

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LIX. évfolyam

6. szám

2009. június

MEGSZONDÁZZUK A NAPRENDSZERT

Kereszturi Ákos
Collegium Budapest,
Mars Asztrobiológia Kutatócsoport

A Naprendszer űrszondás kutatása reneszánszát éli napjainkban (lásd *1. táblázat*). Az elmúlt években előtérbe került az apró égitestek vizsgálata, de a Holdhoz is több szonda indult. A Mars vizsgálata – az élet lehetősége miatt – továbbra is kiemelt témakör, és a Szaturnusz holdrendszerének elemzése is reflektorfénybe került. Az alábbiakban e témakörökből emelünk ki néhányat, különösen az elmúlt években született újdonságokra fókuszálva a *Csillagászat Nemzetközi Éve* kapcsán. A cikk végén rövid összefoglalóval kapcsoljuk össze az új ismereteket, és megemlítjük az egyes témakörökhöz kapcsolódó hazai kutatásokat is az irodalomjegyzékben.



dag, felszíne meglepően kevés vasat tartalmaz. A hatalmas becsapódásos Caloris-medence a holdi tengerekkel ellentétben nem sötétebbnek, hanem világosabbnak mutatkozott a környezeténél. Az új mérések alapján pedig a korábban 1300 km-esnek tartott Caloris-medence kissé nagyobb, 1550 km átmérőjű. Viszonylag fiatal, sötét aljzatú és törmelékta-
rójú kráterek is mutatkoztak a bolygón (*1. ábra*). Emellett több, korábban ismeretlen vulká-

ni központot is azonosítottak, némelyiknél a robbanásos kitörés után visszahullott törmelék is látszik.

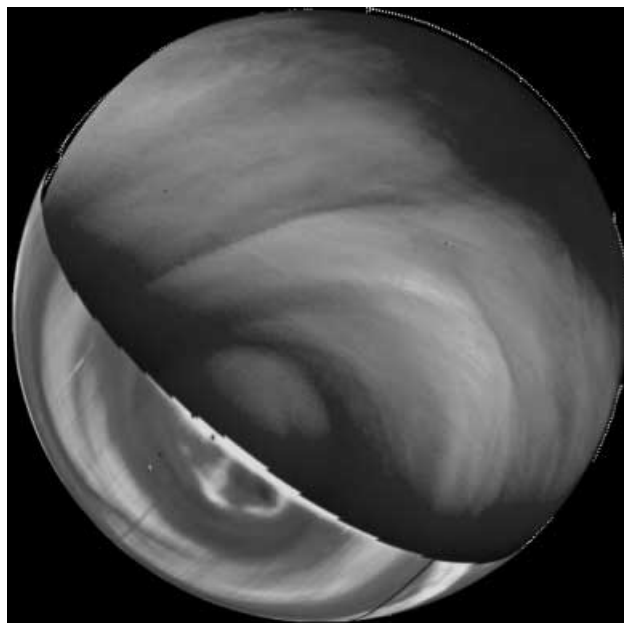
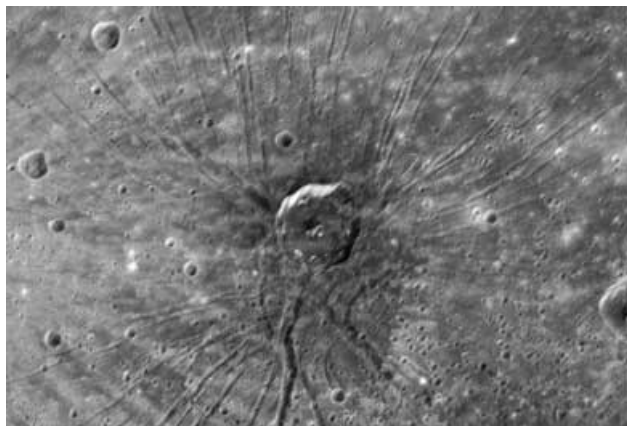
A Venus Express-űrszonda eredményei alapján a *Vénusz* bolygó egyenlítője és az 55 fokos vénuszrajzi szélessége közötti zónában a szélesebbé erősen

2. ábra. A Vénusz légköre a Venus Express-űrszonda VIRTIS (fent) és VMC (lent) kamerájával készült optikai és infravörös felvételen (ESA/VIRTIS, VMC teams).

Belső szomszédaink és a Hold

A Messenger-űrszonda 2008. január 14-én és október 6-án is megközelítette a *Merkúrt*, a legbelső bolygót, megörökítve eddig ismeretlen területeinek nagy részét. Kiderült, hogy míg a bolygó belseje vasban gaz-

1. ábra. Egy 40 km átmérőjű kráter és a Caloris-medence centrumában található sugárirányú, csillagszerű töréses alakzat (NASA).



1. táblázat

Az 1990 után indított sikeres űrszondák a Naprendszer égitesteinek vizsgálatára

szonda	indítás éve	célpont	űrügynökség
Hiten, Hogoromo	1990	Hold	JAXA
Ulysses	1990	Nap, napszél	NASA, ESA
Mars Observer	1992	Mars	NASA
Clementine	1994	Hold	NASA
Wind	1994	Nap, napszél	NASA
SOHO	1995	Nap, napszél	NASA, ESA
Mars Global Surveyor	1996	Mars	NASA
Mars Pathfinder, Sojourner	1996	Mars	NASA
NEAR-Shoemaker	1996	Eros kisbolygó	NASA
ACE	1997	napszél	NASA
Cassini, Huygens	1997	Szaturusz és holdjai	NASA, ESA, ASI
Deep Space-1	1998	Braille kisbolygó, Borrelly-üstökös	NASA
Lunar Prospector	1998	Hold	NASA
Nozomi	1998	Mars	JAXA
Stardust	1999	Wild-2 üstökös, Annefrank kisbolygó	NASA
Genesis	2001	napszélből mintavétel	NASA
Mars Odyssey	2001	Mars	NASA
Hayabusa, Minerva	2003	Itokawa kisbolygó	JAXA
Mars Express	2003	Mars	ESA
MER-A (Spirit)	2003	Mars	NASA
MER-B (Opportunity)	2003	Mars	NASA
Smart-1	2003	Hold	ESA
Messenger	2004	Merkúr	NASA
Rosetta, Philae	2004	Steins és Lutetia kisbolygók, Churyumov–Gerasimenko-üstökös	ESA
Deep Impact	2005	Tempel-1 üstökös	NASA
Mars Reconnaissance Orbiter	2005	Mars	NASA
Venus Express	2005	Vénusz	ESA
New Horizons	2006	Plútó	NASA
Stereo-A	2006	Nap, napszél	NASA
Stereo-B	2006	Nap, napszél	NASA
Chang'e-1	2007	Hold	CSA
Dawn	2007	Vesta, Ceres kisbolygók	NASA
Phoenix	2007	Mars	NASA
Selene (Kaguya)	2007	Hold	JAXA
Chandrayan	2008	Hold	ISA

Űrügynökségek: NASA – amerikai, ESA – európai, JAXA – japán, CSA – kínai, ISA – indiai, ASI – olasz

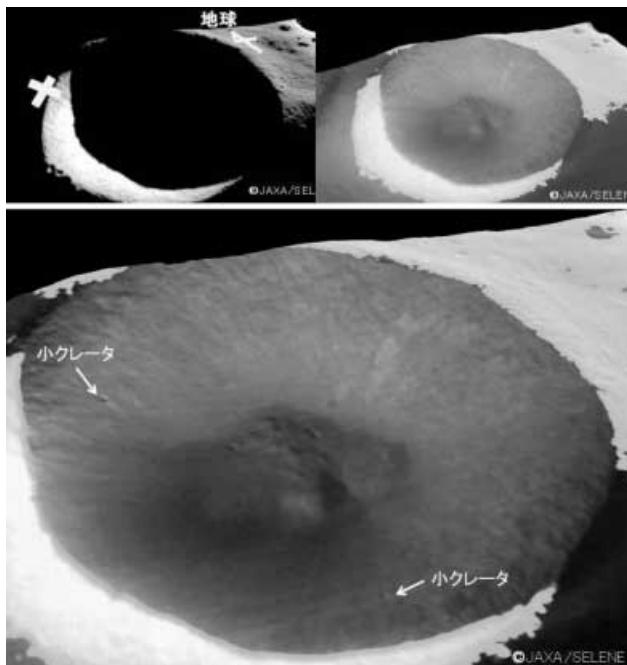
változik a magassággal: a 66 km magasan mérhető 370 km/h-s áramlás a felszín feletti 45–47 kilométeres magasságig ereszkedve 210 km/h-ra csökken – tehát a felhők tetején sokkal erősebb a szél a Vénuszon. A sarkokhoz 65 fokos szélességnél közelebb nagy örvényalakzat mutatkozik, ahol a szélesebbség a magasságtól független, és az örvény közepén majdnem nulla. Általában elmondható, hogy a szélesebbség erősen függ a helyi időtől, a Nap látszó magasságától. A helyi délutáni és esti szelek lényegesen erősebbek, mint a délelőtti és a reggeliek (2. ábra).

űrszonda 35 kg-os egysége. A felszín 25 percnyi szabadés után érte el, miközben felvételeket készített.

A Hold kutatásának egyik izgalma kérdése, hogy van-e jég a sötét sarkvidéki kráterek fenekén – az eddigi megfigyelések alapján ugyanis ezt nem sikerült egyértelműen eldönteni. A japán Selene-űrszondának a déli sarki 21 km-es Shackleton krátert mutató felvételein nem volt nyoma felszíni jégtakarónak, igaz a szakemberek törmelékréteg alatti jeget feltételeznek (3. ábra). Eközben a Hold körül keringő kínai Chang'e-1 űrszonda elkészítette kísérőnk eddigi leg-

A Galileo-űrszonda régi infravörös méréseinek újabb elemzése alapján a Vénusz felszínén lévő kiemelt és összegyűrt, tesz-szeráknak nevezett területek sugárzásuk alapján gránit-hoz hasonló anyagból állnak. A gránit a Földön szubdukcióra (alábukásra) és víztartalmú közegre utal, ezek pedig globális lemeztektonikát és egykori óceánok létét jelentik. Ha a későbbiekben bebizonyosodik, hogy valóban gránit van a Vénuszon, az erős érvet jelentene a bolygó ősi óceánjai és lemeztektonikája mellett. Ám ha létezett is egy kezdeti vizes állapot, az feltehetően nem sokáig, talán néhány százmillió évig tartott. A Nap fokozatosan erősödő sugárzása és a földinél kisebb naptávolság miatt az óceán elpárolgott, majd a vízmolekulák jó része elszökött. Vízburok hiányában a légköri széndioxid nem vált ki üledékes kőzeteket alkotva, és a légkörben maradvá létrehozta a mai erős üvegházhatást.

A Hold egyre több ázsiai állam szemében érdekes célpont, ahol tesztelheti, illetve látványosan demonstrálhatja technikai tudását egy-egy szondával. Ezek közül 2008. november 13-án, magyar idő szerint 16 óra körül a Holdba csapódott az indiai Chandrayan-1



3. ábra. A Selene-űrszonda képe a sarki Shackleton kráterről. Balra fent az eredeti fotó, jobbra fent egy olyan változat, amely kiemeli a kráter aljára a faláról szóródó halvány fényt. Lent ugyanennek a nagyméretű változata látható, a belső lejtőn két apró kráterrel (JAXA, Selene).

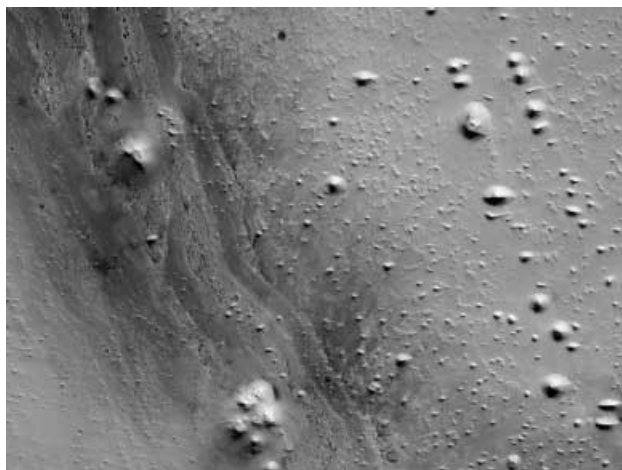
részletesebb, 38 millió km²-t lefedő térképét. A 120 méter felbontású képekből összerakott térkép részletessége valamivel meghaladja az amerikai Clementine-űrszonda adatainak 200 méteres felbontását.

A víz nyomában a Marson

A vörös bolygó kutatásában még mindig fontos motiváció a mai vagy az egykori élet lehetőségének keresése, és így a bolygó különféle felszínformáinak és keletkezésüknek a megértése. A bolygó fejlődéstörténetének egyik nagy kérdése, hogy miért nincsen sok karbonátos üledék a *Marson*. Egykor víz volt a felszínen, amiben a légköri szén-dioxid oldódhatott és karbonátos kőzetek formájában válhatott ki. A korábbi feltételezések alapján az ősi vizek savas kémhatása gátolhatta meg a karbonátok kiválását.

A Mars Reconnaissance Orbiter űrszonda (MRO) eredményei alapján végre nagyobb mennyiségben előforduló karbonátokra akadtak a felszínen, amelyeket egy 1500 km átmérőjű becsapódásos kráterben lévő Nili Fossae alakzatban azonosítottak. Eszerint mégis voltak semleges vagy lúgos kémhatású ősi vizek. Szintén az egykori élet lehetőségével kapcsolatos új eredmény, hogy a Vernal kráter déli részén olyan utóvulkáni hévforrások nyomát azonosították, ahol egykor meleg víz cirkulálhatott a kőzetek repedéseiben (4. ábra). Részletes vizsgálatukra azonban csak a felszínen nyílna majd lehetőség.

A Mars közelmúltját tekintve egyre több megfigyelés utal arra, hogy éghajlata közel 10 millió éves időskálán ingadozik. A forgástengelyt stabilizáló nagy

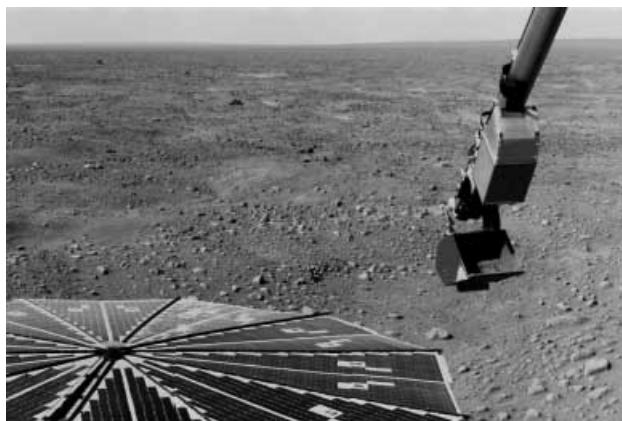


4. ábra. Sötét réteges üledékek a Vernal kráterben (NASA, JPL, UA).

tömegű hold hiányában erősen változik a bolygó tengelyferdesége, és a sarki jégsapkák anyaga időnként részben az egyenlítő vidékére vándorol, illetve egyes szélességi zónákban a porral együtt kifagy a felszínre. A mai éghajlaton nem mindenhol stabil az utóbbi réteg; ahol jégtartalma szublimál, a porszemcsék összeroskadnak. Mivel mind a réteg képződése, mind pusztulása a beeső napsugárzással kapcsolatos, ezért az eltérő kitettségű lejtőkön eltérő alakzatok azonosíthatók, amelyek a változó besugárzással, kifagyással kapcsolatban keletkeztek – segítségükkel a korábbi éghajlatra következtethetünk.

A bolygó mai felszíni viszonyait tekintve is kiemelkednek az élet lehetőségével kapcsolatos megfigyelések [3]. Földi távcsöves mérésekkel is sikerült a metán jelenlétét megerősíteni a Mars légkörében. A felszín alól szivárgó gáz koncentrációja az ottani tavasszal és nyáron a legmagasabb. Talán a felszín alól olyan repedéseken keresztül jut a gáz a légkörbe, amelyek a télen kifagyó jég miatt elzáródnak, majd nyáron ismét szabaddá válnak. Egy-egy aktív térségben a felszín alól szivárgó gáz mennyisége legalább 0,6 kg/s, ami bolygónkon a földgázmezők természetes szivárgásának nagyságrendjébe esik. Olyan területek felett mutatkozik sok metán, ahol ősi felszíni vízre vagy mai felszín alatti jégre utaló

5. ábra. A Phoenix-űrszonda leszállóhelye poligonális alakzatokkal (NASA, JPL).



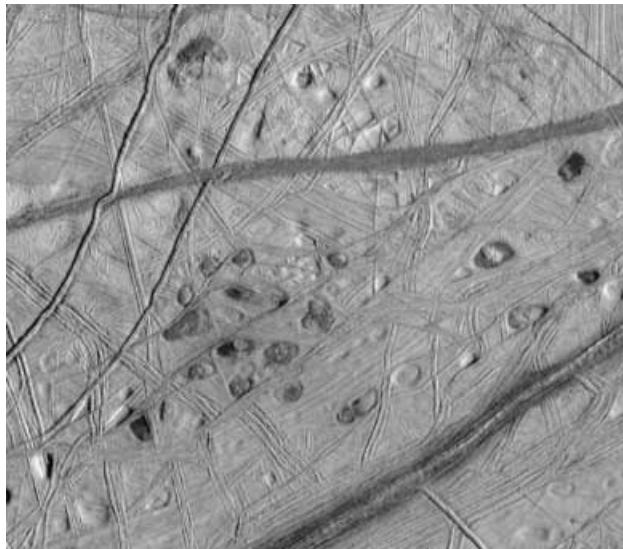
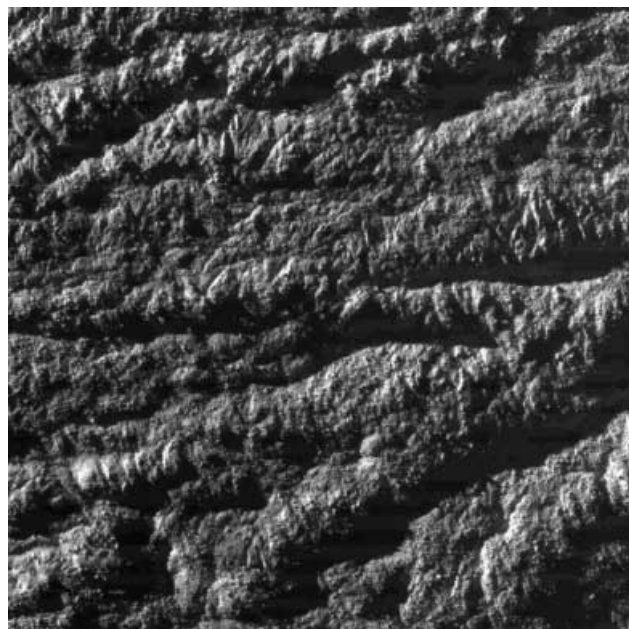
nyomok is vannak – például az Arabia Terra, a Nili Fossae vagy a Syrtis Maior térségében. A metán származhat vulkáni gázkibocsátásból, de akár biogén eredetű is lehet.

A Mars északi sarkvidékén leszállt Phoenix-űrszonda közvetlenül igazolta a felszín alatt 6–10 cm mélyen kezdődő vízjég jelenlétét és a poligonoknak nevezett alakzatok képében sarkvidéki éghajlatváltozások nyomait is (5. ábra). A marstalajban kis mennyiségben agyagásványokat és karbonátokat talált, éjszakai dér képződését, máskor pedig a felhőkből hulló hópelyheket figyelte meg. Az eredmények alapján a poláris térségben a mai jég mellett [6] egykor kevés folyékony víz lehetett a felszín alatt, és akár extrém körülményeket kibíró életformák is fennmaradhattak. Néhány megfigyelés alapján pedig elképzelhető, hogy akár a szonda működése idején is jelen lehetett folyékony víz az olvadáspontot csökkentő összetevők miatt, többek között a szonda leszállólábán.

Izgalmas jégholdak az óriásbolygók körül

A Jupiter körül jelenleg nem kering űrszonda, így az *Europa* holdjáról is a korábbi megfigyelések elemzése adott új eredményeket. A színeképek és különböző modellek alapján egy globális, lassú kémiai körforgás körvonalazódik az égitest esetében. Ennek keretében a világűrbeli különböző anyagok, köztük az Io vulkánjai által kibocsátott kén és kénvegyületek hullnak a felszínre. Ezek a napsugárzás és részecskebombázás segítségével a jégben különböző oxidokká, kénessavvá alakulnak, illetve hidrogén-peroxid is keletkezik mellettük. Egyes spektrumok alapján elképzelhető, hogy alkoholok, aldehidek, ammóniatartalmú anyagok is előfordulnak az *Europa* jégkérgében.

7. ábra. Az *Enceladus* törésekkel tarkított jeges felszíne (NASA, JPL, SSD).

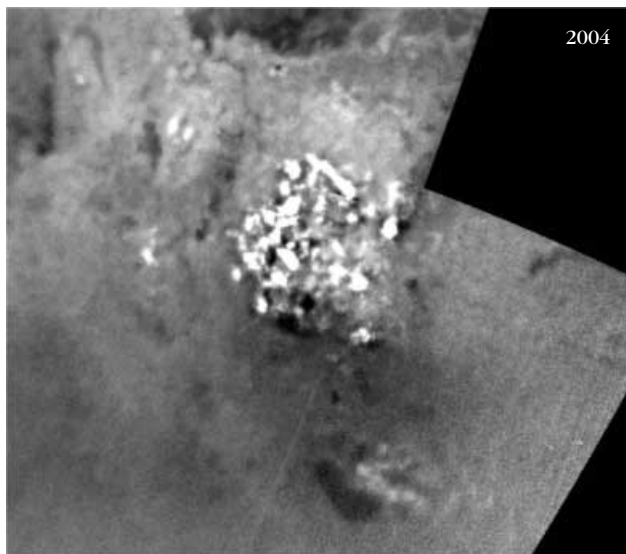


6. ábra. A jég alatti óceán vizéből a jégbe benyomult tömegek, amelyek az óceánban lévő különböző sóktól vörösesbarna színűek (NASA, JPL, UA, UC).

Míg a felszín oxidált jellegű, a jégpáncél alatti óceán fenekén a vulkáni központok redukált komponenseket juttatnak a vízbe. A kémiai modellek és a felszín összetétele alapján az *Europa* óceánja sós lehet, sok szulfát, magnézium, nátrium lehet benne oldott állapotban (6. ábra). A külső jégpáncél lassú, 10 millió éves időskálán részben újra beolvad, illetve újrafagy. Mindezekről oxidált anyagok jutnak a vízbe, amelyben a mélyről származó redukált komponensekkel keveredve aktív kémiai környezetet eredményezhetnek.

A *Szaturusz* körül keringő Cassini-űrszonda a gyűrűk vizsgálata során anyagcsomókat azonosított. Körülbelül 10–50 méteres, hosszúkas testek mozognak a rendszerben, amelyek az apró szemcsék összetapadásával keletkeznek. Amikor túl nagyra nőnek, szétdarabolódnak, majd véletlen ütközések révén újra összetapadnak, tehát lassan változik méretük és cserélődik anyaguk. A diffúz G-gyűrűben egy 250 km széles, 150 ezer km hosszú, a környezeténél fényesebb ív mutatkozott. Ennek belsejében sikerült egy fél km-es holdat azonosítani, amely a gyűrű anyagának forrása. Kiderült továbbá, hogy az 1500 km átmérőjű *Rhea* holdat 1600 és 6000 km közötti távolságban több kisebb gyűrű övezi. A cm-es testekből álló gyűrűk feltehetően a *Rhea* holdba történt korábbi becsapódáskor kirepült törmelékeket tartalmazzák.

Az *Enceladus* hold déli sarkvidékén lévő repedéseiből anyagsugarak törnek elő (7. ábra). A bennük mozgó jégzemcsék és vízgőz 0,6 km/s körüli sebességét a számítások alapján robbanásszerű hevességgel párolgó folyékony víz adhatja – azaz a víz lehet a felszín alatt. Az anyagsugarakban a H₂O mellett széndioxid, szén-monoxid és szerves molekulák is mutatkoztak. Eszerint nemcsak a vizes környezetek, hanem bennük a szerves összetevők is elterjedtebbek lehettek/lehetnek a Naprendszerben, mint korábban gondoltuk.



2004



2005

8. ábra. A Titan déli sarkvidékén lévő felhők (világos foltok) és tavak (sötét foltok).

A Cassini-űrszonda fő célpontján, a *Titanon* sikerült olyan sarkvidéki tavakat azonosítani, amelyek a felhőkből hulló metánesóktól keletkeztek és növekedtek. A 8. ábrán látható felvételpár felső tagja 2004. július 3-án, az alsó pedig 2005. június 6-án készült a 938 nanométeres infravörös hullámhosszon a

10. ábra. Az Itokawa elnyúlt alakja, középen fent a sima, törmelékkel feltöltött területtel (JAXA).



9. ábra. Egy apró szemcse becsapódásnyoma a mintagyűjtő anyagban, az aerogélben (NASA).

Titan déli sarkvidékéről. A világos alakzatok a légkör alacsonyabb részében, a troposzférában mutatkozó felhők, amelyek néhány óra leforgása alatt változnak. Feltehetően ezekből hullik a metáneső, míg a sötétebb területek metántavakat jelölnek a felszínen. Közülük a képen látható legnagyobb, a babszem alakú Ontario-tó színárnyalata a két felvételen az eltérő megvilágítási szög miatt különbözik. A bekarikázott területen megfigyelhető, hogy a két fotó rögzítése között újabb sötét foltok, azaz tavak képződtek, feltehetően az esőzésektől a mélyedéseiben felhalmozódott metánból.

Apró égitestek vizsgálata

A Stardust-űrszonda mintagyűjtőjében a *Wild-2* üstökösből több mint egymillió szemcse maradt. Ezeket az eddigi vizsgálatok alapján főleg szilikátok és szulfidok alkotják. A strukturálatlan szerkezetű szemcsék többnyire laza aggregátumok, amelyekben a kisebb és nagyobb szemcsék összetétele hasonló. Míg a jeges anyag csillagunktól távol, alacsony hőmérsékleten kondenzálódott, a szemcsék anyagának közel 10%-a a Naphoz igen közel keletkezett, és arra utal, hogy erős sugárirányú keveredés történt az ősi Naprendszerben. A szemcsék szerves anyagokat is tartalmaznak, köztük sokgyűrűs aromás szénhidrogének, metilamin (CH_3NH_2), etilamin ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_2$), alkoholok, agyagásványok és karbonátok is előfordulnak. Mindezek azt igazolják, hogy az élet születése előtt a bolygónkra becsapódó üstökösök sok értékes összetevőt hozhattak a H_2O molekulák mellett is (9. ábra).

Az apró égitestek kutatása terén a Hayabusa-űrszonda az *Itokawa* kisbolygóról adott új ismereteket (10. ábra). Kiderült, hogy a szabálytalan alakú égitest felszínén nemcsak az apró szemcsék mozogtak, amelyek létrehozták a kisbolygó alakját követő síkságokat. Emellett a nagyobb kőzetestek is mozogtak

időnként, és a lejtős területeken hossz tengelyükkel közel párhuzamos irányba rendeződtek. A Rosetta-szonda 2008. szeptember 5-én egy másik kisbolygót látogatott meg, amikor 800 kilométerre haladt el a *Steins* kisbolygó mellett. Az égitesten több becsapódásos kráter is látszott, amelyek közül a legnagyobbak közel 2 kilométeresek, arra utalnak, hogy az égitest felszíne viszonylag öreg lehet. Emellett egymás mellett sorakozó hét olyan kráter is felismerhető, amelyek talán azonos irányból érkező becsapódási sorozattól keletkeztek, miközben a kisbolygó elfordult a tengelye körül.

Több új kutatás arra utal, hogy az egyszerű és ellenálló élőlények tetszhalott állapotban tartós űrutazást is kibírnak, főleg ha egy kőzetdarab védi őket a sugárzásoktól. Az egyik nagy kérdés, hogy túlélhetik-e azt, amikor egy bolygó légkörében meteoroként lelassulnak, és közben felizzanak. Ennek vizsgálatára indították a STONE-6 kísérletet, amelynek visszatérő kapszulája a légkörünkben lefekeződött, miközben külső felületén kőzetminták voltak. Az űreszköz 12 napos Föld körüli keringés után 2007. szeptember 26-án landolt. A fossziliákat tartalmazó kőzetben az idős biogén szerkezetek felismerhetők maradtak. Ugyanakkor a körülbelül 1700 °C-ig melegedő külső felülete alatt lévő 2 cm vastag kőzetréteg nem tudta megvédeni az ott lévő, korábban élő cianobaktériumokat a pusztulástól – ennél vastagabb réteg kell a stabil védelemhez.

A Naprendszer peremvidékén

A korábban nagybolygóként besorolt *Plútónak* és három holdjának vizsgálatára indították a New Horizons-űrszondát. Az űreszköz 2007. február 28-án haladt el a Jupiter közelében, majd az ott végzett hintamanőver tovább gyorsította végső célpontja felé. A legnagyobb közelség alatt az eddigi legrészletesebb megfigyelések történtek a Jupiterről és légköréről, a bolygón megjelenő sarki fényekről az infravörös tartományban. Az Io esetében a Tvashtar névre keresztelt vulkáni központ felett sikerült egy kitörési felhőt (11. ábra), valamint a Vörös Folt nevű légörvényt is megörökíteni.

A Naptól még távolabb jár a két Voyager-űrszonda. A két űreszköz ezekben az években halad át a

11. ábra. Az Io Tvashtar vulkáni központjának kitörési felhője két, kissé eltérő irányból fotózva (NASA, JPL).



heliopauzán: a napszél és a csillagközi anyag ütközése által létrehozott határfelületen. A Voyager-1 űrszonda 2004. december 17-én, a Naptól 85 csillagászati egységre (CSE – a közepes Föld–Nap-távolság) keresztezte ezt a lökeshullámfrontot. Sajnos nem sokkal az esemény után elromlott a szonda plazmadetektora, ezért csak kevés információt sugárzott haza. A Voyager-2, társától délebbre haladva, a Naptól 75 CSE-re érkezett el ehhez a határhoz. Az ekliptika síkjától távolabb tehát közelebb van a lökeshullámfront a Naphoz. Bár a szonda a továbbiakban is távolodott csillagunktól, többször átlépte a határt: hol kifelé, hol befelé szelte át – feltehetően maga a front mozgott ide-oda.

A lökeshullámfrontonhoz közel váratlanul erős, de a földfelszíninél így is körülbelül százezerszer gyengébb mágneses tér mutatkozott, amelyet a turbulens módon keveredő töltött részecskék hozhattak létre. Az anyag melegebb volt, mint a napszélben a lassulás előtt, tehát a csillagunkhoz közelebb mért érték, de még így is körülbelül tízszer alacsonyabb hőmérsékletű, mint várták. A térségben az energia jelentős része talán nehezen detektálható részecskének adódik át, amelyeket a plazmaműszer nem észlelt, és ez a folyamat hűtötte le az anyagot.

Új Naprendszer körvonalazódik

A fenti legújabb eredményeken túl, az elmúlt mintegy 10 év fontosabb megfigyelései alapján az alábbi kép rajzolódik ki a Naprendszeréről. Általánosan elmondható, hogy megszilárdult az a teória, amely szerint az ősködben az apró testek egymással ütközve egyre nagyobb bolygócsírákat alkottak, miközben összetételüket a naptávolság erősen befolyásolta. Így születtek meg a meleg ősnaphoz közel a magas olvadáspontú fémekből és szilikátos kőzetekből álló Föld típusú bolygók, majd távolabb, a „hóhatáron” túl (ahol a H₂O is ki tudott már csapódni) létrejöttek az óriásbolygók. A Jupiter és a Szaturnusz esetében ezek kőzet- és jégmagma annyira nagyra nőtt, hogy sok gázt – hidrogént és héliumot – vonzott magához, kialakítva a két legnagyobb tömegű planétát.

A rendszer születésének végére sok olyan bolygócsíra maradt vissza, amelyek ütközéseikkel befolyásolták a már kialakult nagyobb égitestek fejlődését. Itt említhető a Hold keletkezése, amely a Föld és egy közel Mars méretű égitest ütközésekor kirobbant, és a bolygónk körüli pályán maradt törmelékből állt össze. De hasonló kataklizma miatt froghat a Vénusz lassan és társaival ellentétes irányban, és szintén egy-egy óriás becsapódás dönthette meg az Uránusz és a Neptunusz forgástengelyét. A Merkúr külső rétegét ugyancsak egy óriási ütközés robbanthatta le, részben ettől lehet anomálishan magas vastartalma az égitestnek. Különösen a peremvidéken volt sok olyan égitest, amely nem állt össze nagybolygóvá. Itt említhetők a *Kuiper-objektumok* (lásd később), vagy a *Triton*, amelyet a Neptunusz fogott be és tette holdjává.

A *kisbolygók* esetében kiderült, hogy a Mars és Jupiter között húzódó övezet mai tömege közel tizede az egykorinak. Az eredetileg itt található égitestek többségét ugyanis a Jupiter gravitációs zavarai kiszórták a kezdeti időszakban. A Naprendszerben közelről megfigyelt apró égitestek felszínformái igen változatosak, főleg a finom felszíni poranyag vándorlására utalnak jelek. A kisbolygók és üstökösök alakja változatos, szokatlanul sok közöttük a két nagy tömbből összetapadt test. Kiemelt csoportot képeznek a földközeli objektumok, amelyek becsapódásaikkal veszélyeztetik bolygónkat. Ezek űrbeli száma és katonai műholdakkal a légkörben azonosított robbanások gyakorisága alapján jelenleg méteres testekkel közel hetente, tízméteressel néhány évente, százméteressel száz vagy ezer évenként találkozhatunk. Utóbbi jelzi azt a mérethatárt, ahol a kérdéses testek már elérik a felszínt és krátert alakítanak ki a becsapódásaikkal. Igazán nagy, globális hatással pedig a kilométeres objektumok ütközése jár, ilyenekkel nagyságrendileg tízmillió évente találkozhatunk. Ennek megfelelően a földközeli apró égitestek kutatása [8] napjaink kiemelt észlelőprogramjai közé tartozik.

Az elmúlt években az égitestek térképezése révén felszínük egyre nagyobb részét, egyre részletesebb felvételekkel sikerül lefedni [2]. Ezek alapján kiderült, hogy sok, korábban csak a Földről ismert, a belsőt és a felszínt alakító folyamat [4] más égitesteken is megjelenik. Ennek megfelelően homokdűnéket és szélnyomokat a Vénuszon, a Földön, a Marson, a Titanon [1, 5], a földi folyóvölgyekre és medrekre emlékeztető alakzatokat [7] a Vénuszon, a Földön, a Holdon, a Marson és a Titanon sikerült azonosítani. Lejtős tömegmozgások pedig sok apró égitesten, köztük jég-holdakon (Europa, Callisto, Titan), valamint kisbolygókön is előfordulnak.

Az égitestek felszíni változásait nemcsak a fent említett, főként napsugárzással kapcsolatos folyamatok alakítják, hanem belső eredetű hatások is. Bár a Föld típusú égitesteknél a radioaktív bomlással felszabadult hő és az akkrécióból (kezdeti összeállásból) visszamaradt hőmennyiség a fő energiaforrás, az árapályhatás is fontos tényező. Ez leglátványosabban az Io esetében jelentkezik, ahol az árapály folyamatosan deformálja az égitestet, és a felszabaduló hő temérdek aktív vulkáni központot eredményez.

A külső Naprendszer megítélése is sokat változott az elmúlt tíz évben. Napjainkra több mint ezer, a Neptunusznál távolabbi, Kuiper-objektumoknak nevezett égitestet azonosítottak. Kiderült, hogy ezek közé tartozik a Plútó is, amely ennek a csoportnak egy igen nagy, de nem a legnagyobb képviselője. A felismert égitestek és a modellszámítások alapján három nagy égitestcsoportot feltételeznek a Naprendszer peremvidékén: a Kuiper-öv elsősorban a Neptunuszon túl keletkezett égitesteket tartalmaz, amelyek végül nem álltak össze nagybolygóvá. Egy részük a Plútóhoz hasonló pályán, a Neptunusz gravitációs hatása alatt mozog, ezek keringési ideje 2:3 arányú

rezonanciában áll az órásbolygókéval – ezeket nevezik plutínóknak.

Ezer és 10 ezer CSE távolság között húzódik a korong alakú *belső Oort-* avagy *Hills-felhő*, amelyben sok millió, az óriásbolygók térségéből kiszórt apró égitest kering a Nap körül. Még messzebb, 10 és 100 ezer CSE között húzódik a nagyjából gömb alakú *külső Oort-felhő*. Ennek tagjai kötődnek leglazábban a rendszerhez, a közelben elhaladó csillagok, vagy a galaxis távolabbi részeinek gravitációs hatására gyakran elszakadnak a rendszertől, de alkalmanként a belső térségek felé indulnak, ritkán üstökösáporokkal sújtva a bolygókat.

Az új eredmények alapján hangsúlyosabbnak tűnnek az egyes égitestek közötti kapcsolatok, főleg az óriásbolygók holdrendszerain belül. A gravitációs kapcsolatok révén fellépő árapályhatások több jég-holdat felmelegítettek és erősen átalakítottak, némelyek (Europa, Titan, esetleg a Ganymedes, Callisto, valamint talán az Enceladus, Triton) felszíne alatt ma is folyékony vízből álló réteg található. Emellett valószínű, hogy hosszú idő alatt olyan gyenge hatások is, mint például az elnyelődő napsugárzás és annak eltérő irányú visszasugárzása befolyásolja a kisbolygók forgási jellemzőjét és talán pályájukat is.

Végül érdemes megemlíteni, hogy mára kiderült: a bolygókeletkezés és a bolygórendszerek nem egyediek a Világegyetemben. A születő csillagok körül egy jellegzetes anyagkorong: úgynevezett protoplanetáris korong alakul ki, amelynek anyagából később planéták állnak össze. Az így született bolygókból, amelyeket Naprendszeren kívüli helyzetük miatt exobolygóknak neveznek, 2009-ig több mint 300-at azonosítottak. Saját Naprendszerünk változatossága tehát csak a jéghegy csúcsa, számtalan más bolygórendszer és még ismeretlen égitesttípus lehet – szerencsés esetben a Földhöz hasonló objektumokkal, ahol talán szintén lehetőség nyílt az élet kialakulására.

Irodalom

- Gyenyisz Péter: Planetomorfológia. in Lóczy Dénes, Veress Márton: *Geomorfológia II.* Dialóg Campus Kiadó, Budapest–Pécs, (2008) 305–362.
- Hargitai Henrik, Bérczi Szaniszló: Multilingual Maps of the Terrestrial Planets and their Moons: the East and Central European Edition. *European Planetary Science Congress*, (2006) 515.
- Horváth András, Gánti Tibor, Bérczi Szaniszló, Pócs Tamás, Kereszturi Ákos, Sik András: Marsi dűnefoltok: az élet lehetősége a Marson? *Magyar Tudomány* (2006) 11. 1357–1375.
- Illés Erzsébet: A Föld mint égitest. *Magyar Tudomány* (1997) 10. 1225–1232.
- Kereszturi Ákos: *Klimatikus planetomorfológia.* ELTE TTK FFI Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék (2008) oktatási segédanyag.
- Kuti Adrienn: Thermal behavior of Dokka crater and its surroundings in the north polar region of Mars. *40th Lunar and Planetary Science Conference* (2009) #1006.
- Mihályi Krisztián, Gucsik Arnold, Szabó József: Drainage Patterns of Terrestrial Complex Meteorite Craters: A Hydrogeological Overview. *39th Lunar and Planetary Science Conference* (2008) #1200.
- Szabó M. Gyula, Csák Balázs, Sárnecky Krisztián, Kiss L. László: Photometric observations of 9 Near-Earth Objects. *Astronomy and Astrophysics* (2003) 375, 285–292.