae), két olyan fiatal csillagot, amelyek éves időskálájú kifényesedést

mutatnak, de nem sorolhatók az eruptív fiatal csillagok közé (Gaia20bwa és Gaia20fgx), illetve egy AA Tauri típusú fiatal csillagot (V555 Ori).

A Gaia Science Alerts keretében meghirdetett csillagok ugyanakkor csak egy kis részét képezik a Gaia mérései alapján eddig közzétett adatállománynak. A Gaia Archívumban (<https://gea.esac.esa.int/archive/>) elérhető asztrometriai és fotometriai adatokat elemezve csoportunk más fontos eredményeket is elért a fiatal csillagokkal kapcsolatban [11,12].

A Gaia űrtávcső még évekig szolgáltatja majd az adatokat Tejútrendszerünk csillagainak fényességéről és távolságáról, sok érdekes eredmény várható még, többek között fiatal csillagokról is.

Köszönetnyilvánítás

A csoport kutatómunkáját az ESA PRODEX 4000132054-es számú projekt (PI: Marton Gábor), illetve a European Research Council (ERC) Horizon 2020 kutatási és innovációs programja (716155 projekt, SACC-RED, PI: Kóspál Ágnes) támogatja.

Irodalomjegyzék

- [1] Shu F.H., Adams F.C., Lizano S. (1987): *Star formation in molecular clouds: observation and theory. Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics*, 25, 23
- [2] André P., Ward-Thompson D., Barsony M. (1993): *Submillimeter Continuum Observations of rho Ophiuchi A: The Candidate Protostar VLA 1623 and Prestellar Clumps. The Astrophysical Journal*, 406, 122
- [3] Hillenbrand L.A., Findeisen K.P. (2015): *A Simple Calculation in Service of Constraining the Rate of FU Orionis Outburst Events from Photometric Monitoring Surveys. The Astrophysical Journal*, 808, 68
- [4] Audard M. et al. (2014): *Episodic Accretion in Young Stars. In: Protostars and Planets VI*, ed. H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, T. Henning, University of Arizona Press, Tucson, 387
- [5] Herbig G.H. (2008): *History and Spectroscopy of EXor Candidates. The Astronomical Journal*, 135, 637
- [6] Dunham M.M. et al. (2013): *The Luminosities of Protostars in the Spitzer c2d and Gould Belt Legacy Clouds. The Astronomical Journal*, 145, 94
- [7] Hodgkin S.T. et al. (2021): *Gaia Early Data Release 3. Gaia photometric science alerts. Astronomy & Astrophysics*, 652, A76
- [8] Szegedi-Elek E. et al. (2020): *Gaia 18dvy: A New FUor in the Cygnus OB3 Association. The Astrophysical Journal*, 899, 130
- [9] Cruz-Sáenz de Miera F. et al. (2022): *Recurrent Strong Outbursts of an EXor-like Young Eruptive Star Gaia20eae. The Astrophysical Journal*, 927, 125
- [10] Nagy Z. et al. (2021): *Dipper-like variability of the Gaia alerted young star V555 Ori. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504, 185
- [11] Marton G. et al. (2019): *Identification of Young Stellar Object candidates in the Gaia DR2 x AllWISE catalogue with machine learning methods. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487, 2522
- [12] Szilágyi M., Kun M., Ábrahám P. (2021): *The Gaia view of the Cepheus flare. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 5164

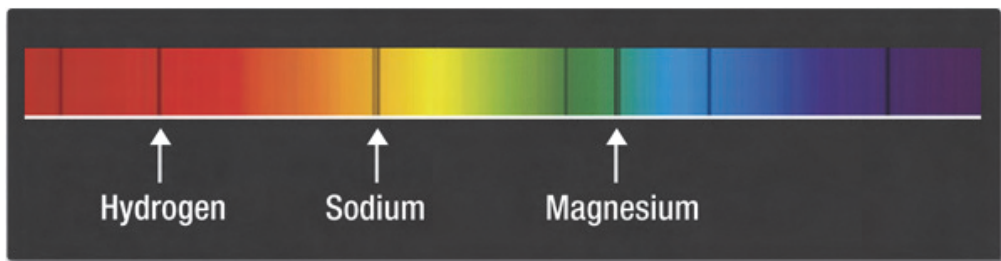
A csillagászati spektroszkópia alkalmazásáról az exoplanetáris kémiában

Futó Péter

Debreceni Egyetem,
Ásvány- és Földtani
Tanszék

A CSILLAGSZÍNKÉPEK ANALÍZISÉNEK RÖVID TÖRTÉNETE

A színeképelemzés (spektrálanalízis) és az ezzel foglalkozó tudományág, a spektroszkópia története több évszázados múltra tekint vissza. Maga a spektrum szó Newtontól származik, aki sok más egyéb jelentős felfedezése mellett elsőként bontotta színekre a fehér fényt egy prizma segítségével. Később a 18. század első felében több természettudós is kísérletezett a napfény felbontásával. A 19. század első felében a csillagászati spektroszkópia születését Joseph von Fraunhofer felfedezésének idejére teszik, amikor a német fizikus elsőként készített spektroszkópot, s amelynek segítségével a Nap színeképében 600 vonalat mutatott ki.



1. ábra: A hidrogén, a nátrium és a magnézium színeképvonalai a Nap spektrumában. (Forrás: NASA)

Ezzel egy időben W.H. Fox Talbot és John Herschel kémiai elemekkel festett lángok rögzített színeképének vizsgálata során felfedezték, hogy a módszerrel kémiai elemzés végezhető. A színeképelemzések alapján új kémiai elemeket is fedeztek fel, a csillagokat színeképeik alapján pedig első ízben Pietro Angelo Secchi (1818–1878) jezsuita csillagász sorolta osztályokba 1863-ban. Secchi az általa meghatározott 3 klasszifikációs csoportba a csillagokat felszíni hőmérsékletük csökkenő sorrendjében sorolta be. Ezt tovább fejlesztve, a csillagászatban napjainkban is használatos Harvard-féle osztályozási rendszert a 20. század elején alkották meg. A rendszerben minden színeképosztályhoz a felületi hőmérsékletek és az abszorpciós spektrum egy-egy tartománya tartozik, s az osztályozás a csillagok csökkenő felületi hőmérsékletének sorrendjében történik (O, B, A, F, G, K, M fő osztályok).

A csillagok összetételének meghatározásában az első eredményeket a legközelebbi csillag, Napunk megfigyelése szolgáltatta. A Naprendszer általános kémiai összetételének közelítő modellezését pedig az ősi, kevésbé átalakult meteoritok elemzésének segítségével végezték el. A szenes kondritok kémiai összetétele jó egyezést mutat a napszínkép analízise útján meghatározott kémiai elemgyakoriságokkal. Ez utóbbinak az előbbivel történő összevetése a szoláris köd elemösszetételéről szolgáltat fontos információkat, melyből központi csillagunk és bolygórendszerének tagjai keletkeztek. A jó konzisztencia okán a szoláris összetételt a szakirodalomban gyakran azonosítják a kondritos összetétellel.

A kozmikus anyag alkotóelemeit illetően napjainkban is csupán azon égitestekről vannak közvetlen úton szerzett információink, melyek esetében módunk nyílt a közvetlen anyagvizsgálatokra (meteoritok elemzése, planetáris felszínekről származó anyag vizsgálata). Minden más esetben spektroszkópiai úton jutottunk adatok, információk birtokába. A csillagászati spektroszkópia alkalmazásával nyilvánvalóvá vált, hogy még ha változó gyakoriságban is, de a galaxisunkat felépítő anyag ugyanazokból a kémiai elemekből áll a Tejútrendszer más vidékein is, mint amelyek a Naprendszert felépítik.

A napszínkép analízisére a 20. század második felében alkalmazott módszer nem vette figyelembe a színképvonalak erősségének adott fizikai feltételektől való függését. M. Asplund és munkatársai 2004-ben [1] egy konferencián új eredményeken alapuló összeállítást javasoltak, melyben a korábbi, 1989-ben közzétett és elfogadott szoláris elemgyakoriságokhoz képest eltérések mutatkoztak. Az új összeállításban a korábbival (2,75%) ellentétben a Nap fotoszférájában a fémek hidrogénhez viszonyított össztelege kisebb értékkel szerepelt (1,65%). *(Fémeknek a csillagászatban a hidrogénnél és héliumnál nehezebb kémiai elemeket nevezünk. – A szerk.)* Az eltérés a háromdimenziós naplégrémodellekből adódik, melyek jobban közelítik a valóságot, amiatt, hogy a granulációs áramlások hatását is figyelembe veszik. A spektrális vonalak erősségét a kémiai összetétel mellett a naplégré fizikai paraméterei közül legfőképpen a hőmérséklet befolyásolja. Sőt magának a csillagspektrumnak a megjelenését a hőmérséklet határozza meg [2]. A fotoszféra granulációs szerkezetét forróbb (granulák) és hűvösebb régiók régiók alkotják. Azon színképvonalak esetében, melyek hőmérsékletfüggése nagy, a hőmérsékleti eloszlás átlagértékének számítása hibákhoz vezethet. A 3D módszer eredményeinek figyelembe vételével számított modellek a helioszeizmológiai modellektől eltérő napszerkezetet eredményeznek ugyan, azonban az új módszerrel kapott adatok alapján a Nap fémtartalma jó egyezést mutat a galaktikus szomszédságunkban található csillagközi anyagéval.

A 20. század közepén a csillagokban zajló elemszintézis első jeleit is azonosították, ami kétségtelen bizonyítéka volt annak, hogy a kémiai elemek többsége nem a Világegyetem születésekor keletkezett, hanem kialakulásuk a csillagok működéséhez és különböző fejlődési fázisaihoz köthető. Az 1950-es években szintén a spektroszkópia alkalmazásával kiderült az is, hogy a Napra jellemző izotóparányok és elemgyakoriság nem általánosíthatók más csillagokra.

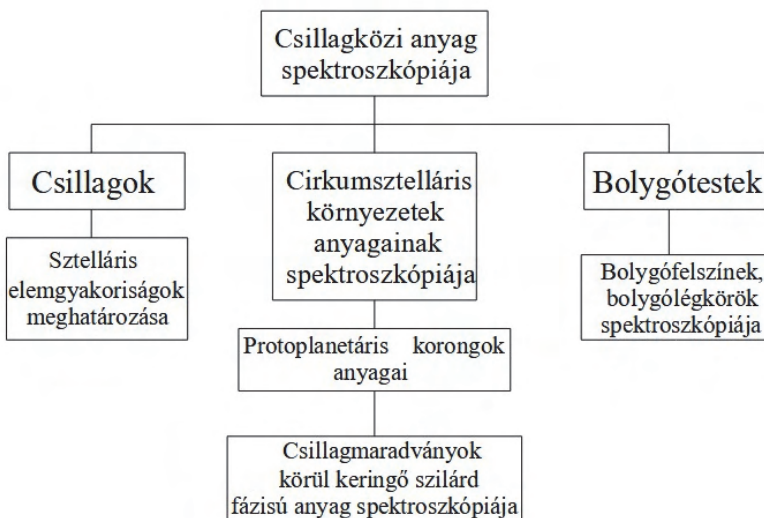
A CSILLAGÁSZATI SPEKTROSKÓPIA ALKALMAZÁSA A MODERN KOZMO- ÉS ASZTROKÉMIAI KUTATÁSOKBAN

A 20. század utolsó évtizedeiben már számos üstökösöt figyeltek meg az elektromágneses spektrum széles tartományában. Kémiai elemeket, molekulákat, izotóp-összetevőket azonosítottak bennük. Ezzel párhuzamosan lehetőség nyílt a csillagközi és a cirkumsztelláris anyag kémiai összetételének a naprendszerbeli üstökösök összetételével való összehasonlítására [3].

A csillagászati spektroszkópia alkalmazásával számos jelenség természete feltárható. Így például az infravörös hullámhosszakon vizsgálható a csillagközi porszemcsék szerkezete, következtetni lehet a pornövekedési folyamatokra fiatal csillagok körüli korongokban [4], valamint a mérési eredményekből meghatározhatók a porszemcsék adott fizikai-kémiai jellemzői.

Megjegyzendő, hogy a csillagászati spektroszkópia az alapja a Naprendszeren kívüli bolygók (az exobolygók) kimutatása egyik legsikeresebb módszerének, a csillagok radiális sebessége mérésének is. A csillag-bolygó fizikai rendszerben a csillagnak és a bolygónak a közös tömegközéppont körüli keringése hatására változik a csillag radiális sebessége. A Doppler-effektus értelmében eltolódik a csillagszínkép hullámhossza, ezt spektrográffal mérni lehet, a kapott adatokból pedig meghatározható a bolygó tömege.

A csillagászati spektroszkópia az exobolygók kutatásának egy másik részterületén, az exoplanetáris asztrokémiában is fontos szereppel bír. Egyrészt mivel a színképelemzés révén lehetőség nyílik a csillaglégkörök kémiai összetételének meghatározására, következtetéseket lehet levonni a körülöttük esetlegesen létező bolygórendszer alapvető kémiai jellemzőire is. Másrészt spektroszkópiai módszerekkel vizsgálható a csillaguk előtt átvonuló, úgynevezett tranzit exo-



2. ábra. A csillagászati spektroszkópia alkalmazott vizsgálati területei az exoplanetáris asztrokémiában

bolygók légkörének kémiai összetétele is. Ennek során több alkalommal megfigyelik az adott csillag abszorpciós színekét akkor, amikor a bolygó átvonul előtte, s azokban az esetekben is, amikor a bolygó a csillagkorong takarásában tartózkodik keringése közben.

A távoli exobolygók spektroszkópiai vizsgálata minden bizonnyal sok érdekes felfedezéssel szolgál majd a jövőben. Az exobolygó-kutatás egyik különösen érdekes esete a TESS űrtávcsővel felfedezett, LHS 3844 b jelű, 1,3 földtömegű kőzetbolygó. A Spitzer-űrtávcsővel végzett infravörös mérések szerint az alacsony Bond-albedójú (0,2) planéta valószínűleg egy olyan légkör nélküli világ, melynek csupasz felszínén a kőzetösszetétel bazaltos, vagy még inkább ultramafikus jellegű (magnéziumban és vasban igen gazdag) lehet. Az ehhez hasonló világok behatóbb tanulmányozása segít jobban megérteni a forró földszerű bolygók légköri evolúcióját. A chilei Las Campanas obszervatórium Magellán II teleszkópja spektrográfjának segítségével egy kutatócsoport rögzítette a nagy energiájú sugárzásnak kitett LHS 3844 b optikai transzmissziós spektrumát. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a kőzetbolygók valószínűleg nem tudják hosszú időn keresztül megtartani még a viszonylag vastag atmoszférát sem az M típusú törpecsillagokhoz nagyon közeli pályán keringve [5].



3. ábra: A sötét felszínű LHS 3844 b jelű exo-kőzetbolygó fantáziaképe. (Forrás: NASA)

SZTELLÁRIS SPEKTROSKÓPIA A NAP GALAKTIKUS SZOMSZÉDSÁGÁBAN

A sztelláris spektroszkópia a csillagok kémiai összetételének vizsgálatával foglalkozik. A Nap galaktikus szomszédságában található csillagok légköri (fotoszférikus) összetételének spektroszkópiai felmérése nem csupán a vizsgált csillagok fejlődéséről, az elemek keletkezéséről (nukleoszintézis), valamint a csillagok kémiai evolúciójáról szolgáltat információkat, hanem

általá tekintést nyerhetünk a Tejútrendszer kémiai fejlődésének évmilliárdos időskálán zajló történetébe is.

Az utóbbi évtizedekben végzett felmérések eredményeinek interpretációja azt mutatja, hogy a csillagok kémiai összetétele, adott elemek sztelláris gyakorisága a csillag kora mellett függ a galaktocentrikus (a Tejútrendszer középpontjától mért), valamint a galaktikus fősíktól számított távolságtól is. Egy 1111 közeli, F, G és K színképtípusú csillagon végzett kémiai elemgyakorisági vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy az $[X/Fe]$ arány például a Mg, Al, Si, Ti elemek tekintetében a nagy és a kis tömegű bolygókkal rendelkező csillagok esetében is egyaránt magasabb, mint az alacsony fémességű csillagoknál [6]. A galaxis vastag korongját túlnyomórészt idős, alacsony fémességű csillagok alkotják. Itt megjegyzendő ugyanakkor, hogy az előbbieken említett felmérés eredményei szerint a bolygókat hordozó vastag korongbeli csillagok lehetnek alacsony fémességűek, de viszonylag magas magnézium és szilícium gyakoriságokat mutatnak, így elmondható, hogy a bolygókeletkezés szempontjából nem számítanak fémszegénynek. A kutatás megerősíti, hogy az $[Fe/H] < -0,3$ dex fémségtartományban a bolygók elterjedtsége nagyobb a magas- α /vastagkorong-populációban, mint a vékony korong csillagainál. Ennek fő oka pedig az, hogy a kis tömegű bolygók kialakulásához alapvető feltétel az olyan elemek magasabb gyakorisága, mint például a magnézium, amely a kőzetbolygók egyik fő építőeleme. Mivel a kis méretű kőzetbolygók jóval gyakoribbak, mint a nagy tömegű testvéreik, következésképpen legtöbbjük α -elemekben gazdag. Ez arra utal, hogy a földszerű bolygók korai keletkezése a galaktikus vastag korongban kezdődhetett, ahol ennek a kémiai feltételei kedvezőbbek [7].

A SZTELLÁRIS ELEMGYAKORISÁGOK ÉS AZ EXOPLANETÁRIS KÉMIA

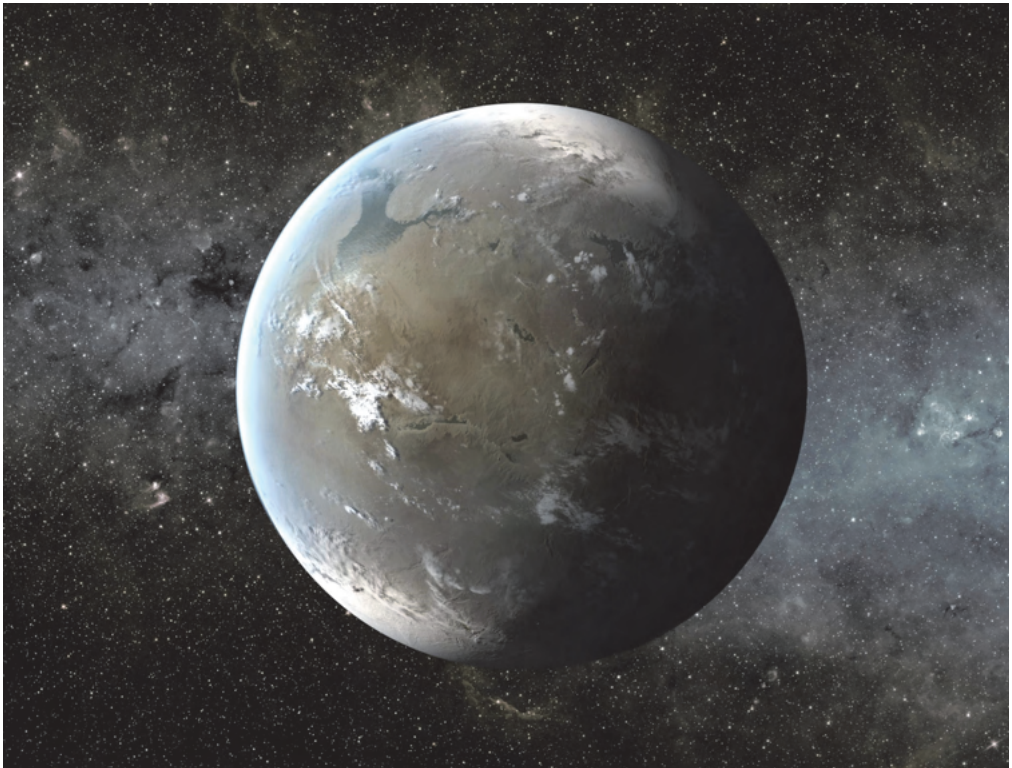
Az exobolygók kémiai összetételével és folyamataival az asztrokémia extraszoláris kiterjesztése, az exobolygó-geokémia, más elnevezéssel az exoplanetáris kémia foglalkozik. A bolygótesetek belső szerkezetét, kémiai-ásványtani összetételét, fejlődését fizikai jellemzőik mellett az őket felépítő kémiai elemek kozmikus gyakorisága, valamint bennük ezen elemek relatív gyakorisága határozza meg. A bolygókat felépítő kémiai elemek relatív gyakoriságaiban eltérések mutatkoznak az egyes bolygórendszerek között.

A protoplanetáris korongokban az anyagukra jellemző C/O, Mg/Si, valamint Fe/Si elemarányok határozzák meg alapvetően a bennük keletkező kőzetbolygók ásványtani összetételét. A C/O az egyik kulcsfontosságú elemarány, mely megszabja, hogy a sziklás planéták köpenye és kérge döntően szén alapú ásványokból, vagy pedig szilikátokból épül-e fel. Ha a C/O nagyobb, mint 0,8, akkor a keletkező bolygóttesteket domináns módon szén alapú ásványok, köztük főként karbidok alkotják majd. A C/O arány 0,8-nél kisebb értéke esetén szilikátok és oxidok lesznek a fő köpeny- és kéregalkotó ásványok. A Mg/Si elemarány kontrollálja a különféle szilikátásványok eloszlását. A sztelláris spektroszkópia tehát az exobolygók tanulmányozását, az egyes kémiai szempontból meghatározott típusok galaktikus gyakoriságának becslését is segíti.

A csillagok összetételének változatossága kijelöli az exoplanetáris mineralógia lehetséges tartományát. A kőzetbolygók jelentős hányadának köpenye olivinben gazdag, míg egy kisebb exo-kőzetbolygó-populáció tagjainak köpenye főként magnéziumban szegényebb ásványokból épül fel. A Nap galaktikus szomszédságában található F, G, és K színek típusú csillagok fotoszférikus elemgyakorisági vizsgálatai azt mutatják, hogy a Naprendszerre általánosan jellemző, szoláris magnézium-szilícium elemarány moláris értéke kissé alulmarad a legtöbb vizsgált csillag esetében megfigyelt Mg/Si arányokhoz képest [8]. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a Tejútrendszerben – pontosabban annak azon szegmensében, ahol a Nap jelenleg tartózkodik – a már kialakult, illetve a kialakulás fázisában lévő kőzetbolygók köpenyének ásványtani összetétele általában magnéziumban kissé gazdagabb a Naprendszer Föld-típusú bolygóéhoz képest.

ÁSVÁNYTANI SOKFÉLESEG

Főként a szilárd felszínű bolygótesteket felépítő ásványok kémiai összetétele szempontjából fontos elemarányok bolygórendszerek közötti eltéréseiből adódó ásványtani sokféleség a kő-



4. ábra: Föld-típusú exobolygó fantáziarajza. Egyes kőzetbolygók magnéziumban gazdagok, míg mások magnéziumban szegények. A szilikátos bolygók mellett pedig léteznek szénben gazdag planéták is a galaxisban. (Forrás: NASA)

zetbolygók típusainak sokféleségét eredményezi. Ugyanis az ásványtani sokféleség a bolygók felépítésében mutatkozó változatosságot is eredményez. A Fe/Si elemarány eltérő értéke például két Föld-típusú planéta felépítésében mutatkozó különbséget eredményezhet azáltal, hogy adott körülmények között a magasabb Fe/Si aránnyal jellemezhető bolygótest a vasban szegényebb társainál nagyobb tömegfrakciójú fémes maggal rendelkezhet.

A sztelláris spektroszkópia eredményei alapján arra következtethetünk, hogy a Tejútrendszernek a Nap szomszédságában elhelyezkedő szegmenseben a kőzetbolygók jelentős hányadának köpenye olivinben gazdag lehet, míg egy kisebb exo-kőzetbolygó-populáció tagjainak köpenye főként magnéziumban szegényebb ásványokból épülhet fel. A szolárisnál kissé magasabb Mg/Si elemaránnal jellemezhető csillagok relatíve gyakoriak, míg az 1-nél kisebb értékkel rendelkezők már lényegesen ritkábbnak számítanak.

A legtöbb kőzetbolygó köpenyének domináns ásványi komponensei az olivin (felső köpeny), a szilikát-perovszkit (MgSiO_3) és a ferroperekliász $[(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O}]$ (alsó köpeny). A Tejútrendszerbeli teresztrikus planéták egy jóval kisebb frakciójának felső köpenyében a Mg/Si aránytól függően az olivinhez képest már relatíve magas a piroxének és a különböző gránátok aránya. A magnéziumban szegény kőzetbolygó alsó köpenyében a szilikát-perovszkit súlyszázalékos aránya relatíve magas a magneziumhoz $[(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O}]$ viszonyítva, sőt ez utóbbi fázist az extrém Mg-szegény protoplanetáris korongokban születő bolygók alsó köpenyében a SiO_2 helyettesítheti.

A C/O mellett a Mg/Si elemarány változása van a legnagyobb hatással egy kőzetbolygó ásványtani összetételének alakulására. Sőt, a magnéziumban gazdag szilikátásványokban és oxidokban bővelkedő teresztrikus bolygók köpenyanyagának termoelasztikus tulajdonságai jelentős mértékben eltérhetnek a magnéziumban szegény, szilíciumban gazdag bolygókétól, aminek eredményeképpen különbség mutatkozik a bolygóbelső geodinamikai folyamatainak hatékonyságában is. A Tejútrendszer kőzetbolygó-populációja egyes tagjai között tehát ásványtani felépítésük különbözősége okán szignifikáns különbségek adódhatnak a geológiai aktivitás mértékében, s a lemeztektonika működési feltételei terén.

Döntő fontosságú tehát, hogy galaxisunk, a Tejútrendszer, valamint saját Naprendszerünk, s benne Földünk fejlődéstörténetének jobb megismerése céljából következtetni lehessen az exobolygók összetételére. Erre nem csupán csillaguk kémiai összetételének meghatározása alapján nyílnak lehetőségek. Az exobolygó-légkörök kémiája, s az ütköző vagy széteső bolygótestek anyagából származó por és törmelék spektroszkópiai vizsgálata révén is lehet következtetni egy adott planetáris rendszer legfontosabb kémiai jellemzőire.

A JÖVŐ ŪRTÁVCSÖVEI ÉS AZ EXOBOLYGÓ-SPEKTROSKÓPIA

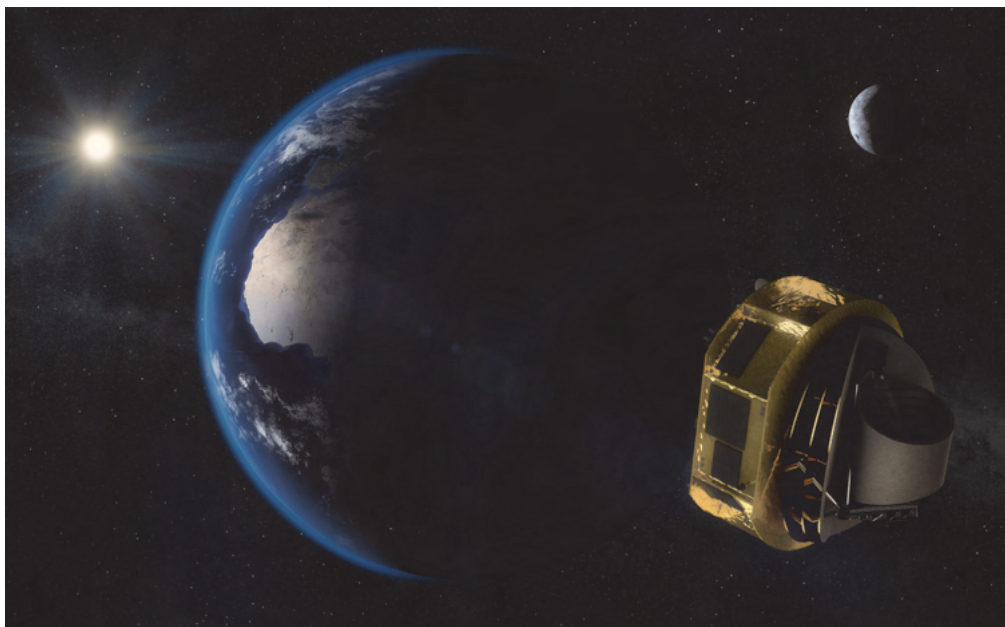
Az exobolygók és légköri spektrumuk rögzítésének három egyszerű módszere alkalmazható a világűrben működő űrcsillagászati eszközök segítségével. Az egyik, a transzmissziós spektroszkópia lényege: a bolygótranszit ideje alatt a csillagfény egy része áthalad az átvonuló boly-

gó légkörén. A spektrum rögzítését követően olyan színeképet kapunk, melyben a bolygó légkör spektrális vonalai ráakódnak a csillagspektrumra. A bolygótranszit alatt, illetve az azon kívüli időben felvett csillagszínkép között mutatkozó különbségekből következtetni lehet a bolygó légkör kémiai összetételére. A reflektáció során a keringési pálya egyes pontjain, s különösen a másodlagos fedéshez közeli pozíciókban a csillagfény visszaverődhet a bolygó atmoszférájáról, s a légköri összetétel nyomozható lesz. A harmadik lehetőség akkor adódik, amikor egy exobolygó felszíne vagy légköre nagyon forró, s feketetest-sugárzást bocsáthat ki.

A 2021. december 25-én felbocsátott James Webb-űrteleszkóp 25 négyzetméter felületű tükrével különösen alkalmas űreszköz néhány száz fényév távolságig az exobolygó légkörök tranzit spektroszkópiai megfigyelésére [9]. A Nap-Föld rendszer L_2 Lagrange-pontja körül pályára állított Webb- űrtávcső tíz évre tervezett megfigyelési programjának egyik legfontosabb célja az Univerzum első galaxisainak megtalálása, ami az első galaxisok és csillagok kialakulásának jobb megértése érdekében végzett kutatás egyik legfontosabb fázisa.

Az űrtávcső mérési érzékenysége alkalmas olyan spektrumok felvételére is a Naprendszer kis égitestjeiről, aszteroidákról, melyek nélkül azok részletesebb földtudományi vizsgálata távolról nem lehetséges, mivel a földi telepítésű műszerek érzékenysége azt nem teszi lehetővé. Ezáltal a remények szerint a következő években sok új információval bővíülhetnek ismereteink a kisbolygók ásványtanát illetően is.

A bolygóatmoszféra infravörös hullámhossztartományban végzett megfigyelése várhatóan nagy segítséget nyújt majd az exobolygó légkörök kategorizálása terén. A légkör-spektroszkópiái



5. ábra: Az ESA Ariel űrtávcsővének fantáziaképe. (Forrás: arielmission.space)

mérések talán legizgalmasabb célja egy olyan bolygó azonosítása, melynek légköri összetétele sok tekintetben hasonló a földi légköréhez.

Az Európai Űrügynökség (ESA) által fejlesztett Ariel (*Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey*) űrtávcső felbocsátását 2029- ben tervezik. Az Ariel programjának fő célja az exobolygók összetételének, kialakulásának és fejlődésének tanulmányozása ezer exobolygó megfigyelése révén. A mérések mind a látható, mind pedig az infravörös hullámhossztartományban történnek [10]. A sok érdekes célpont között szerepelhetnek forró szuperföldek is, melyek közül több bolygó atmoszféráját a felszínüket borító magmaóceánból elgőzölgött kőzetek anyaga alkothatja. Egy tanulmány szerint a SiO spektrális jelei a 3000 K sugárzási hőmérsékletű forró szuperföldek esetében 20 parszek távolságon belül, míg a 3500 K sugárzási hőmérsékletű forró kőzetbolygók esetében 50 parszek távolságig detektálhatók fedési spektrumban az Ariel űrtávcsővel [11]. A légköri összetevők azonosítása révén következtetni lehet a forró szuperföldek felszínét borító magmaóceán összetételére, ami kulcsfontosságú tényező e bolygók kémiai, ásványtani összetételének, valamint kialakulásának jobb megismerése szempontjából [12].

Irodalomjegyzék

- [1] Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J. (2005): *The solar chemical composition. Nuclear Physics A*, 777, 1
- [2] Sódor Á. (2015): *Csillagászati spektroszkópia. Fizikai Szemle*, 65(1), 2
- [3] Tóth I. (2015): *Az üstökösök megismerésének mérföldkövei 2. Üstökös kutatás az űrkorszakban. Meteor Csillagászati Évkönyv 2016, Magyar Csillagászati Egyesület*, 243
- [4] Ábrahám P., Kiss Cs. (2009): *A hideg Világegyetem varázslatos világa – csillagászat a rádióin innen, a vörösön túl. Magyar Tudomány*, 170(10), 1156
- [5] Diamond-Lowe H. et al. (2020): *Optical Transmission Spectroscopy of the Terrestrial Exoplanet LHS 3844b from 13 Ground-based Transit Observations. The Astronomical Journal*, 160, 188
- [6] Adibekyan V.Zh. et al. (2012): *Overabundance of α -elements in exoplanet-hosting stars. Astronomy and Astrophysics*, 543, A89
- [7] Adibekyan V.Zh. et al. (2012): *Exploring the α -enhancement of metal-poor planet-hosting stars. The Kepler and HARPS samples. Astronomy and Astrophysics*, 547, A36
- [8] Spaargaren R. et al. (2020): *Exoplanet bulk silicate composition as a function of host stellar elemental abundances, and its effects on long-term planetary evolution. European Geosciences Union General Assembly, EGU2020-20378*
- [9] Barstow J.K. et al. (2015): *Transit spectroscopy with James Webb Space Telescope: systematics, starspots and stitching. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448, 2546
- [10] www.arielmision.space
- [11] Ito Y. et al. (2022): *Detectability of Rocky-Vapour atmospheres on super-Earths with Ariel. Experimental Astronomy*, 53, 357
- [12] Morbidelli A., Raymond S.N. (2016): *Challenges in planet formation. Journal of Geophysical Research: Planets*, 121, 1962

Bemutatkozik a Bajai TIE Rakétamodellező Szakosztálya

Mészáros András

Tudományos
Ismeretterjesztő
Egyesület,
Magaslégköri
Ballon- és
Rakétamodellező
Szakosztály, Baja

BEVEZETÉS

A rakétamodellezés az űrkorszak kezdete óta jelen volt hazánkban, bár az 1980-as évek végétől, a Magyar Honvédelmi Szövetség (MHSZ) megszűnésével hivatalos módon már nem volt folytatható. A következő évtizedekben szinte eltűnt Magyarországon és csak elszigetelt próbálkozások történtek. 2018-ban vetődött fel az ötlet néhány modellezőben, hogy a tevékenységüket egyesületi formában, a jogszabályoknak megfelelően fogják végezni. Az ötlet mögé állt Hegedűs Tibor, aki a Szegedi Tudományegyetem Bajai Obszervatóriumának igazgatójaként, Jáger Zoltán tudományos munkatárssal közösen koordinált, már évek óta létező DAMBALL fantáziánévű magaslégköri ballonos csapatot vezette, továbbá Pausch Róbert, a Bajai Tudományos Ismeretterjesztő Egyesület (TIE) elnöke is. A ballonos és rakétás csoport egyesült, így jött létre a Bajai TIE legújabb szakosztálya 2019 végén. A 2020-as év az építkezés időszaka volt, ekkor szerveztük az első bemutatókat, rakétamodellező hétvégéket. Az ismeretterjesztő tevékenységünk igazán csak 2021-ben indult el.



A SZAKOSZTÁLY RENDEZVÉNYEI

Augusztusban tartottuk egyik legjelentősebb rendezvényünket, a Rakétamodellező és Természettudományos Ismeretterjesztő Táborunkat a 14-18 éves korosztálynak. Ez a hagyományteremtő tábor hat napig tartott, a fő tematika a modellrakéták építése és reptetése, elméleti előadások a rakéták felépítéséről, fajtáiról. A programot színesítette több űrkutatási jellegű előadás, melyeket MANT tagok tartottak (Schuminszky Nándor és Zombok Gábor), illetve a Bajai Csillagvizsgáló nyílt napja, távcsöves észlelés. Ezen kívül éjjellátó bemutató, sárkányhajózás és kirándulás is szerepelt a programok között. A rakétafelbocsátások helyszíne a bajai Bokodi úti repülőtér volt. A reptérrel és a helyi repülőmodellező klubbal kiváló a viszonyunk, illetve Baja környékén már nincsenek olyan forgalmas légterek, ami pl. az



ország közepén rendkívül behatárolja a tevékenységünket. Az ifjú űrmérnököknek – bár a rakétákat gyári készletekből építették – bőven volt feladatuk, például ragasztani, festeni vagy akár ejtőernyőzsírnórt csomózni. A felbocsátásokon az előzőleg elkészített rakétákat lehetett kipróbálni. A távvezérelt indításokat kórusban számolták vissza a fiatalok. Sokszor akár egy kilométerről is vissza kellett hozni a szél által elsodródott rakétákat, de a lelkesedés sötétedésig kitarott! A rendezvény sikerét jelzi, hogy az összes résztvevő jelezte, hogy jönne a jövő évi táborunkra is! Az egyik diák továbbá űrmérnöki képzésen folytatja tovább egyetemi tanulmányait.

A Szegedi repülőnapon is képviseltettük magunkat, itt több százan tekintették meg tagtársaink felbocsátásait, illetve a kiállított rakétákat. Ősszel a zsámbéki HM Fesztent kaptunk lehetőséget a bemutatkozásra. Standunkon kiállítottuk a különböző kategóriájú modellrakétáinkat, elmagyaráztuk a résztvevőknek a működésüket, vagy akár azt, hogy hogyan tudnak a szakosztályunkhoz csatlakozni. Ez volt az első ilyen jellegű bemutatónk, amit nagyon élveztünk.

A nyári junior tábor meghirdetésekor több felnőtt is jelentkezett, akiket sajnos nem állt módunkban fogadni a korhatár miatt. Így nekik ősszel egy rakétaépítő hétvégét tartottunk hasonló tematikával. A délelőtti folyamán előadásokat hallgathattak a modellrakéták felépítéséről, illetve fedélzeti elektronika, biztonságtechnika és jogi környezet témákban, továbbá gyakorlati foglalkozást kompozit anyagok gyártástechnológiája címmel. Itt a bajai modellezők vezetője, Bors Attila mutatta be a modellezésben jelenleg csúcstechnológiának számító szén- és üvegszál erősítésű alkatrészek előállítását. A délután

folyamán kitelepültünk a reptérre, és sötétedésig bocsátottuk fel a kisebb-nagyobb rakétákat. Többen ezen a hétvégén építették meg és próbálták ki az első saját rakétájukat. A legnagyobb magasságot – 1600 métert – egy másfél méter magas, 830 Ns-os rakétamotorral meghajtott „high power” rakéta érte el, amelyet Almási Csaba tagtársunk készített. Határainkon túlról, Kassáról is érkeztek vendégeink, akik bemutatták a saját modellező klubjuk elismerésre méltó teljesítményét. A környező országok mindegyike részt vesz a nemzetközi modellversenyeken. Célunk, hogy hamarosan Magyarország is belépjen ebbe a körbe. A modellező hétvégén a Spacejunkie csapata és az RTL Klub is készített riportokat a szervezőkkel és a résztvevőkkel. Az esemény része volt a Bajai TIE Magyar Tudomány Ünnepe rendezvénysorozatnak.

Novemberben a felvidéki modellező klub hívott meg bennünket Kassára, ahol már a 2022-es magyar „Big Rocket” nemzetközi verseny előkészítését beszéljük meg. Ezen kívül bemutatták a hibridrakéta-fejlesztési projektjeiket és a versenyrakétaik elkészítésének fogásait is. Este kötetlen beszélgetés és bowlingozás zárta a programot, a szíves fogadtatást ezúton is köszönjük!

Szakosztályunk az oktatáson kívül részt vesz egyetemi rakétaprojektekben is. Legelső együttműködésünk a gödöllői egyetemmel indult, itt az első prototípus már készen áll a tesztekre. A cél egy 10 km-es magasságba juttatható szilárd hajtóanyagú kutatórakéta, amellyel különböző méréseket lehet végezni és az adatokat továbbítani a földi vevőegységnek. Később ezt a rakétát fejlesztenénk tovább hibrid rakétamotorral, amellyel nagyobb magasságba is eljuthat. Szakosztályunk a rakéta kompozit alkatrészeit, a gödöllői egyetem diákjai a fedélzeti elektronikát és a vezérlő szoftvert fejlesztik. További egyetemi kapcsolatokat tervezünk kiépíteni más intézményekkel is.

Sajnos a 2020–2021 évek COVID karanténokkal terhelt ideje nem kedvezett a ballonozásnak. 2020 folyamán még sikerült három bérindítást és két saját kísérletet elvégezni, de 2021 során teljesen leálltak a repülések. A szakosztály ballonozó tagjai két középiskolai diákcsapat (Sopron és Kaposvár) és egy csillagászati egyesület (Bakonyi CSE) ballonos kísérleteit támogatták folyamatosan. A járvány enyhülésével 2022. februártól tervezzük újraindítani, és egyre érdekesebb kísérletekkel továbbfejleszteni a magaslégköri ballonos repülési programot. További ígéretes lehetőség az ELTE–SZTE együttműködésben a 2022. őszi szemeszterben elindítandó űrkutatási alapozó úrmérnöki tantárgyakhoz kapcsolandó gyakorlatok közé történő beemelés. Általános gyakorlat külföldön is, és a korábbi magyar műholdak építése során is így volt, hogy a világűrbeli működésre szánt műszereket, elektronikus egységeket 35 km fölé emelkedő ballonok fedélzetén tesztelik. Csapatunk ilyen igényeket, és az egyetemi oktatás szükségleteit is ki tudja szolgálni majd.

Reméljük, a 2022-es év során sikerül folytatni az oktatási és kutatási programjainkat és még több érdeklődőhöz eljutnunk hazánkban. Amennyiben az Űrtan Évkönyv olvasói között is lennének új érdeklődők, akik kíváncsiságát felkeltette a rakétamodellezés, örömmel várjuk őket a sorainkba az alábbi elérhetőségeinken:

Facebook csoportunk: <https://www.facebook.com/bajaitit/>

Tábori jelentkezés: <http://bajaitit.hu/tabor>

Két hazai űrkongresszus - a gyűjtő szemével

Schuminszky
Nándor

BEVEZETÉS

„Az űrhajósok az emberiségnek az a kis csoportja, akik messziről láthatták Földünket, és átérezhették, hogy milyen kicsi és törékeny is. Mi űrhajósok reméljük, hogy minden ember meg fogja érteni azt az elvet, hogy bolygónkat úgy kezeljék, mint az otthonukat, otthonunkat, amelyen születtünk, amelyen élünk, és amelyen gyermekeinknek és unokáinknak is kell majd élniük.” Ezeket a szavakat mondta Alekszej Leonov az Űrhajósok Nemzetközi Szervezetének (*Association of Space Explorers, ASE*) megalakuló ülésén, 1985. október 2-án egy Párizs közelében lévő kastélyban. Az ötnapos kongresszus címe és tárgya Bolygóotthonunk (*The Home Planet*) volt. A felszólaló űrhajósok a Föld és környezetének a megóvása iránti felelősségérzetüknek adtak hangot. A tagság alapfeltételének azt szabták, hogy a jelöltnek minimum egy Föld körüli keringést kell végrehajtania. Így lett az ASE-tagság „mérceje” Jurij Gagarin. Az ASE 1. űrkongresszusáról kiadott sajtóközlemény feltűnő mozzanata lehetett az olvasók számára, hogy a megalakuló ülésen egyetlen női űrhajós sem vett részt. Számunkra viszont jó hírt jelentett, hogy a 13 országból érkezett 25 alapító tag között ott volt hazánk – máig egyetlen – űrhajósa, Farkas Bertalan is.

AZ IAF 34. KONGRESSZUSÁNAK „MELLÉKLETE”

Kevesebben emlékezhetnek talán arra, hogy két évvel korábban Budapest adott helyet az IAF (*International Astronautical Federation*, Nemzetközi Asztronautikai Szövetség) 34. kongresszusának. A párizsi űrkongresszussal szemben, három űrhajósnő jött Magyarországra. A sajtó



1. ábra: Találkozás a Honvédelmi Minisztériumban. A kép jobb szélén Svetlana Szavickaja – Cinege Lajos honvédelmi miniszter mellett – a bal szélén Steven Hawley, mellette (akkori felesége) Sally Ride ül. (Forrás: HM, 1983. okt. 10., Szabó Barnabás)



2. ábra: Sally Ride az STS 41-G Challenger fedélzetén a Pille dózismérővel, 1984 októberében. A szigorúan titkos akció miatt ez a fotó még ma sincs fenn a NASA egyetlen fotótárában sem

szerint Sztvetlana Szavickaja és Sally Ride az IAF-kongresszusra Budapestre, míg Valentyina Tyereskova Balatonaligára a Nemzetközi Nőszövetség meghívására érkezett meg.

Nem jelent meg egyetlen kép sem arról, hogy Tyereskova találkozott volna szovjet és amerikai kolléganőjével itt, Magyarországon, 1983 októberében. Ennek ma sem tudom az okát, és a következő sorokat is csak feltételezem, de valószínűleg ekkor dőlhetett el, hogy Sally Ride a világűrben próbálhatja ki a magyar dózismérőt. Ha jó szakmai véleményt ad a műszerről, akkor a NASA olyan vételárat kínál a magyar államnak, amely alapvetően befolyásolhatta volna a hazai űripar kialakulását, elősegíthette volna annak ugrásszerű fejlődését. Azonban megérkezett a „tiltó parancs” a Pille katonai alkalmazási lehetőségének érvével. Maradt nekünk a „titkos” fotó, és vigasztalhat az a tudat, hogy a Pille ma már a Nemzetközi Űrállomás alapfelszereléséhez tartozik.

ASE 2., MAGYARORSZÁG, 1986. OKTÓBER 13-17.

Eleget téve Farkas Bertalan és az MTA Interkozmosz Tanácsa meghívásának, Budapesten tartották meg az ASE 2. kongresszusát, 1986. október 13-tól 17-ig. A mottó a Kozmosz, mint az élet közege (angolul *Toward Space Civilization*) volt. Bár több űrhajós, aki az előzetes tájékoztatók „valószínűnek” mondotta részvételét, végül egyéb elfoglaltságaikra hivatkozva nem jött el Magyarországra, a megjelent űrhajósok száma 13 országból 32 volt. A kongresszuson részt vett Magyarai Béla is, de ő a „gagarini mérce” alapján nem lehetett az ASE tagja.

Az előadásaik során nemcsak a közönséggel, hanem egymással is megosztották tapasztalataikat, és kicserélték nézeteiket az űrhajózás közelebbi és távolabbi jövőjére vonatkozóan. Egyhangú volt a vélemény, hogy az emberiségnek közös erőfeszítéseket kell tennie az űrben, a Föld minden nemzetének érdekét szolgálva.

Az együtt töltött napok alatt – az előzetes programmal szemben – háttérbe szorult az ASE alapokmányának kidolgozása, mert az űrhajósok a kollegiális, baráti eszmecseréket sokkal fontosabbnak

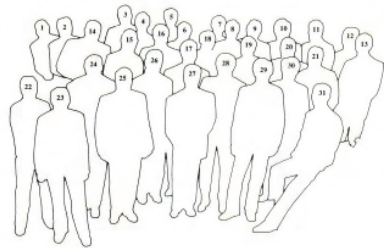
SPACE FLIERS ATTENDING THE SECOND PLANETARY CONGRESS OF THE ASSOCIATION OF SPACE EXPLORERS



1. Valyeri F. Bykovsky, Soviet Union
2. Alexander P. Alexandrov, Soviet Union
3. Byron K. Lichtenberg, United States
4. Rodolfo Neri, Mexico
5. Vladimir A. Solovyov, Soviet Union
6. Nikolai N. Rukavishnikov, Soviet Union
7. John-David Bartoe, United States
8. Dumitru Prunariu, Romania
9. Zhugderdemigiyn Gurragcha, Mongolia
10. Taylor G. Wang, United States
11. Robert F. Overmyer, United States
12. Oleg Y. Atkov, Soviet Union
13. James B. Irwin, United States
14. Alexei A. Leonov, Soviet Union
15. Loren W. Acton, United States
16. Bertalan Farkas, Hungary
17. Wubbo J. Ockels, Netherlands
18. Ernst Messerschmid, FRG
19. Leonid I. Popov, Soviet Union
20. Georgii Ivanov, Bulgaria
21. Arnaldo Tamayo-Mendez, Cuba
22. Konstantin P. Feoktistov, Soviet Union
23. Oleg G. Makarov, Soviet Union
24. Miroslaw Hermaszewski, Poland
25. Vladimir A. Lyakhov, Soviet Union

26. Valyeri N. Kubasov, Soviet Union
27. Karl C. Henize, United States
28. Sultan Al-Saud, Saudi Arabia
29. Russell L. Schweickart, United States
30. Sigmund Jaehn, GDR
31. Walter Cunningham, United States

Not pictured, Donn F. Eisele



2

3. ábra: Az ASE-kiadvány fotóján az űrhajósok megkeresésében a beszámozott rajz segít. A képről hiányzik Donn Eisele és Magyarai Béla

ítélték. Az alapokmány félretolása egyik fő okának az Egyesült Államoknak a „csillagháborús” SDI (*Strategic Defense Initiative*) programhoz való ragaszkodása volt, de a szervezet pénzügyi, gazdasági működésének biztosítására is további megbeszéléseket helyeztek kilátásba. Összességében az ötnapos kongresszus jó légkörben folyt le, hasznos találkozásnak bizonyult, öregbítve hazánk hírnevét az úrvilágban is.

ASE 33., MAGYARORSZÁG, 2021. NOVEMBER 1-5.

Az első rossz hír a vírushelyzet miatt érkezett meg. A 2020 őszére tervezett ASE-kongresszust el kellett halasztani, legalább egy évvel. A második rossz hírt – az ösztöndíjjal az Egyesült Államokban tartózkodó – Vincze Miklós barátom küldte. Az ASE egyik alapító tagja, Rusty Schweickart lemondta az utazást a COVID-veszélyre hivatkozva. Ezért ki kellett valamit találnom, hogy megszerezsem az aláírását. Ugyan 1986-ból már volt tőle a gyűjteményemben az ASE 2. kongresszusa alkalmával, de egy személyes találkozás mindig más. Mikin keresztül elküldtem neki a híres „vízkérő” videót, meg néhány fotót az egri borospincében mutatott táncáról. Azzal is tisztában voltam, hogy Rusty már évek óta nem ad autogramot, még a piaci árért (150 dollár) sem, de bíztam benne, hogy a hatás nem marad el. Így is lett, és Miki barátom hozta haza azt a dedikált fotót, amelyen bizony „történelminek” nevezi a küldött képeket.



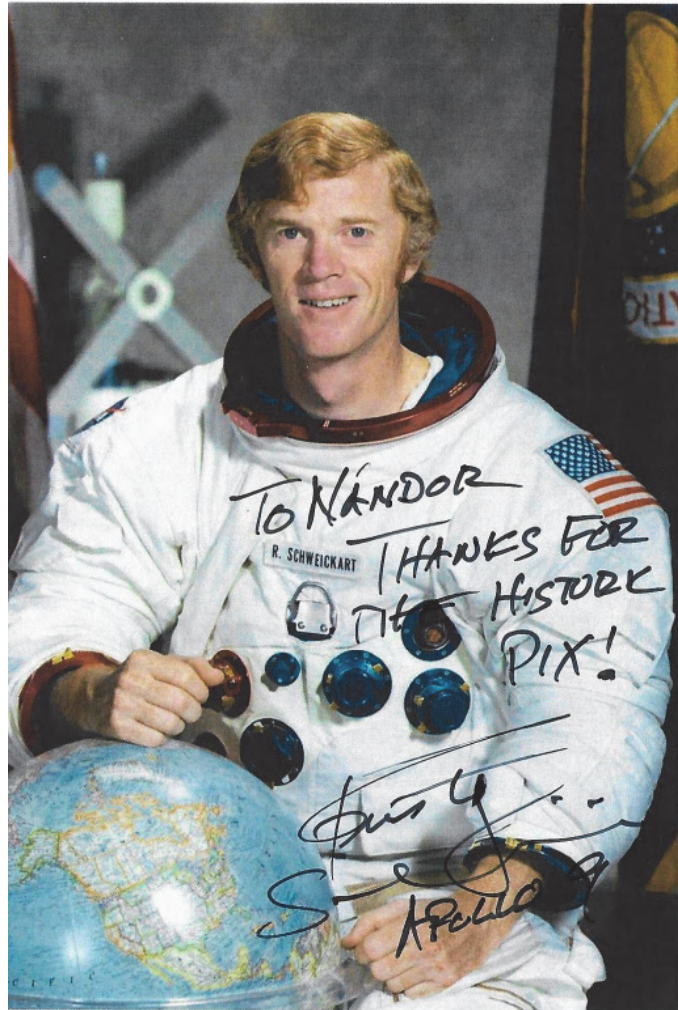
4. ábra: Rusty Schweickart üveges tánca. Kitűnő egyensúlyérzékét mint holdkomppilóta is kamatoztathatta

Öröm az örömben - nyugtázhattam az eseményeket, de inkább az öröm folytatódott. Charles Simonyi is jelezte, hogy nem jön Magyarországra, csak egy videóüzenetet fog küldeni. Ezzel kútba esett az az elképzelésem, hogy a Jurcsihin által Bajkonurból hozott földet együtt teszik a kistarcsai Ūrfa alá. Aztán Jurcsihin is elmaradt, és az OKK-val tervezett közös program is hamvába holt.

Ennyi kellemetlen hír után reméltem, hogy valami jobb következik. Amikor Bacsárdi László Székely Anna Krisztina társaságában felkeresett, felcsillant a remény, hogy az 1986-os történetekhez hasonló eseményekben vehetek részt. Négy vitrint tölthettem meg a gyűjteményemből, Illyés András segítségével. Még magam sem hittem el, hogy a lakásban semmi sem látszott az elvitt tárgyakból, sőt, a vitrinek alján lévő szekrényekből

még négy vitrint tudtam volna telerakni. Az installálási munka nem volt egyszerű, mert az előadóterem előtti folyosórészen csak állva dolgozhattam. A hatórás munka és ugyanennyi a lepakolásnál alaposan kifárasztott, és ha nincs Andris olyan kitűnő erőben, akkor nem tudtam volna egyedül visszavinni a dobozokat a 4. emeletre. Ez meg is győzött arról, hogy majdnem biztosan ez volt az utolsó kiállításom.

Legnagyobb sajnálatomra, csak a budapesti nyílt napon találkozhattam az űrhajósokkal, és nem mind-egyikükkel. Budapest, Debrecen, Győr, Kecskemét és Miskolc között „osztották el” őket, ezért csak kb. ötödreszükkel lehetett az egyes helyeken találkozni. Nagyobb problémát okozott, hogy nem állt ren-



RUSSELL SCHWEICKART

5. ábra: A „történelmi” fotókért kaptam a dedikációt



6. ábra. A négy vitrin egyike: magyar úrhajós

úrhajós látható. A hozzám beérkezett információk alapján a városokban lefotózott úrhajósok száma megegyezett – 36 fő – a fotón lévőekkel, de a nevek különböztek. Persze a KKM fotóhoz nem tartoznak nevek, ezért arcról és egyéb fotókról kellett egyesével mindenkit beazonosítani, a különbségeket megtalálni. (A sajtóban mindenhol „mintegy félszáz” úrhajósról írtak, de pontos számot sehol sem közölték).

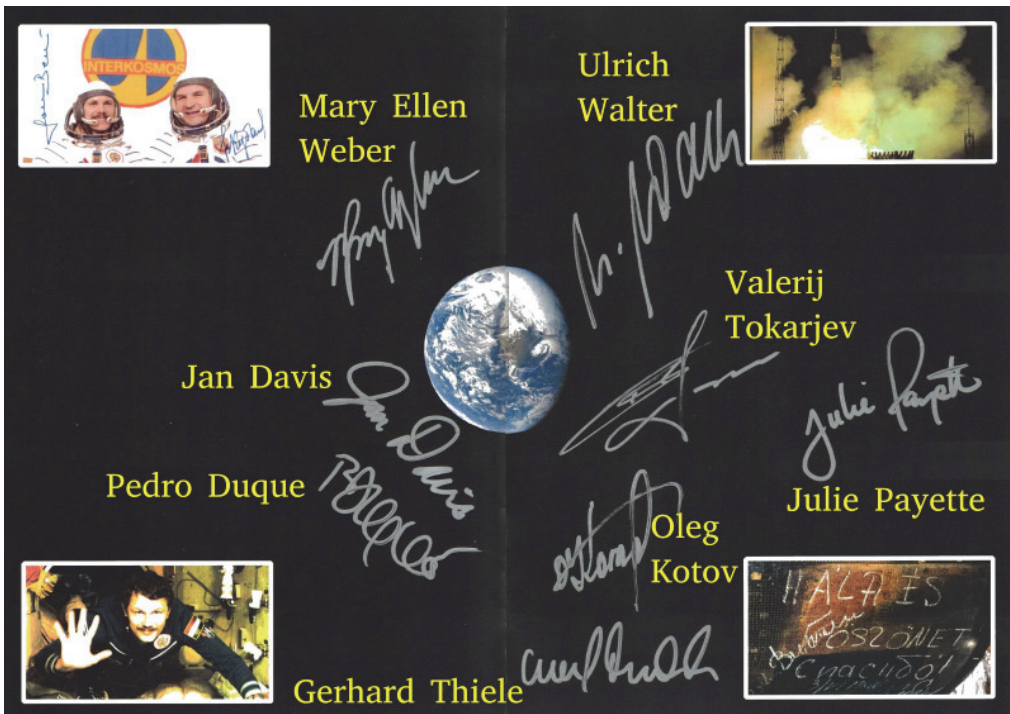
Végül Horvai Ferenc húzott ki a kátyúból, bár 42-ig már nekem is sikerült az azonosítás. Kétségtelen, hogy az ő listáján ott volt a hiányzó név: Reinhold Ewald. Ő viszont nem szerepelt egyetlen „városi” fotón, mint ahogy Alekszandr Ivancsenkov sem.

Végül meg kell említenem a MANT két, A3-as méretű kiadványát. Ebben a munkában Ordasi Andrásé a főszerep, de Vincze Miklós is alaposan kivette ebből a részét. Az elsőben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) járt nyolc úrhajós aláírása látható, míg a másodikban a kongresszus 43 résztvevője szerepel; 36-an a KKM fotóján, a többiek külön, mert a fotó elkészítésekor még nem vagy már nem tartózkodtak Magyarországon. Különböző okokból az eredetileg meghívott úrhajósok közül Stephanie Wilson, Szergej Avgyjejev és Szergej Krikaljov nem jött el.

delkezésemre egy névsor, hogy kik jöttek Magyarországra. Elképesztő titkolózás vette kezdetét, és hiába próbálkoztam, még a legjobb szándékú emberek sem tudtak segíteni. Barátaim, ismerőseim küldtek olyan fotókat, amelyek az adott városban készültek, és a sajtó, a világháló információival kiegészítve azért már el lehetett indulni. Természetesen ez nem volt sétagalopp. A Blikktől is megkerestek egy olyan úrhajós fotójával, aki éppen aláír, de akit még ezek után sem tudtak beazonosítani. A gyűjteményem segítségével ez sikerült is, és felsejlett bennem, hogy talán őmiatta van ez a nagy titkolózás. Muhammed Fariszról van szó, aki a szíriai légierő pilótájaként 2012-ben – Törökországon keresztül – Németországba dezertált. Aztán a Külügyminisztérium (KKM) is közzétett egy fotót, amelyen 36



7. ábra: Az ASE 33. kongresszusának űrhajósai. (Forrás: KKM)



8. ábra: Az első kiadvány belső része, az aláírások azonosításával

A Magyar Asztronautikai Társaság 2021. évi tevékenységéről

TURISTAÚT A KEDVENC ÉGITESTEDRE – DIÁKPÁLYÁZATUNK DÍJÁTADÓJA

A MANT 2020 őszén, az Űrkutatás Napjához és a Nemzetközi Világűrhéhez kapcsolódva meghirdette hagyományos diákpályázatát, amelynek beadási határideje 2021. február 15. volt. A jelentkezők sokféle műfajban alkothattak: lehetett dolgozatot vagy novellát írni, de a szabadon választható feladatok közt szerepel számítógépes grafika, poszter, bemutató, rövid videó készítése, internetes honlap, blog vagy Facebook-oldal létrehozása, kísérlet kitalálása vagy számítógépes program írása. A pályázaton nem csak egyénileg, de 2–4 főből álló csapatokkal is lehetett indulni. A pályázat témája *Turistaút a kedvenc égitestedre* volt.

Idén először a *Rajzold!* kategóriát külön pályázatként kezeltük, kizárólag a 11–14 éves korcsoport részére. Ez jó döntésnek bizonyult, tekintettel az 500-at is megközelítő beérkezett pályamunkákra. De a többi kategóriában sem lehetett panasz az érdeklődésre, a zsűrieknek bőven okozott fejfájást annak eldöntése, mely munkákat ítélik díjazásra érdemesnek.

Március 26-án délután tartottuk a virtuális díjátadókat. Szokás szerint készültünk egy-egy meglepetéssel a diákoknak és tanáraiknak. A rajzpályázatosok díjátadóján *Vincze Miklós* fizikus a pályázat témaköréhez kapcsolódóan beszélt arról, milyen időjárás várna ránk a Naprendszer egyes bolygóin és hogy lehet ezeket modellezni egy vödörben. Előadásának címe *Időjárás a kedvenc égitesteden* volt. A diákpályázatosoknak *Sik András* bolygókutató, a MANT alelnöke is a pályázat témaköréhez és egyben szakterületéhez kapcsolódóan, *Forgalmi dugó a Marson!* címmel beszélt arról, milyen újabb gépekkel bővül a marsi járműpark és mi várna bolygósomszédunkon az odalátogató turistákra. A díjakat – ha csak virtuálisan is – *Both Előd*, a MANT elnöke nyújtotta át a legjobbaknak. Jutalmaikat postán juttattuk el hozzájuk. A nyereménycsomagok összeállításában segítségünkre volt a Galaktika Magazin, az EuroPlanet Society Közép-európai Központ, valamint a Külgazdasági és Külügyminisztérium.

A rajzokat beküldő pályázóink közül a sok nyertes hosszú listáját a MANT honlapján tettük közzé. A diákpályázati nyertesek:

11–14 éves egyéni kategória

- I. díj: Kis Botond (Jovan Jovanović Zmaj Általános Iskola, Magyarkanizsa, Szerbia, felkészítő: Csányi Pál)
- II. díj: Stefán Boldizsár (Galgahévízi II. Rákóczi Ferenc Általános Iskola, Galgahévíz, felkészítő: Varju Krisztina)
- III. díj: Bogár-Szabó Márta (Friedrich Schiller Gimnázium és Kollégium, Pilisvörösvár, felkészítő: Bogár-Szabó Ádám)
- III. díj: Szommer Dániel (Páli Szent Vince Iskolaközpont, Kapuvár, felkészítő: Schiffer Gyula)

11-14 éves csapat kategória

- I. díj: Kő Bence, Árvay Márton, Tóth Gergely András, Varga Bernát (Szent Orsolya Római Katolikus Gimnázium, Sopron)
- II. díj: Valach Lili, Erdődi Noémi
- III. díj: Kazsimérszky Panni, Schmidt Emma, Szirácsik Áron (Rózsavölgyi Márk A. M. I., Balassagyarmat, felkészítő: Dávid Zsuzsanna)
- III. díj: Szabó Máté, Baráth Máté, Demeter Emma, Szegedi Dóra (Berzsenyi Dániel Evangélikus Gimnázium, Sopron, felkészítő: Lang Ágota)

15-18 éves egyéni kategória

- I. díj: Varga Leona (Kölcsey Ferenc Gimnázium, Nyíregyháza, felkészítő: Kerekes Attila)
- II. díj: Pásztor Barnabás (Móricz Zsigmond Gimnázium, Budapest, felkészítő: Benyó Zsuzsanna)
- III. díj: Magyar Gábor (Egri Dobó István Gimnázium, Eger)
- III. díj: Rásó Filip (Kétnyelvű Magángimnázium, Galánta, Szlovákia, felkészítő: Gáspár Mária)

Különdíj: Hugyi Viktória (ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium és Kollégium, Budapest)

15-18 éves csapat kategória

- I. díj: Kunkli Vanda, Pruma Mónika (Kós Károly Művészeti Szakgimnázium és Kollégium, Debrecen, felkészítő: Kovács Kriszta)
- II. díj: Bonhardt Liliána, Jónás Károly, Kiss Anna, Póka Áron (Jedlik Ányos Gimnázium, Budapest, felkészítő: Radnai Tamás)
- III. díj: Szatai Péter, Sípó Mihály Ete, Vinnai Milda (Kós Károly Művészeti Szakgimnázium, Debrecen, felkészítő: Kocsis Zsuzsanna)

IRÁNY AZ ŰR! – ŰRKUTATÁSI CSAPATVERSENYEK KÖZÉPISKOLÁSOKNAK

A KKM felkérésére és támogatásával a MANT elsőként 2020-ban háromfordulós, űrkutatási csapatversenyt hirdetett magyarországi és határon túli magyar középiskolásoknak. A verseny célja volt felkelteni a középiskolás korosztály érdeklődését általában a természet- és műszaki

tudományok, közelebbről elsősorban az űrkutatás, űrtevékenység iránt. A 2020 novemberében kezdődött első fordulóban 91 háromfős csapat küldött be megoldás. A 2021. április 10-i online döntőn már csak a legjobb öt csapat vehetett részt. A győztes végül a Polaris nevű csapat lett, ők nyerték meg a fődíjat, egy négyfős utazást az Európai Űrügynökség (ESA) legnagyobb létesítményébe, az Európai Űrtechnológiai Központba (ESTEC). A második helyezett csapat tagjai két hazai szakmai látogatáson vehettek részt, a harmadik helyezett iskolájukat gazdagították értékes laborfelszerelésekkel.

A nagy sikerre való tekintettel 2021 őszén is meghirdettük az *Irány az űr! 2.0* versenyt. Ezúttal még nagyobb volt az érdeklődés, a tavalyinál másfélszer több, 150 csapat nevezett be. A negyedik, döntő



**IRÁNY
AZ ŰR!**
Kárpát-medencei
Űrkutatási Csapatverseny

forduló már 2022 márciusára esett. Ott ismét öt csapat mérte össze tudását, hogy elnyerjék a KKM által felajánlott jutalmak egyikét, illetve a Kárpát-medencei Tehetségkutató Alapítvány különdíjait. A szoros versenyből a Kempelen Polaris csapat került ki győztesen.

TISZTÚJÍTÓ KÖZGYŰLÉS

2021. május 13-án tartotta egyesületünk idei beszámoló közgyűlését, amelyen egyúttal a tisztújítás is aktuális volt, hiszen lejárt választott tisztségviselőink három évre szóló megbízatása. A koronavírus-járvány miatt sajnos továbbra sem tudtunk személyes jelenléttel közgyűlést tartani, így a Zoom internetes platformra kényszerültünk. Szavazati jogú tagjaink és tiszteleti tagjaink szerencsére nagy számban jelentek meg a virtuális eseményen, több mint ötvenen voltunk jelen. A napirend a 2020. évi beszámoló (elnöki-főtitkári beszámoló, gazdasági beszámoló, közhasznúsági jelentés, az Ellenőrző Bizottság jelentése) meghallgatásával, megvitatásával, majd elfogadásával.

Ezután következett a tisztújítás, amelynek eredményeképp a MANT megválasztott tisztségviselői a 2021-2023 közötti időszakra: *Kovács Kálmán* elnök; *Arnócz István* főtitkár; *Bacsárdi László*, *Frey Sándor* és *Sik András* alelnökök; *Hirn Attila*, *Medvegy Anna* és *Székely Anna Krisztina* főtitkárhelyettesek; *Bérczi Szaniszló*, *Both Előd*, *Horvai Ferenc*, *Magyari Gábor*, *Maradi István*, *Milánkovich Dorottya*, *Pál Bernadett*, *Remes Péter*, *Schuminszky Nándor* és *Vizi Pál Gábor* az Elnökség tagjai; *Mihálka György* (elnök), *Kálmán Béla* és *Tátrallyai Mária Gabriella* az Ellenőrző Bizottság tagjai.

VIRTUÁLIS ÚRTÁBOR 2021

A MANT 1994 óta rendezi meg az Űrtábort az űrkutatás iránt érdeklődő fiataloknak. Az egy hetes tábor során a résztvevők találkozhatnak magyar űrkutatókkal, bővíthetik az űrtevékenységgel kapcsolatos ismereteiket, és különleges programokon vehetnek részt. A COVID-19 járványra való tekintettel úgy döntöttünk, hogy a tavalyi alkalom után 2021-ben ismét virtuálisan tartjuk meg a tábort, július 6-8. között. A Virtuális Űrtábor során előadások, kerekasztal-beszélgetések és érdekes feladatok vártak minden 13-18 év közötti résztvevőre. A programon való részvétel ingyenes, de regisztrációhoz kötött volt. Közel húszan jelentkeztek résztvevőnek. A

PÁLYÁZTUNK A NEMZETKÖZI ASZTRONAUTIKAI KONGRESSZUS 2024-ES MEGRENDEZÉSÉRE

2024. szeptember 30. és október 4. között Budapesten gyűlhetnek volna össze a világ űrügynökségeinek és legnagyobb űripari vállalkozásainak vezetői, ha Magyarország nyeri el a 75. Nemzetközi



75th International Astronautical Congress
30 September - 4 October 2024, Budapest, Hungary
Candidate City
Proposed by the Hungarian Astronautical Society

Asztronautikai Kongresszus (IAC) rendezésének jogát. A MANT, a CongressLine Kft. és a HUNGEXPO konzorciuma által beadott, a Külgazdasági és Külügyminisztérium és Budapest Főváros támogatását is bíró pályázat sikeresen túljutott a legtöb megmérettetésen. Augusztusban a kongresszust szervező Nemzet-

közi Asztronautikai Szövetség (IAF) Budapestre látogató delegációja személyesen mérte fel a rendezési pályázat hátterét, a javasolt helyszíneket, és közelebbről megismerkedett a magyar űrszektorral. Úgy találták, hogy a javasolt budapesti helyszínek megfelelnek azoknak a rendkívül komplex követelményeknek, amelyeket az IAC támaszt, és a MANT vezetésével pályázó konzorcium sikeresen meg tudná rendezni a világ legnagyobb asztronautikai kongresszusát.

A 2024-es IAC rendezéséről a végső döntést az IAF Közgyűlése hozta meg október 29-én, a Dubajban rendezett 2021. évi kongresszus ideje alatt. Ott a MANT egy standdal is képviselte hazánkat, segítve a magyar űrszektor szereplőinek nemzetközi bemutatkozását. A rendezés jogáért folyó kiélezett versenyben – első alkalommal pályázóként – most alulmaradtunk ugyan, de az elkövetkező évek valamelyikében esély nyílhat a budapesti rendezésre. Az előkészítés során szerzett értékes tapasztalatokat a következő évek pályázataiban során kamatoztatni tudjuk majd. Az IAC helyszíne 2024-ben Milánó lesz.

AZ „ŰRKORSZAK” KEZDETE

Szeptember 22-én délután *Kovács Kálmán*, a MANT elnöke nyitotta meg a tervek szerint havonta jelentkező *Űrkorszak* szemináriumsorozat első alkalmát. A helyszín a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Q épülete volt. A koronavírus-járvány kezdete óta számos interneten közvetített programot, előadást szervezett a MANT az űrkutatás iránt érdeklődők számára, de több mint egy év óta ez volt az első alkalom, amikor személyes részvétellel zajlott egy ilyen esemény. Ugyanakkor azok sem maradtak ki belőle, akik nem tudtak megjelenni az előadóteremben. Számukra élő közvetítést nyújtott a Galileo Webcast. Az első alkalommal tartott kerekasztal-beszélgetés címe *A világűr határa (Kármán-vonal?) és az űrturizmus kihívásai* volt. Előtte olyan, a magyar űrtevékenységben – egészen az űrkorszak kezdetétől – meghatározó szerepet játszó szakembereket köszöntöttünk, akik ebben az évben töltötték vagy töltik be 80. életévüket. Nevük abécérendben *Bárczy Pál, Ferencz Csaba, Gschwindt András, Horváth András és Remes Péter*.

MAGYAR ŰRKUTATÁSI FÓRUM 2021

A MANT, az ELKH Energiatudományi Kutatóközpont (EK) és a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet közös kezdeményezésére 2021. szeptember 29. – október 1. között hibrid formában, online és Budapesten rendeztük meg a *Magyar Űrkutatási Fórum 2021* konferenciát. A rendezvény házigazdája az EK volt. Ezzel folytatódott a legrégebb hagyományokkal rendelkező hazai űrkutatási szakmai-tudományos rendezvények sorozata, amelynek története egészen 1972-ig nyúlik vissza.

A három napig tartó konferencia programja közel 40 szakmai előadást, két kerekasztal-beszélgetést és poszterbemutatókat tartalmazott. Idén különös jelentőséget adott a találkozóknak, hogy a járványhelyzet enyhülésével hosszú idő után először lehetett személyes részvétellel konferenciát rendezni. A szervezők ugyanakkor gondoltak azokra is, akik nem tudtak megjelenni, de szívesen bekapcsolódtak az internetes közvetítés segítségével. A hibrid esemény résztvevőinek közel fele így csatlakozott, sőt a programban voltak online előadások, és a kerekasztal-beszélgetések egyes résztvevői is ilyen módon jelentkeztek be. A konferencia előadásainak és poszterbemutatóinak kivonatai egy kötet formájában, a



MANT kiadásában meg is jelentek. A rendezvényt a Külgazdasági és Külügyminisztérium, valamint a REMRED Kft. támogatta.

ŰRKUTATÁS NAPJA 2021

Az Űrkutatás Napját a MANT idén is a Nemzetközi Világűrűrhéthez kapcsolódóan szervezte meg, 2021. október 11-én. Ezúttal a fő téma is kapcsolódott a Nemzetközi Világűrűrhét idei jelmondatához, amely a nőknek az űrtevékenységben betöltött szerepére utalt. Az előadók közt így ebben az évben többségben voltak a hölgyek. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME), az Egyesített Innovációs és Tudásközpont (EIT) Neumann-tárgyalójában tartott rendezvényt élő internetes közvetítésben is követni lehetett, a felvétel utólag is megtekinthető – hasonlóan a MANT legtöbb más rendezvényéhez.

A több mint három órán át tartó gazdag programban helyet kapott *Ferencz Orsolyának*, a KKM űrkutatásért felelős miniszteri biztosának előadása az elmúlt év eredményeiről és a kormány által nemrég elfogadott fontos dokumentumról, amelyben – hazánkban most először – lefektették az ország űrstratégiáját. Ez alapul szolgálhat ahhoz, hogy az űrkutatás és űrtevékenység, valamint az ezekre alapuló szolgáltatások – a sok évtizedes hagyományokra építve – lendületes fejlődésnek induljanak. Beszámolt arról, hogy az űrtevékenységre szánt éves költségvetési források jelentősen megnövekedtek, mostanra megközelítik a 10 milliárd forintot. Ennek részeként a 2018-as értékhez képest megnégyszereződtek az Európai Űrügynökség (ESA) programjaiba befizetett hozzájárulásaink. Ezt a pénzt az ESA-ban követett földrajzi visszatérítés elve alapján a magyar ipari szereplők és kutatóhelyek pályázati alapon fel tudják használni arra, hogy még jobban be tudjanak kapcsolódni a nemzetközi űrprogramokba.

Volt még kerekasztal-beszélgetés a MANT szerepéről, majd hat, más-más korosztályt és szakterületet képviselő előadó beszélt munkájáról. *Illés Erzsébet* a hazai űrkutatás kezdeteire tekintett vissza. *Strádi Andrea* beszélt a kozmikus sugárzás hatásairól az emberi szervezetre. Az anyagtudományi ipari kutatások területéről *Tamási Kingát*, az Admatis Kft. laboratórium- és tesztvezetőjét, a Miskolci Egyetem doktorjelölt hallgatóját hívták meg a szervezők. *Szell Alexandra*, a C3S Kft. üzletfejlesztési vezetője az űriparról általában és cégük tevékenységéről is beszélt. *Daczi Diána* a Nemzeti Média- és Hírközlési

Hatóságnál dolgozik, szakterülete az űrtávközlés, ő az űreszközökre vonatkozó jogi környezetről tartott előadást. Végül *Komáromi Annamária* fizikatanár a SpaceBuzz programról, egy Hollandiából indult kezdeményezésről mesélt, amelynek révén Magyarországon is közelebb lehet majd hozni a világűrt a 10–12 éves korosztályához. A záró programblokkban aktuális hazai eredményekről esett szó.

HAZAI ŰRKÖRKÉP 2021/2022

A MANT gondozásában, a KKM Űrkutatóért és Űrtevékenységért Felelős Főosztályának támogatásával az év vége előtt megjelent az immár hagyományosnak nevezhető *Hazai űrkörkép 2021/2022* kiadvány, valamint angol nyelvű változata, a *Hungarian Space Kaleidoscope 2021/2022*. A kötet célja, hogy betekintést nyújtson a hazai űrszektor sokszínű tevékenységébe, bemutatva azokat a kis- és közép vállalkozásokat, kutatóhelyeket és egyetemi műhelyeket, amelyek űrkutatóval és űrtevékenységgel foglalkoznak Magyarországon. A kiadvány – a korábbi évek gyakorlatának megfelelően – nem csak nyomtatott formában készült el, hanem honlapunkon elérhető elektronikus (pdf) formátumban is (mind magyar, mind angol nyelvű változatban).

A *Hazai űrkörkép* először 2019-ben, majd 2020-ban látott napvilágot. A kiadvány kedvező fogadtatásra talált mind Magyarországon, mind világszerte azok körében, akik érdeklődnek a magyar űrtevékenység iránt, netán üzleti partnert keresnek. Az idei kiadás címében a 2021/2022 arra utal, hogy a könyv szerkesztése ugyan 2021-ben zárult, de a benne levő adatok még 2022-ben is frissnek számítanak.

MAGYARORSZÁG ÉS A VILÁGŰR

Megjelent a *Magyarország és a világűr* című, a magyar űrkutató és űrtevékenység hagyományait és jelenét átfogóan, mégis látványosan és élvezetesen bemutató exkluzív kiadvány. A könyv színes, gazdagon illusztrált oldalpárokon mutatja be az űrtevékenység sokféleségét. Témái között az emberes űrrepüléstől kezdve a Naprendszer kutatásán és a magyar űripar csúcsteljesítményein keresztül az űralkalmazások széles köréig minden megtalálható, ami az űr kedvelőinek érdeklődésére számot tarthat. Még olyanok is, akik tájékozottnak gondolják magukat ezen a területen, bizonyosan rácsodálkoznak majd egy-egy érdekességre. A könyv különlegessége, hogy az egyes oldalpárokhoz részletesebb szakmai háttér-információt tartalmazó weboldalak kapcsolódnak, amelyeknek a tartalmát a jövőben naprakészen igyekszünk majd tartani, hiszen az űrtevékenységre a gyors, folyamatos változás a jellemző. A háttéranyag a konyv.mant.hu linken érhető el.

A *Magyarország és a világűr* című kötet főszerkesztője *Simon Tamás*, elkészítését a MANT koordinálta, a KKM hathatós támogatásával. A könyv az MCC Press kiadó gondozásában látott napvilágot, kapható a könyvesboltokban és a webáruházakban.



Tartalom

Előszó	3
Strádi Andrea, Szabó Julianna, Hirn Attila Fantomokkal a Hold körül – magyar részvétel az Artemis küldetés első tesztrepülésében . . .	5
Bebesi Zsófia, Juhász Antal, Timár Anikó, Dósa Melinda Utazás a Merkúrhoz – a BepiColombo küldetés	11
Kereszturi Ákos, Gross Péter, Gutay Gergely, Halász Nóra, Magari Zoltán, Makkai Hunor, Sódor Bálint, Tóth Imre, Tróznai Gábor Az ESA Comet Interceptor üstökösküldetése.	22
Tomka Richárd Holdi sarkvidéki űrszondaleszállóhelyjelöltek GIS alapú elemzése	40
Gergácza Mira Anna Évszakos jégsapka peremének vizsgálata a Mars déli féltékéjén	47
Kisvárdai Imre Az ESA a jeges holdak nyomába ered: Voyage 2050.	54
Nagy Zsófia, Ábrahám Péter, Kóspál Ágnes, Szabados László, Fernando Cruz-Sáenz de Miera, Eleonora Fiorellino, Kiss Csaba, Kun Mária, Marton Gábor, Sunkyung Park, Michał Siwak, Szabó Zsófia, Szegedi-Elek Elza Fiatal csillagok vizsgálata a Gaia űrtávcső adatai alapján	63
Futó Péter A csillagászati spektroszkópia alkalmazásáról az exoplanetáris kémiában	69
Mészáros András Bemutatkozik a Bajai TIE Rakétamodellező Szakosztálya	78
Schuminszky Nándor Két hazai űrkongresszus – a gyűjtő szemével	81
A Magyar Asztronautikai Társaság 2021. évi tevékenységéről	88