

Műszertechnikai fejezetek a mérnöki bolygótudományból

Kereszturi Ákos

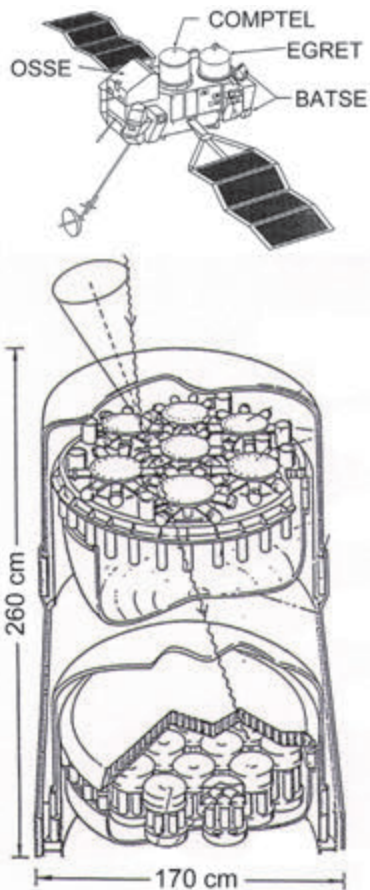
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) űrtudomány iránt érdeklődő hallgatói 2023-ban a bolygó kutatás műszaki vonatkozásairól is hallhattak az egyetemi oktatásban, ahol planetológiai és csillagászati ismereteket nyújtó műszereket és űreszközöket mutatott be Kereszturi Ákos Bacsárdi László az Űrkutatás és űrtechnológia című kurzusa keretében [1]. Olyan mérnöki problémákkal és feladatokkal ismerkedtek a diákok, amelyek technológiai szempontból „csúcsteljesítményt” képviselnek, és még nem kerültek át hétköznapi alkalmazásokba, hanem egyedí megoldások egy-egy űrszondára fejlesztve. Az alábbiakban a bemutatott témakörökből szemezgetünk, a teljesség igénye nélkül, a spektrum széles palettájáról válogatva, lefedve a Földön kívüli élet lehetőségének és a bolygótesetek jellemzőinek a kutatását.

HUN-REN
Csillagászati és
Földtudományi
Kutatóközpont,
Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Intézet,
Budapest

A csillagközi anyag és a születő bolygórendszerek kémiai fejlődése szempontjából fontos az alumínium 26-os tömegszámú izotópjának gyakorisága. Csillagközi előfordulásának feltérképezése gamma-sugárzás alapú mérésekkel történik. Az **²⁶Al izotóp eloszlása** aktív környezetre utal, a kérdéses térségben születő bolygócsíráknál korai hőforrásként jeget olvaszthatott, és közreműködött a vizes kémiai átalakulásokban, valamint az ún. szeprentinizáció keretében exoterm kémiai reakciók fellépésében, tovább melegítve a kérdéses égitestek belsejét [2]. Mindez az égitestek kémiai fejlődését befolyásolja, valamint a bolygócsírák széttörése és meteoritként történő lehullása nyomán a többi égitest felszíni kémiai viszonyaira is hatással lehet.

A Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) műholdon elhelyezett COMPTEL teleszkóp (1. ábra) végzett ilyen gamma-méréseket, ahol a két detektor közül a „feljebb lévőben” Compton-szórás (nagyenergiájú foton rugalmatlan szóródása, ami elektront is kelt) történik. Itt egy NE 213A jelű folyadék szcintillátorban a beérkező gamma-sugárzás az eredeti érkezési irányát csak részben megtartva szóródik, majd a második detektort elérve, annak nátrium-jodid kristályaiban kisebb energiájú fotonokat és elektronokat kelt – utóbbiak már egyszerűbben mérhetők. Az eljárás a beérkezett gamma-sugár energia- és iránybecslését teszi lehetővé, amiből további számításokkal az ²⁶Al izotóp csillagközi eloszlása is térképezhető.

A megszületett bolygók észlelése nem könnyű, mivel többnyire sűrű csillagközi felhőkben jönnek létre. Megpillantásukra az infravörös tartományban nyílik lehetőség, az ebbe a hullámsávba eső sugárzás ugyanis áthatol a kérdéses csillagközi felhőkön. Ugyanakkor sajnos ezek a hullámhosszak szinte alig tanulmányozhatók a földfelszínről a légkör (elsősorban a vízgőz) elnyelő hatása miatt, ezért az űrbe kell infravörös távcsöveket felbocsátani.

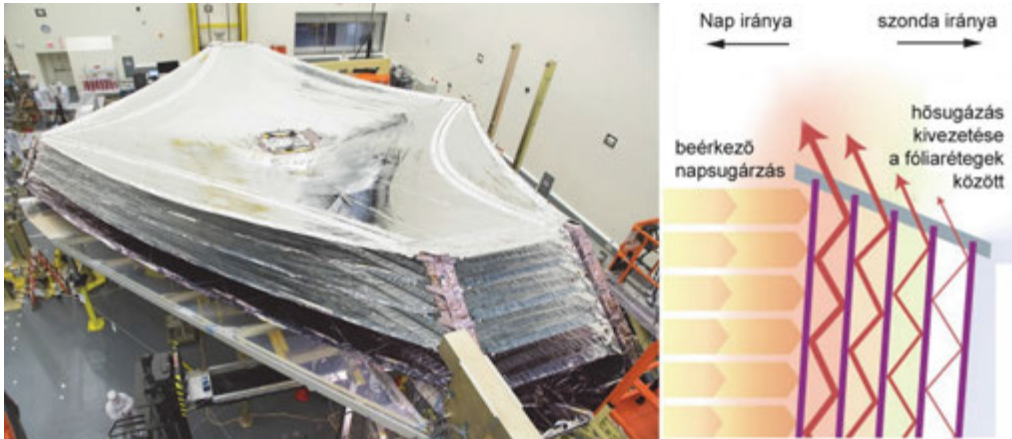


1. ábra: A CGRO műhold fő műszerei (fent) és a COMPTEL gamma-távcső szerkezete (lent). (Forrás: NASA)

Napjaink egyik ilyen csúcsműszere a **James Webb-űrtávcső**, amelynek detektorát erősen hűteni is kell a pontos, zajmentes mérésekhez. Az űreszközben az infravörös jelek érzékelésére egy HgCdTe detektor szolgál, amelynek ideális üzemi hőmérséklete mindössze 37 K, továbbá a kapcsolódó áramkört is hűteni kell az adatrögzítésig. Ahhoz, hogy minél könnyebb legyen ezen berendezések aktív hűtése, magát az egész műszeregységet is minél jobban árnyékolni kell a napsugárzástól. Erre 0,2–0,5 mm közötti vastagságú napárnyékoló, Al-Si borítású, ún. kapton anyagú poliimid hőszigetelő fólia öt egymás mögötti rétegével kerül sor (2. ábra). A fóliarendszer a Nap által megvilágított külső rétegének 283 K hőmérsékletéről befelé az ötödik rétegnél 39 K-re csökkenti a hőmérsékletet. Komoly technikai kihívás volt, hogy a teniszpálya méretű, ötrétegű fóliát összehajtogatott állapotban kellett tárolni, majd a szonda üzemelési helyére érkezve kinyitni. Ezen a passzív hűtésen túl ún. aktív hűtés is kell a detektor és elektronikája közvetlen közelében. Az itt alkalmazott kriogén technológia folyékony He segítségével akár 6 K-ig is le tudja hűteni a rendszert. További technikai nehézséget jelent, hogy „vibrációmentes” pumpákat kellett beépíteni, a rezgés ugyanis

szintén zajt és technikai nehézséget okoz a mérések során.

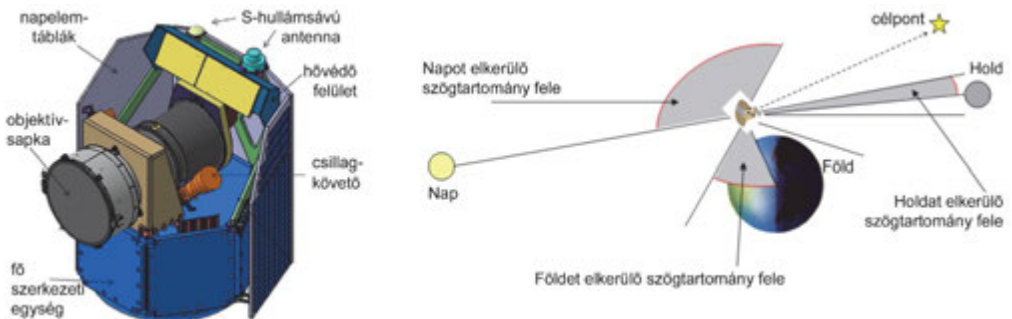
Egyre több exobolygó ismert, fontos lépés a már felfedezett égitestek minél pontosabb megismerése és jellemzése – ami speciális módszert és többnyire űrtávcsövet igényel. A magyar közreműködéssel készült és 2019-ben felbocsátott **CHEOPS űrtávcső** (*CHAracterising ExOPlanet Satellite*) 30 cm-es teleszkópja 700 km magas pályán keringő műholdról elemez egy-egy exobolygóval bíró csillagot, alkalmanként maximum 48 órán keresztül. Már ismert célpontokat vizsgál, amikor azok bolygója vagy bolygói a Földről nézve elhaladnak a csillag korongja előtt és annak kis részét elfedik. Az ekkor fellépett ún. tranzit esemény során a csillag fényessége enyhén csökken, amiből a többi paraméterrel együtt az exobolygó tömege és átmérője alapján a sűrűségét lehet megállapítani. A fedések követéséhez az űrtávcső rendszeresen áll át egy-egy új célpontra 8 ívmásodperc pontossággal, amit 2 csillagkövető és 6 napszenzor, valamint 4 elforgatható reakciókerék biztosít. A célpontra álláshoz a három tengely mentén stabilizált CHEOPS térbeli helyzete fontos, ahol az X tengely mutat a csillag felé – de a többi két irány szerint sokféle térbeli orientációval is beállhat a műhold, amihez a hőstabilitás miatt ideális



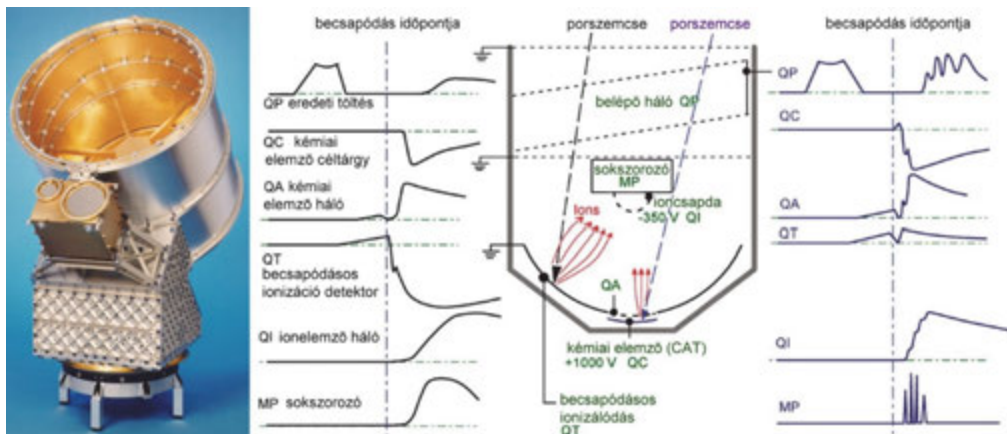
2. ábra: A James Webb-űrtávcső napfényvédő fóliája kinyitott állapotban a Földön (balra), és elvi metszete (jobbra). (Forrás: NASA)

esetet választja ki, elkerülve még a túlmelegedést a napfénytől, valamint a zavaró Földet, Holdat és Napot (3. ábra).

Az összeállt égitesteket közelről a Naprendszerben tudjuk vizsgálni. Az elmúlt évek kutatásai során kiderült, nem csak a Naphoz közelebb keringő Föld-típusú bolygók, de a jégholdak is érdekesek az élet lehetősége szempontjából. Ezek jégpáncélja alatt ugyanis kiterjedt víztömegek helyezkednek el, azonban utóbbiak közvetlen tanulmányozása igen nehéz. Az **Enceladus esetében a mélységi vízből** a jégpáncél repedésein kilövellt anyag szemcséinek elemzésére nyílt lehetőség a Cassini-űrszonda *Cosmic Dust Analyzer* (CDA) műszerével (4. ábra). Ez a berendezés a becsapódó szilárd szemcsék méretét, töltését és sebességét érzékeli. A mindig nagy sebességgel érkező apró szemcsék a hátsó falon szétporladnak, „elizzanak”. Az így keletkező atomok, ionok és elektronok elektromos mezővel szétválaszthatók, és összetételük, valamint egyéb jellemzőik megbecsülhetők. Az Enceladus anyagsugarain át-



3. ábra: A CHEOPS űrtávcső szerkezete (balra) és a célpont megfigyelésével kapcsolatos néhány térbeli megkötés a Nap, a Föld és a Hold környékének elkerülése céljából. (Forrás: ESA)

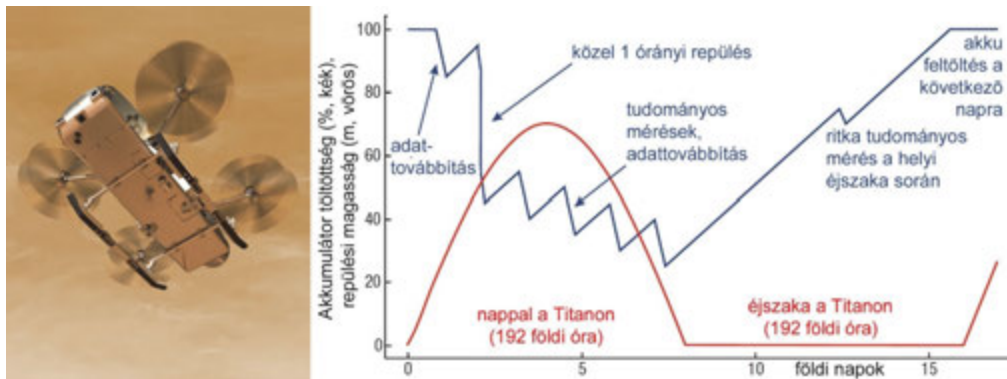


4. ábra: A CDA detektor működési sémája. Balra az Impact Ionisation Target (IIT), jobbra a Chemical Analyzer Target (CAT) detektorba történő becsapódáskor észlelt jelek általános jellemzőit mutató görbék láthatóak [3,4]

haladva a kilőveit nm-es szilikátszemcsék vizsgálatuk alapján 90 Celsius-fok feletti közet-víz reakció során keletkezhetnek. Mindez forró, esetleges vulkáni fűtésű környezetre utal a mélységi „óceánban”.

A Titan Szaturnusz-hold vízfélfelszíne is érdekes célpont, részben az ott lévő metántavak, egykori kiszáradt folyóvölgyek és az égből hulló, a Nap ultraibolya sugárzásának hatására polimerizálódó szerves molekulák miatt. Ezt a távoli, fagyos égitestet fogja elemezni a **Dragonfly nevű, mini helikopterre** emlékeztető drón, amely a tervek szerint 2028-ban startol (5. ábra).

A földinél sűrűbb légkör és gyengébb gravitációs tér miatt a Titanon kb. 40-szer „könnyebb” a repülés. Az űreszköz több helyszínt is meg fog látogatni: nappal repül és leszállva vizsgálódik, éjszaka pedig várakozik. A mindezekhez szükséges energiát és hőt (a Hold felszínén 180 K körüli hideg van)



5. ábra: A Dragonfly űrszonda fantáziaképe repülés közben (balra), valamint a tervezett repülési ütemezés (vörös) és akkumulátor energiaháztartása (kék, jobbra) [5]

radióizotópos termoelektromos generátor szolgáltatja, amely a szonda műszeres „meleg dobozában” helyezkedik el. Összesen 2 kW-ot állít elő, ebből 70 W elektromos teljesítmény, amelyet egy ~100 Wh/kg kapacitású akkumulátorban tárolhat az energiaigényes repülések idejére.

A Mars mind a Föld-típusú égitestek geológiai fejlődése, mind az élet lehetősége szempontjából érdekes. A bolygón lévő kőzetek vizsgálatában a céltárgyhoz érintett ún. kontakt műszereknek üde, mállatlan felszín szükséges. A kőzeteket borító málladéktakarót ezért el kell távolítani – erre szolgál a geológuskalapács a földi terepi munka során. A Marsra ugyanezen feladat ellátására fejlesztették ki a kőzettisztító berendezés (*Rock Abrasion Tool*, RAT) nevű eszközt (6. ábra) – eredetileg a Sprit és Opportunity roverekre, majd tökéletesítették a Curiosity roverre. A RAT egy forgó „kaporó berendezés” a málladék eltávolítására. Alkalmazásának nehézsége egyrészt, hogy nem ismert, milyen a különböző kőzetek málladéktakaróinak keménysége, valamint az eszközt a célpont jellemzőitől függően változó erővel kell a szilárd felülethez nyomni.

A 0,7 kg tömegű, 7 cm x 10 cm méretű és maximálisan 30 W fogyasztású berendezés két ív alakú támasztó felülettel érintkezik a kőzettel, ezeken belül egy tárcsa forog 0–1 fordulat/perc sebességgel. Rajta 23 mm x 6 mm-es, műgyantába ágyazott szintetikus gyémántból álló „fogakat” tartalmazó tárcsa van, amely 3000 fordulat/perc sebességgel is tud pörögni. A RAT maximálisan 45 mm x 5 mm-es hengeres mélyedést vág a célkőzetbe, miközben 10–100 mN közötti „köszörülési erőt” képes kifejteni. Ekkora erővel kell „ellentartani” a rendszert, amelynek pontos értékét maga határozza meg a RAT, alkalmazkodva a célkőzet keménységéhez. Az 1–2 órás üzemelés végén 2 acélkefe söpri le az esetleg ott maradt törmelék szemcséket a megtisztított kőzetről.



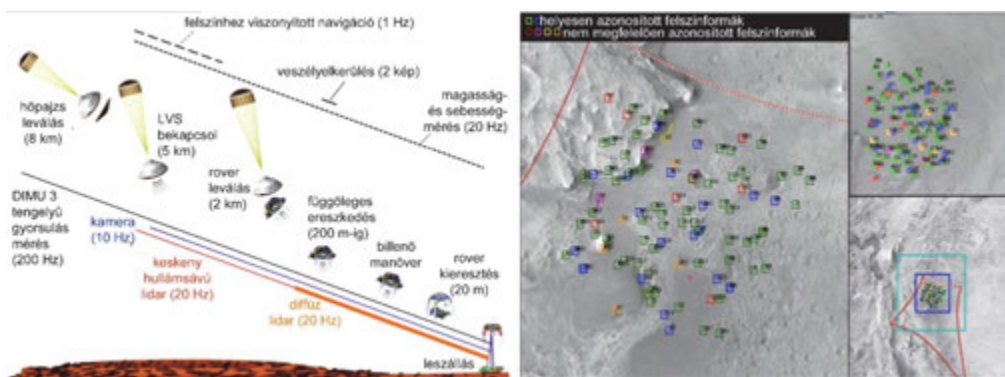
6. ábra: A RAT képe egy földi tesztrover robotkarjának végén (balra) és szerkezeti egységei szemből nézve (jobbra) [6]

A **pontos leszállás a Marson** elengedhetetlen, ha egy konkrét célpontot tervezünk megvizsgálni, avagy az emberes expedícióhoz berendezéseket a felszíni lakóegységhez odajuttatni. Az elmúlt évek két nagyobb marsfelszíni rovere mind az úgynevezett légidaru-technikával landolt a vörös bolygón. Ennek keretében a fékezés első, nehéz fázisát a hővédő pajzs végzi el (amely 1200 °C-ig is felforrósodik). Ezt követően a nagyságrendileg km/s-os ereszkedési sebességet egyetlen ejtőernyő

lassítja kb. 100 m/s-ig. Utóbbit közel 11 km magasságban éri el a szonda, de ez erősen függ a meteorológiai viszonyoktól.

A végső kis sebesség elérését rakétás fékezés biztosítja a légi daru segítségével, melynek végén a kábelben lógó rover függőlegesen kb. 0,75 m/s, vízszintesen pedig max. 0,5 m/s sebességgel éri el a felszínt. A Perseverance rovernél a leszállás pontosítását a fenti műveletek megfelelő autonóm időzítésével növelték. Itt az ernyő nyitásának időzítése a leginkább kritikus, amelyet korábban csak a légköri haladási sebességhez igazítottak, most viszont az ún. felszínhez viszonyított navigáció (*terrain relative navigation*) módszerrel a marsi felszínhez viszonyítva végezték el. A szonda a felszínihez viszonyítja a helyzetét és ez alapján ítéli meg, mikor ideális az ernyő nyitása (*range trigger*) – azt követően ugyanis jelentősen lassul a mozgása és nehezebb a célpont elérése.

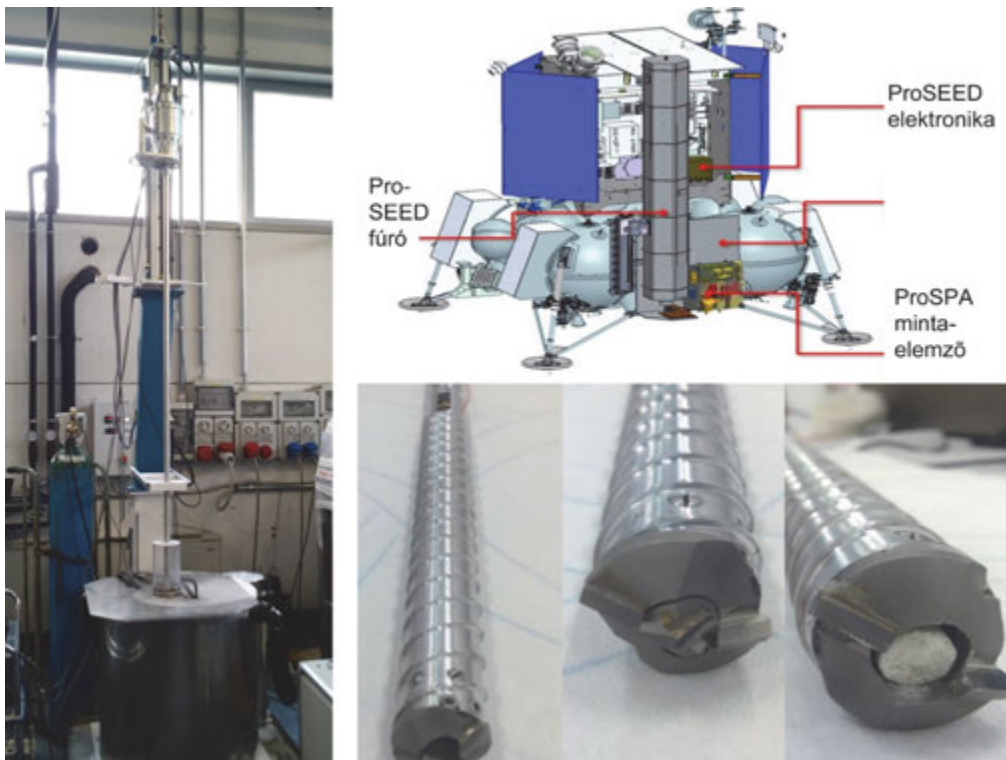
A leszállást segítő MARDI (*Mars Descent Imager*) kamera 1600 x 1200 pixel felbontóképességű detektora 66° látómezejével a felszínt figyeli, így 2 km magasról 1,5 m felbontást ér el. Másodpercenként 5 képet készít, amelyeket egymáshoz hasonlít az oldalirányú sodródás (szélhatás) kiszámításához. A veszélyek elkerülése (*hazard avoidance*) keretében a sziklák és felszíni egyenetlenségek felismerése történik. Továbbá a *Lander Vision System* (LVS) rendszer révén a fotókat egy korábban elmentett HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*, a bolygó körül keringő Mars Reconnaissance Orbiter űrszonda nagy felbontású kamerája) felvételhez hasonlítja, így azonosítja a tervezett leszállóhelyet a látómezőben (7. ábra). A hőpajzs leválásától közel 2 perc van az ejtőernyős és a rakétás fékezés fázisára, ennek során kell a lehető legjobban megközelíteni a tervezett célpontot. Az ejtőernyő megfelelő időben történő nyitásával jelentős későbbi oldalirányú mozgást „takarít meg” a rendszer. Az eredmény a tervezetthez képest mindössze közel 5 méter eltérés volt a Perseverance esetében.



7. ábra: A Perseverance leszállásának autonóm irányítás szempontjából fontos fázisai (balra, fent a ferde sávok a mérési típusokat, lent a ferde sávok a műszerek üzemelésének jellemzőit mutatják, a Hz értékek a mérések frekvenciáját jelzik), és a leszállóhely HiRISE képén valamint a MARDI kamerán egyaránt azonosított, pozíciómérésre használt felszínformákkal (négyzetek). A DIMU a leszállógység belső inerciális mérési rendszerét (Descent Stage Inertial Measurement Unit) jelenti [7]

Az elmúlt években több egymástól független mérés nyomán is kiderült, hogy a **Hold két sarkvidékének** mélyebb és állandóan sötét krátereiben vízjég, illetve egyéb formájú H_2O van jelen. Ennek elemzése eddig csak távérzékeléses módszerekkel történt, most az Európai Űrügynökség (ESA) helyszíni fúrást tervez. Ehhez ún. kriogén mintavétel szükséges, erre fejlesztették az ESA PROSPECT (*Package for Resource Observation and in-Situ Prospecting for Exploration, Commercial exploitation and Transportation*) fúró, mintavevő és elemző műszer-csomagját. Ez eredetileg az orosz Luna-27 leszállóegységen utazott volna, de az orosz-ukrán háború miatt életbe lépett ipari embargó nyomán az orosz partner kiesett. A projekt vezetői azonban sikeresen tárgyaltak a NASA-val, és az Artemis- program keretében, a CP-22 ember nélküli leszállóegységen a tervek szerint mégis a Hold felszínére jut a PROSPECT (8. ábra).

A tervezett mintavétel egyik fő nehézsége, hogy a fúrófej forgásakor, illetve utána annak kihúzásakor a súrlódástól keletkező hő miatt könnyen elszublimálhat a minta jégtartalma. Emellett a kiemelés közben sem süthet rá a Nap, amire az egyébként napelemekkel üzemelő szondánál külön figyelni kell. Ennek megfelelően igen lassan, és a célpont ellenállására (keménységére) figyelve végzi a fúrást a berendezés, hogy minél kevésbé melegedjen az ismeretlen keménységű holdi sarki regolit anyaga.



8. ábra: A holdi sarkvidéki regolitot mintavételező PROSPECT műszer-csomag részei és földi próbája. A fúró-szár tesztelése (balra), a szonda korábban tervezett szerkezete (jobbra fent, amely még az orosz Luna-27 leszállóegységen van ábrázolva), és egy tesztfúrás eredménye (jobbra lent). (Forrás: ESA / Finmeccanica)

Irodalomjegyzék:

- [1] Bacsárdi L. (2021): Űrmérnökképzés testközelből. GIS Open Konferencia, Székesfehérvár, <http://w20.gisopen.hu/eloadasok/2021/I6.pdf>
- [2] Takácsné Farkas A., Kiss Cs. (2023): *The impact of serpentinization on the initial conditions of satellite forming collisions of large Kuiper belt objects. Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 135, 124402
- [3] Kempf S. et al. (2012): *The Cosmic Dust Analyser Data Handbook, Version 0.1. Planetary Data System*, <https://sbn.psi.edu/pds/resource/cdaDataHB-5-4-17.pdf>
- [4] Srama R. et al. (2004): *The Cassini Cosmic Dust Analyzer. Space Science Reviews*, 114, 465
- [5] Glaze L.S., Webb C. (2023): *Explore Science. NASA Planetary Science Advisory Committee presentation*, <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/11/day1-pac-glaze-final.pdf>
- [6] Myrick T.M. et al. (2004): *Rock Abrasion Tool. 37th Aerospace Mechanisms Symposium, Houston, TX, USA*, <https://esmat.eu/amspapers/pastpapers/pdfs/2004/myrick.pdf>
- [7] Johnson A.E., Golombek M.P. (2012): *Lander Vision System for Safe and Precise Entry Descent and Landing. Concepts and Approaches for Mars Exploration, Houston, TX, USA*, 4341