

A FOLYÉKONY VÍZ NYOMÁBAN A NAPRENDSZERBEN

– a primitív élet feltételeinek kutatása űrszondákkal

Bebesi Zsófia, Juhász Antal
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Az emberiséget a tudomány hajnala óta foglalkoztatja annak kérdése, hogy létezhet-e élet bolygónkon kívül. És bár egyelőre nem született erre utaló felfedezés, napjainkban, amikor Naprendszerünk bolygóit és azok holdjait már közvetlen közlőről is megvizsgálhatjuk, több esetben felmerült, hogy a megfelelő fizikai és kémiai feltételek együttállása esetleg lehetővé teszi a primitív létformák kialakulását bizonyos égitesteken, akár itt, a közvetlen kozmikus környezetünkben is. A mérnökök és kutatók jelenleg is folyamatosan dolgoznak a primitív élet, vagy akár a későbbi emberes űrrepülések feltételeinek vizsgálatára tervezett űrmissziók létrehozásán, amelyek közül némelyik még ebben az évtizedben újtára indulhat. Természetesen nem felejtkezhetünk meg az elmúlt évtizedek eredményeiről sem, amikor például a Mars felszínén, a kőzetekben, a talajban kerestük az élet nyomait, de jelen tanulmányban – a téma terjedelmére tekintettel – a Marssal nem foglalkozunk, ehelyett kifejezetten azokra az égitestekre összpontosítunk, amelyeket közelebbről csak a közelmúltban tudtunk alaposan megvizsgálni.

Az elmúlt évtizedek űrszondás mérései lehetővé tették, hogy részletesen megismerjük a Jupitert és a Szaturnuszt, valamint holdjaikat, illetve eljutottunk az aszteroidaöv legnagyobb égitesteihez és a Kuiper-övbé is. A Jupiter esetében a Galileo (1995–2003) és a Juno (2016–), a Szaturnusznál pedig a Cassini-Huygens (2004–2017) űrmissziók révén tanulmányozhatuk ezen bolygók nagyobb holdjait, a környezetükben zajló fizikai folyamatokat, és számos érdekes új felfe-

dezés is született. Ezek egyike a Szaturnusz Enceladus holdjának napjainkban is zajló aktivitása, az űrmisszió egyik legérdekesebb megfigyelése. A Jupiter Europa holdjáról már korábban is tudtuk (földi és űrszondás megfigyelésekből), hogy felszíne jéggel borított, aránylag fiatal, valamint feltételezték, hogy kiterjedt kerge alatt óceáni réteg található. A két említett holdon kívül a folyékony víz hordozására vonatkozóan további jelölteknek tekintik például a Jupiter Ganymede holdját, a Ceres törpebolygót, de ide sorolható a több szempontból is kivételes Szaturnusz-hold, a Titan is, bár ott az eddigi mérések globális felszín alatti óceán helyett inkább rétegesen elhelyezkedő víztározókra utalnak. Folyamatosan zajlanak kutatások arra is, hogy a Mars felszín alatti tartományaiban esetleg napjainkban is találhatunk-e folyékony vizet tartalmazó rétegeket.

A felszín alatti tartomány kutatása nem triviális feladat, jelenleg több űrmissziót készítenek elő, elsősorban az Europa újbóli meglátogatására, de az Enceladus további vizsgálata is napirenden van. Mindkét hold esetében a kiáramló vízjég összetételét elemezve megfigyelhetjük azokat az összetevőket (só és ásványi anyagok), amelyek révén ezek az égitestek lehetségessé válhattak a primitív életformák létrejöttének támogatására, hordozására, azonban konkrét létezésükre egyelőre nincs közvetlen bizonyítékunk. Ennek felderítése a következő évtizedek feladata lesz.

Vizet tartalmazó égitestek a Naprendszerben, valamint a felszín alatti óceánra utaló jelek

Bár Naprendszerünk égitestjeinek többségén jelen van a víz (vagy összetevői), de általában fagyott állapotban. Folyékony vizet mostanáig közvetlenül csak Földünk felszínén figyelhetünk meg, azonban számos közvetett bizonyíték utal arra, hogy a Jupiter és a Szaturnusz némelyik holdján, a Marson, valamint egyes aszteroidákon is vagy állandó jelleggel, vagy időről időre cseppfolyós halmazállapotú vizet találhatunk.

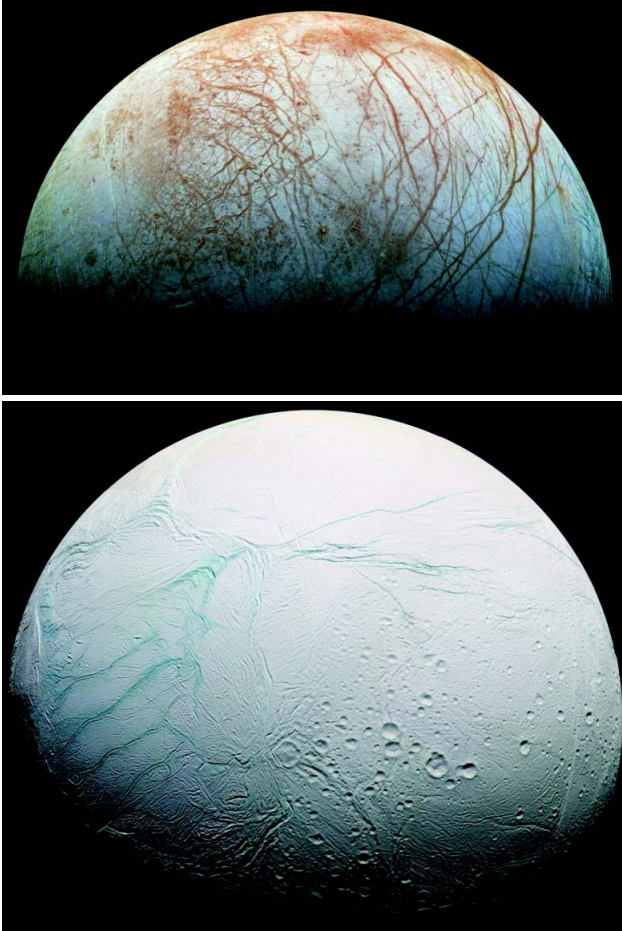
A Földön kívüli folyékony víz előfordulásának két elsődleges jelöltje a Jupiter körül keringő Europa, valamint a Szaturnusz Enceladus holdja (1. ábra). Számos jel utal arra, hogy e két hold felszínét borító jégpáncél alatt akár globális, folyékony vízóceán húzódhat. Ezek mellett felmerült még, hogy a Jupiter Ganymede holdjának, valamint a Szaturnusz Titan holdjának felszíne alatt is lehet folyékony víz. Fagyott állapotban kimutatták már a vizet a Mars és a Plútó mellett a Ceres nevű törpebolygón, valamint a Jupiter Callisto holdján és a Szaturnusz Dione holdján is. A



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



Juhász Antal 1988-ban végzett az ELTE fizikus szakán, 1989 óta dolgozik a KFKI Űrfizikai osztályán. Doktori fokozatát 1993-ban szerezte meg. Jelenleg a Wigner FK Rézszecke és Magfizikai Intézetének tudományos főmunkatársa. Szakterülete a Naprendszerben található kozmikus por (bolygóközi, bolygók, holdak, üstökösök körüli por-plazma-elektromágneses tér kölcsönhatása) dinamikájának, térbeli eloszlásának modellezése a különböző űrszondák poméréseinek értelmezéséhez, előrejelzéséhez.



1. ábra. A Jupiter Europa holdja (föül), valamint a Szaturnusz körül keringő Enceladus (alul) esetében is számos bizonyíték utal arra, hogy a felszínük alatt globális óceán van.

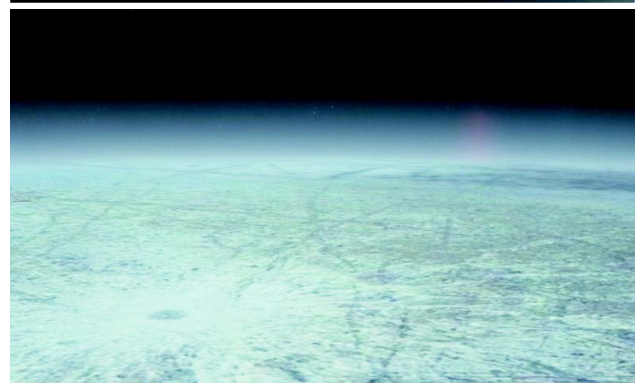
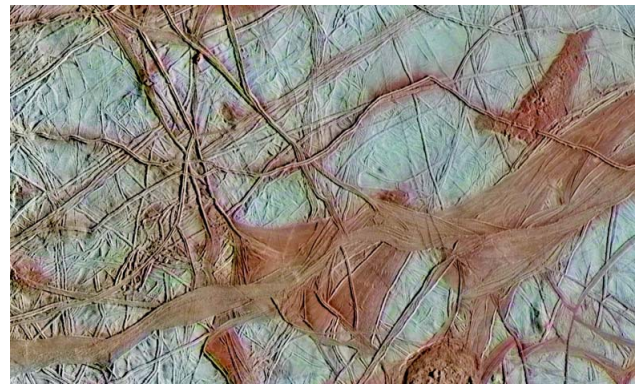
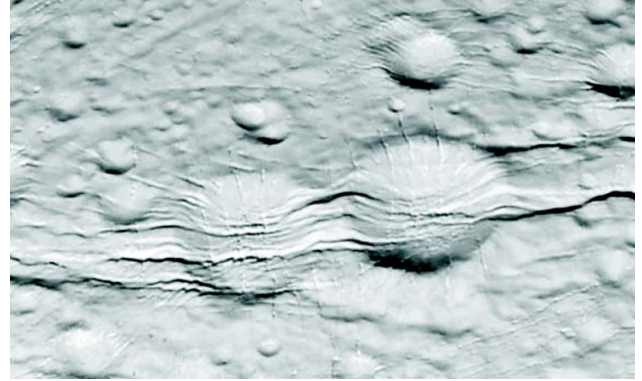
Szaturnusz további jeges holdjai, a Mimas, a Tethys és a Rhea szintén tartalmaznak vízjeget, és az a különleges Iapetus holdon is megtalálható.

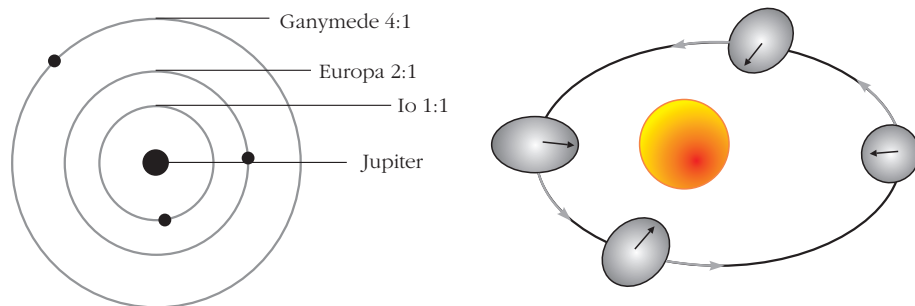
Számottevő atmoszféra nélküli égitestek esetében a felszín alatt található folyékony víztömeg jelenlétére utal a kráterek hiánya vagy a szórványos kráterezettség, mivel a felszínre a folyamatosan újabb és újabb rétegek rakódnak le a gejzírek formájában távozó vízjégből (2. ábra). A felszín tehát „fiatalnak” tűnik, holott a belső folyamatok hiányában sűrűn borítanak a becsapódási kráterek. Az aktív vízkiáramlást mutató égitestek felszínén, mint például a Jupiter Europa holdján, találhatunk ugyan krátereket, mivel a gejzírek esetenként egy adott régióra korlátozódnak, azonban gyakran megfigyelhető a kráterek peremének elmosódottsága, amit szintén a lerakódott jég okoz. Az Európának mindössze 41 nevesített krátere van, ezek is többnyire kis méretűek, és átmérőjük általában nem éri el a 40 km-t.

A felszínen húzódó repedések, törésvonalak szintén utalhatnak a jégkéreg alatti óceánra, amelyek például egy hold esetében a bolygó körüli ellipszispályán való keringés során fellépő árapályhatás következtében jönnek létre. Az Europa esetében szinte a teljes felszínen megtalálhatók, míg az Enceladuson a repedések elsősorban a hold déli pólusának közelében koncent-

rálódnak, ahol a Cassini űrmisszió kamerái és detektorai számtalan gejzirt azonosítottak. Ehhez hasonló aktivitást korábban egyetlen naprendszerbeli égitestnél sem figyelhetünk meg. Az Enceladus esetében szintén feltételezzük, hogy az óceán felszín alatti tömegeloszlá-

2. ábra. Felszín alatti óceánra utaló jelek (föül: elmosódott szegélyű kráterek; lejjeb: repedések a felszínen, anyaglerakódás; még lejjeb: gejzírek; legalul: híg atmoszféra).





3. ábra. A belső Galilei-holdak keringési rezonanciái (balra). A keringés során fellépő deformációk (jobbra) – árapályhatás – következtében keletkező sűrűlódás által termelt hő tarthatja folyékonyan a jégkéreg alatt található vizet.

sa nem egyenletes, azaz a déli pólus környezetében a vízréteg mélyebb és kiterjedtebb lehet.

Az Europa esetében nagyon ritka atmoszférát is megfigyelhetünk, amelynek forrása szintén a kéreg alól, a repedések mentén kiáramló vízjég, illetve az abból keletkező pára. A mérések azt is megerősítették, hogy a vízben különböző sók és ásványi anyagok is megtalálhatók, amelyek nem különböznek lényegesen a földi tengervízben is kimutatható összetevőktől. Feltehetően ezek lerakódásai láthatók a hold felszínén is.

Folyékony víz keresése a Jupiter holdjain

A Jupiter körül keringő holdak közül elsősorban az Europa és a Ganymede felszíne alatt egybefüggő óceán lehet. A közeljövőben a Jupiterhez induló űrmissziók is főleg ezt a két holdat veszik célba, és elsődleges kutatási céljuk a folyékony víz kimutatása, a vízréteg fizikai tulajdonságainak vizsgálata, valamint annak megválaszolása, hogy alkalmasak lehetnek-e az élet valamilyen formájának hordozására. Ez utóbbi nem elképzelhetetlen, mivel a holdak felszínét borító jégkéreg megvédené az óceánban fellelhető létformákat a sugárzástól, és az óceáni tartományok a gejzírek formájában kiáramló vízben kimutatott ásványi anyagok és kémiai összetevőik révén alkalmasak lehetnek a primitív élet hordozására.

A Jupitert korábban a NASA Galileo nevű keringő egysége vizsgálta behatóan (1995 és 2003 között), illetve 2016 óta jelenleg is ott kering (előreláthatólag 2021-ig) a Juno (szintén a NASA űrszondája).

Europa

A Jupiter bolygóhoz második legközelebb keringő Galilei-hold (a vulkanikusan aktív Io után) az Europa. Átlagos pályasugara $9,38 R_J$ (ahol R_J a Jupiter átlagos sugara, 71 492 km), keringési ideje pedig 3,55 nap. A 3121 km átmérőjű Europa felszínét elsősorban szilikátok alkotják, vastag, repedésekkel tarkított vízjégkéreggel, belsejében pedig valószínűleg vas-nikkel mag található. Atmoszférája nagyon ritka, és fő összetevője az oxigén. Keringése gravitációsan kötött, tehát az Europa egyik féltekéje folyamatosan a Jupiter felé néz, bár egyes mérések szerint keringési idejénél kissé gyorsabban forog. Ez belső aszimmetriára utalhat, va-

lamint alátámaszthatja azt a feltételezést is, miszerint a kéreg és a belső kőzetrétegek között egy felszín alatti folyadék réteg található.

Ellipszispálya esetén az égitest deformációjának mértéke a pálya mentén változik, belső sűrűlódást generál, ami hőt termel, ez az árapályfűtés folyamata. Az ideális kétest-problémában az ellipszispálya idővel a körpálya felé tendál,

azonban az árapályfűtés fennmarad, amennyiben további gravitációs hatásokkal is kell számolni, amelyek megakadályozzák a pálya „körösödését”. Erre jó példa az Io hold, amelynek pályaeccentricitását a közte, valamint az Europa és a Ganymede közötti rezonancia tartja fenn.

Ez a mechanizmus döntő fontosságú lehet az Europa óceánjának fenntartásában is, azonban az Europa nagyobb távolsága a Jupitertől jelentősen mérsékli az itt ható erőket (körülbelül negyedakkora az árapályhatás, mint az Io esetében). Az árapálysűrűlódás következtében felszabaduló hő biztosítja a felszín alatti réteg folyékony állapotának fenntartását és aktív geológiai folyamatokat is indukál (3. és 4. ábra).

Az Europa felszínét folyamatosan bombázzák a Jupiter magnetoszférájában áramló, nagy energiájú töltött részecskék, valamint jelentős ionizáló hatása van a Nap extrém ultravioleta (EUV) sugárzásának is. Mindezek részt vesznek az óceánból a gejzírek által a felszínre kerülő szerves molekulák lebontásában, így elpusztíthatják azokat a bio- és kémiai szignatúrákat is, amelyek esetleges primitív élet jelenlétére utalhatnak. Kérdés, hogy a hold felszínének melyik részét éri a legintenzívebben a sugárzás? Milyen mélyre hatolnak be a nagy energiájú részecskék? Milyen formában változtatja meg a sugárzás a frissen felszínre került anyagokat? Az elsődleges becslések szerint a jégkéreg felszínének felső 3 cm-es rétegében a nagyenergiás sugárzás minden szerves anyagot lebont, de feltehetőleg ~1 méteres mélységben már érdemes lenne az élet összetevői után kutatni. Mindezeket figyelembe kell venni az elkövetkező űrmissziók megtervezésekor. A napsugárzás, valamint a Jupiter mágneses terében lévő nagy energiájú részecskék által közvetített sugárdózis értéke ~5400 mSv, ami 24 óra alatt megölné egy védőfelszerelés nélküli embert.

Az Europa felszíne különféle sókban (főleg magnézium-szulfátban) gazdag, ezek a sók a felszín alatti víztömegből származnak. Azonban spektrográfiai mérések szerint ezek színtelenek vagy fehérek, ezért a felszínen észlelt vöröses szín kapcsán a kén is szóba jöhet, és az sem kizárt, hogy az Europa felszíni elszíneződéseinek egyik forrása az Io holdról származó, lerakódott nanopor. Egy másik elmélet szerint az elszíneződött területeket szerves vegyületek, tholinok borítják. Még kérdéses, hogy ezek milyen folyamatok révén jönnek létre, mindenesetre asztrobiológiai

szempontból nagyon jelentős lehetnek, mivel alapvető szerepet játszhatnak a prebiotikus kémiában és végül a primitív létformák létrejöttében. Korábban a Hubble-űrteleszkóppal végzett megfigyelések során a NaCl jelenlétét is kimutatták már az Európán.

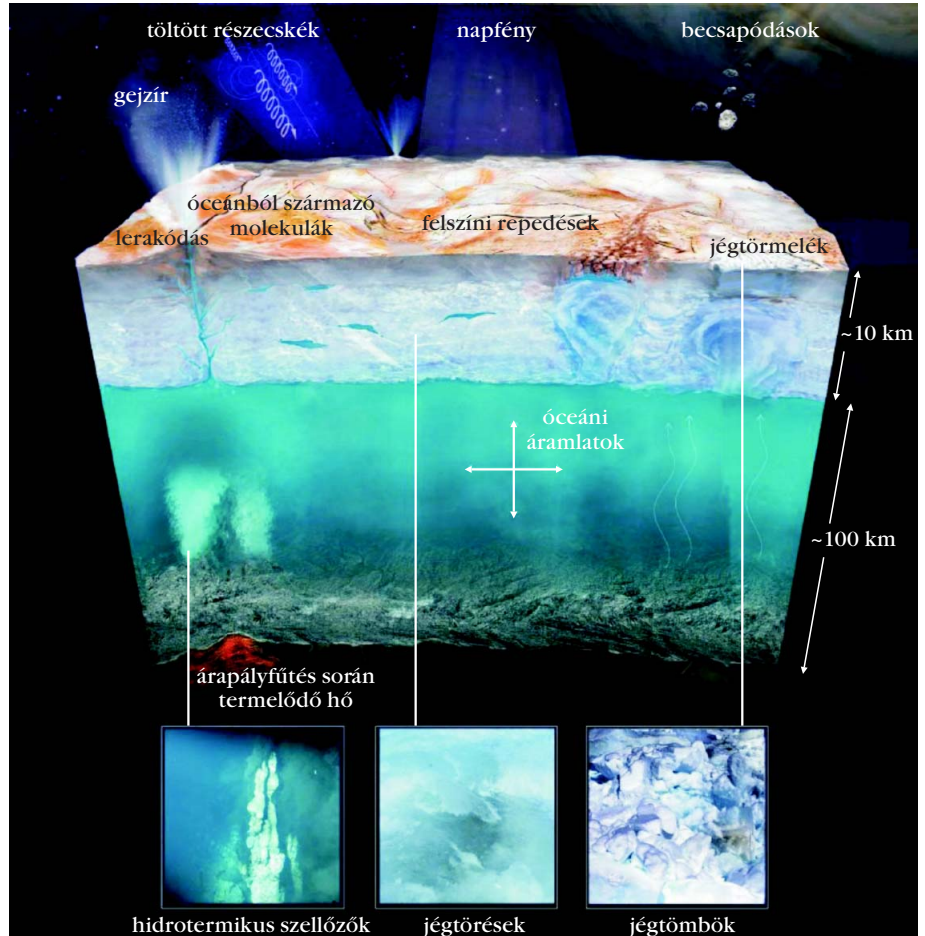
A jelenlegi modellek és elméletek szerint az Európán található teljes víz mennyisége nagyobb, mint a földi óceánokban található víz összessége. A holdat ritka atmoszféra is burkolja, amely főleg molekuláris oxigénből áll, azonban az atmoszférikus nyomás mindössze $0,1 \mu\text{Pa}$. Az oxigén feltehetőleg a víz napsugárzás által történő bomlásából származik.

A Galileo mérései alapján felfedezték az Europa indukált mágneses terét is, amely a Jupiterrel való kölcsönhatása révén, egy felszín alatti vezető réteg közreműködésével jött létre. Már akkor valószínűsítették, hogy ez a réteg egy sós vízből álló óceán lehet. A Galileo mérései szerint az Europa gyenge indukált mágneses terének télerőssége a mágneses egyenlítőnél $\sim 120 \text{ nT}$ (ez $\sim 1/6$ -a a Ganymede-nél, illetve ~ 6 -szorosa a Callistónál mért értéknek).

Ganymede

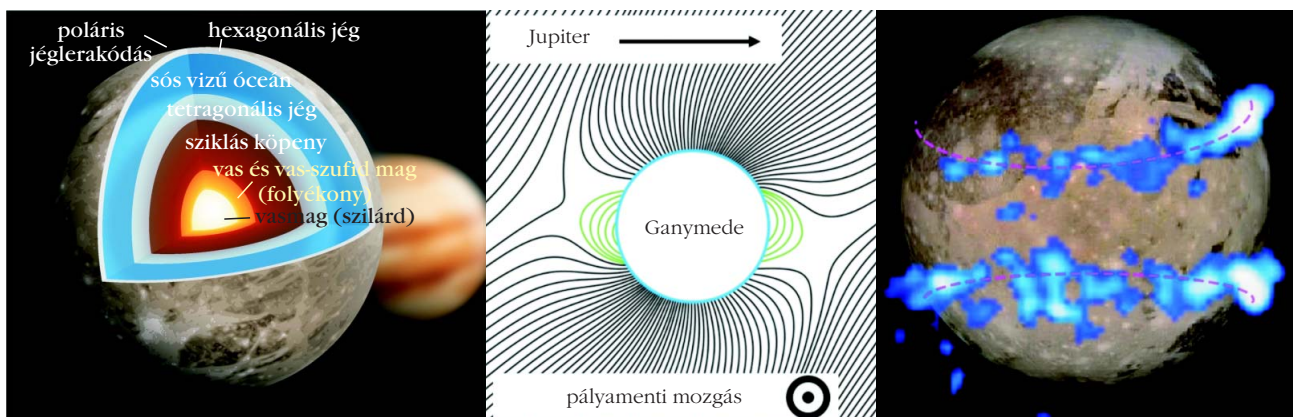
A Ganymede a Naprendszer legnagyobb holdja (átmérője 5268 km), még a Merkúr bolygónál is kiterjedtebb, azonban tömege annak mindössze 45% -a. A jelenlegi feltételezések szerint fémmagja van, és ez az

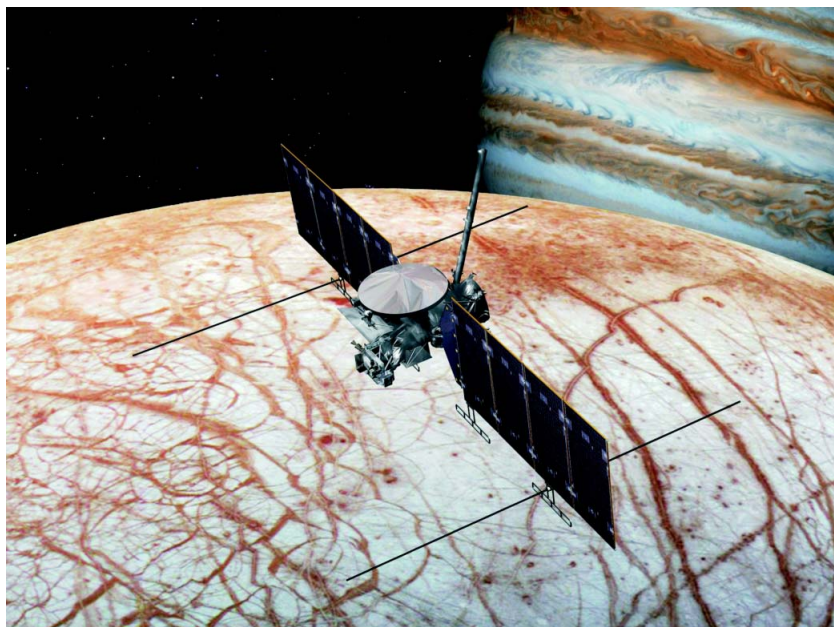
egyetlen ismert hold a Naprendszerben saját mágneses térrel, amelyet valószínűleg a vasmag fölötti folyékony fémrétegben zajló konvekció tart fenn. Globálisan nézve nagyjából azonos mennyiségben tartalmaz szilikátot és vízjeget. Az Európához hasonlóan vékony oxigénatmoszféra borítja, amely feltehetőleg ózont is tartalmaz. Belső szerkezete valószínűleg jól differenciált, és külső jégkérgé alatt kiterjedt óceán található (5. ábra). A Ganymede esetében is látha-



4. ábra. Az Europa felszín alatti óceánjának kiterjedése, szerkezete, valamint a környezetében zajló (külső és belső) fizikai folyamatok.

5. ábra. A Ganymede belső szerkezete (balra), belső mágneses tere erővonalainak kölcsönhatása a Jupiter mágneses erővonalával (középen), valamint az észlelt auróra (jobbra).





6. ábra. Az Europa Clipper űrmisszió.

alatt van. A dipóltér erőssége az egyenlítőnél ~ 719 nT (a pólusoknál ennek kétszerese), ami jóval magasabb, mint a Jupiter magnetoszférájának télerőssége a Ganymede pályája mentén (~ 120 nT). A Ganymede egyenlítői tartományában a mágneses tér ellentétes irányú a Jupiter mágneses terével, tehát lehetségessé válik a rekonnektió, azaz a mágneses erővonalak összekapcsolódása. A hold magnetoszférájának átmérője 4-5 Ganymede-sugárra terjed ki. A zárt erővonalak 30° -os szélesség alatt helyezkednek el, ahol a töltött részecskék csapdába esnek, és egyfajta sugárzási övet hoznak létre. A Hubble-űrteleszkóppal vizsgálták a Ganymede auroráját, amelynek különleges mozgásából szintén arra következtettek, hogy ennek a holdnak hatalmas, kiterjedt, sós vízrétege lehet.

tunk a felszínen párhuzamos repedéseket, rianásokat, azonban az árapálysúrlódás itt a belső Galilei-holdakéhoz képest már kevésbé jelentős.

A Ganymede felszínének vizsgálata során vízjégen kívül CO_2 , SO_2 , dición, hidrogén-szulfát és szerves molekulák nyomát is észlelték. A Galileo által kimutatott magnézium-szulfát és a nátrium-szulfát valószínűleg a felszín alatti óceánból származik.

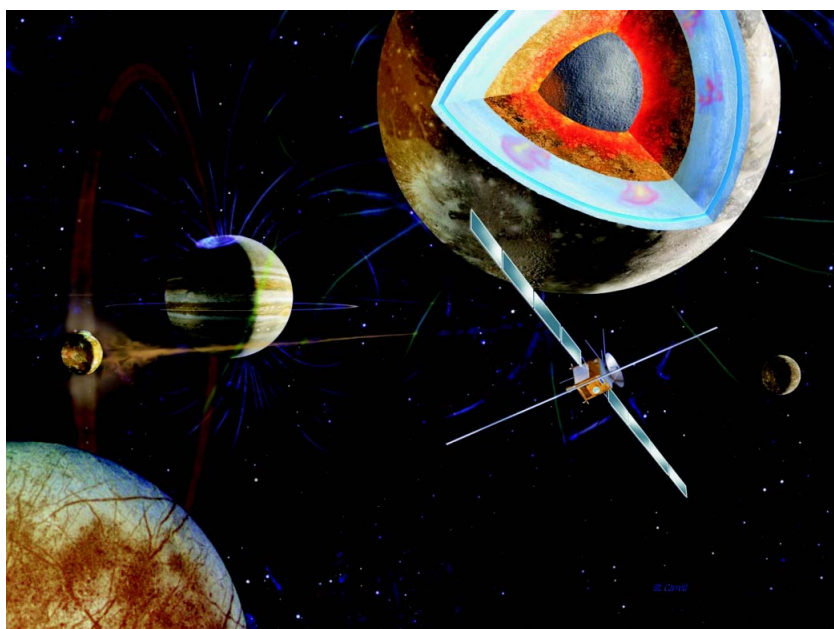
A Ganymede mágneses tere némiképp védelmet nyújt a felszínen lévő szerves vegyületek részére a Jupiter nagy energiájú töltött részecskéivel szemben. A hold mágneses momentuma a Merkúrénak körülbelül a háromszorosa. A mágneses dipól a hold forgástengelyével 176° -os szöget zár be, tehát az északi pólus a pályasík

A Jupiter holdjaihoz a közeljövőben tervezett űrmissziók

A NASA *Europa Clipper* szondájának (6. ábra) tudományos céljai között szerepel az Europa környezetében mérhető mágneses tér vizsgálata (amiből következtetni lehet az óceán mélységére és sötartalmára), a felszín alatti víztömegekre utaló fizikai folyamatok kutatása, aktív geizírek keresése a hold felszínén, valamint radaros mérések elvégzése a jégvastagság megállapítása céljából. A jelenlegi tervek szerint 2025-ben indítandó szonda 2030-2031 körül áll pályára az Europa körül. A Clipper 45 alkalommal közelítené majd meg az Európát, ezek során a felszín feletti 25 és 2700 km közötti magasságtartományban repülne el.

Az ESA *JUICE* (Jupiter Icy Moon Explorer) űrszondájának indítását 2022-re tervezik. A szonda előreláthatólag 2029 októberében érkezik meg a Jupiterhez, majd legalább három éven keresztül vizsgálja az óriásbolygót, valamint a Ganymede, a Callisto és az Europa holdakat (7. ábra). Ezt követően 2032-ben állítják véglegesen pályára a Ganymede körül. A kutatás egyik legfőbb célja a holdak felszíne alatt feltételezett óceánok közvetett vizsgálata, valamint annak megállapítása, hogy adottak lehetnek-e valamilyen formában a kezdetleges élet feltételei. A *JUICE* fedélzeti berendezései között található rádió- és plazmahullámmérő, töltött részecskedetektor, magnetométer, radar, lézeres magasságmérő, valamint képalkotó berendezések is.

7. ábra. A JUICE űrmisszió.



Folyékony víz keresése a Szaturnusz holdjain

A Szaturnusz holdrendszerében mostanáig két olyan jelöltet találtunk, amelyek felszíne alatt feltételezhetően nagyobb mennyiségű folyékony víz található. Ezek egyike az apró Enceladus, amelynek figyelemre méltó aktivitására a Cassini űrszonda vizsgálatai derítettek fényt. Már a Voyager-1 Szaturnusznál tett 1980-as látogatása alkalmával feltűnt a

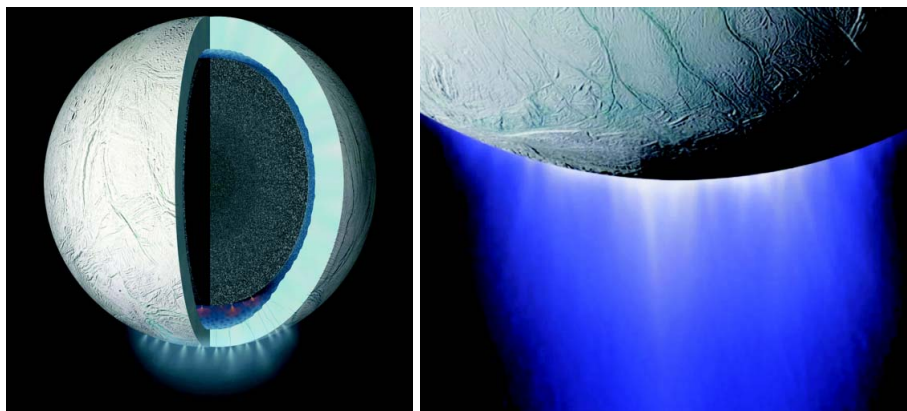
kutatóknak, hogy az Enceladus felszíne alig kráterezett, „fiatal”, bár ekkor a kiáramló vízgejzíreket még nem tudták megfigyelni. A jelenlegi feltételezések szerint az Enceladus felszíne alatti óceán globális is lehet, de a víztömeg nagyobb mennyiségben elsősorban a hold déli pólusának közelében összpontosul.

A másik Szaturnusz-hold, ahol érdemes a primordiális élet feltételei után kutatni, a Titan. A Titant kezdetől fogva a korai Földhöz hasonlították, és erre számos fizikai bizonyítékot találtunk. Például a felszínen zajló folyadékkörforgásban fő szerepet ellátó metán mellett a víz is megtalálható a Titanon, és a mérések arra utalnak, hogy a felszín alatt kiterjedt rétegekben raktározódik. Tehát a Titan esetében egybefüggő vízóceán valószínűleg nem lehet, azonban a fennálló fizikai és a kémiai feltételek mégis alkalmassá tehetik ezt a holdat is az élet bizonyos formáinak hordozására.

Enceladus

A Cassini űrmisszió egyik legnagyobb felfedezése volt az Enceladus jelenleg is megfigyelhető aktivitása. Az apró, mindössze 505 km átmérőjű holdat a Cassini keringőegység összesen 22 alkalommal közelítette meg.

Az Enceladus felszínén alig találhatunk becsapódási krátereket, ami arra utal, hogy a felszínt borító jégnek van utánpótlása. A déli pólus közelében található repedésekből folyamatosan áramlik az anyag, látványos gejzírek formájában tör fel a felszín alatti folyékony víz (8. ábra). Ez természetesen azonnal meg-

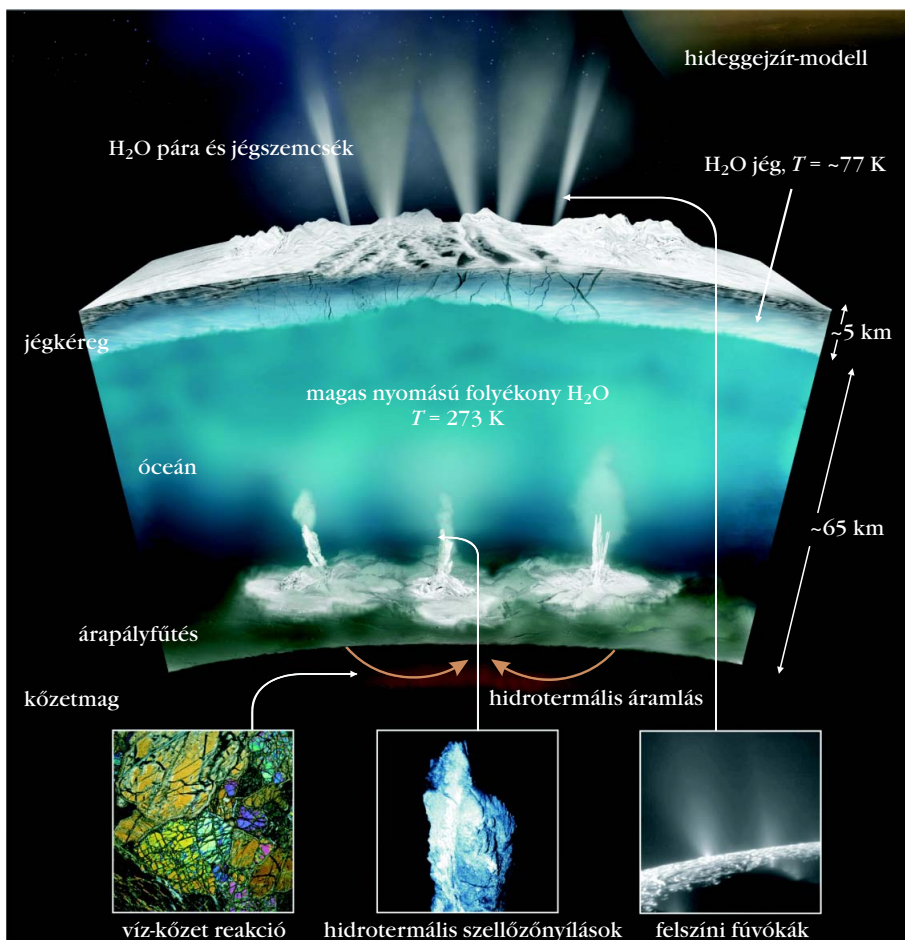


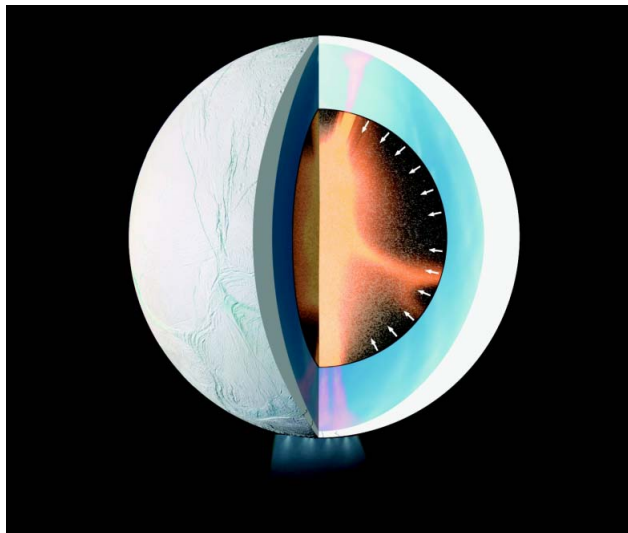
8. ábra. Az Enceladus feltételezett belső szerkezete, a déli pólus közelében észlelt gejzírekkel (forrás: NASA/JPL-Caltech).

fagy, és vagy eltávozik a hold környezetéből – létrehozva ezzel az E-gyűrűt –, vagy lerakódik a felszínen. A gejzírek összetételének vizsgálata során vízjég mellett CO_2 , metán és további gázok kiáramlása figyelhető meg [1]. Azonban a kilöködő jégzemcsék későbbi vizsgálata során 200 atomtömegegységnél nagyobb tömegű, komplex makromolekuláris vegyületek jelenlétére is fény derült [2].

Az Enceladus felszín alatti vízrétegének árapályfűtését az Enceladus és a Dione között fennálló 2:1-es pályarezonancia biztosítja. A jelenlegi mérések alap-

9. ábra. Az Enceladus óceánjának feltételezett struktúrája és fűtési mechanizmusa.





10. ábra. Anyag- és hőtranszport a nem megszilárdult kőzetmag modellje szerint.

ján azt feltételezzük, hogy az Enceladus óceánja helyenként az 50-60 km-es mélységet is elérheti (9. ábra), és a felszín érő hatásoktól egy ~5 km-es vastagságú jégkéreg védi. Az árapálysúrlódás az óceáni alapzat kürtőin keresztül hőt közöl a közel 0 °C-os vízzel, ennek következtében a víz nyomása is megnő, és a feláramló melegebb víztömeg végül utat tör magának, és a felszín repedései mentén kijut a hold felszínére és a Szaturnusz magnetoszférájának belsejébe. Természetesen azonnal meg is fagy, és mivel a kipermetezett jégzemcsék egy része visszahullik a felszínre, idővel elfedik a korábbi becsapódási kráterek nyomait. Ez a „hideg gejzír modell”.

További érdekességeket is megfigyeltek az Enceladussal kapcsolatosan. Ezek egyike azt sugallja, hogy a felszín alatti óceán talán mégsem globális, mint a Jupiter Europa holdjának esetében, hanem főként egy térségre, a déli pólus környezetére korlátozódik. Erre a pálya és a hold kismértékű „imbolygásából” következtettek, ami nagy valószínűséggel az aszimmetrikusan elterülő óceáni rétegre ható árapály következménye.

Ugyancsak kivételesen érdekes volt az E-gyűrű részletesebb vizsgálata, amely egyrészt igazolta, hogy a gyűrű valóban apró vízjégkristályokból áll, de eze-

ken kívül különös nanorészecskéket is detektáltak. A Cassini űrszonda mérései alapján ezek szilícium-dioxid nanokristályok voltak, amelyek tipikusan abban az esetben jönnek létre, amikor a folyékony víz és a szikla 90 °C feletti hőmérsékleten lép egymással kölcsönhatásba. A nanoszilika fagyás után mátrixszerűen beágyazódik a vízjégbe, majd kikerül a Szaturnusz magnetoszférájába. A magnetoszférában a sputtering effektus (amikor energikus atomok, ionok becsapódnak a jégporszemcsé felszínére, és onnan atomokat, molekulákat löknek ki) hatására a szemcsék mérete (tömege) idővel folyamatosan csökken. Ennek során a beágyazódott nanoszilika végül képes kiszakadni az erodálódó jégzemcsé belsejéből [3]. Mindezek tovább erősítik azt a feltevést, amely szerint az Enceladus jégpáncélja alatt valódi hidrotermális kürtők üzemelnek, amelyek a földi óceánok fenekén megfigyeltékhez hasonlóan melegen tartják a környező víztömegeket.

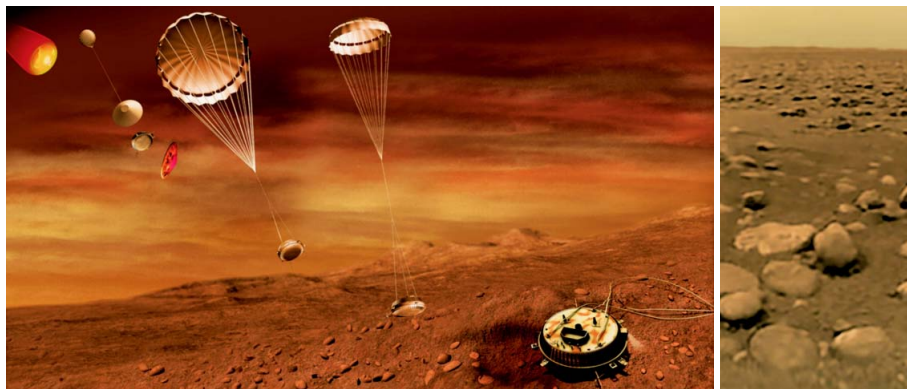
Az Enceladus vízrétegének melegen tartására az árapályfűtés mellett más mechanizmusokat is felvetettek. Ezek egyike a nem megszilárdult kőzetmag modellje (10. ábra), ugyanis a számítások szerint egy nem szilárd mag esetében az árapálysúrlódás sokkal több hőt termelhet, mint a korábban vázolt elmélet szerint. Ebben az esetben a hideg sós víz leszivárog a porózus kőzetmagba, ahol felmelegszik, majd keskeny pórusokon átjutva újra felemelkedik, és forró foltokat hoz létre az óceáni réteg aljzatán. A folyékony óceáni rétegen keresztül hő- és anyagtranszport zajlik a felszín irányába, ahol szintén lokalizált fűtés révén a jégkéreg helyenként megolvad, és a nagy nyomású, különféle ásványi anyagokat tartalmazó víz gejzírek formájában távozik.

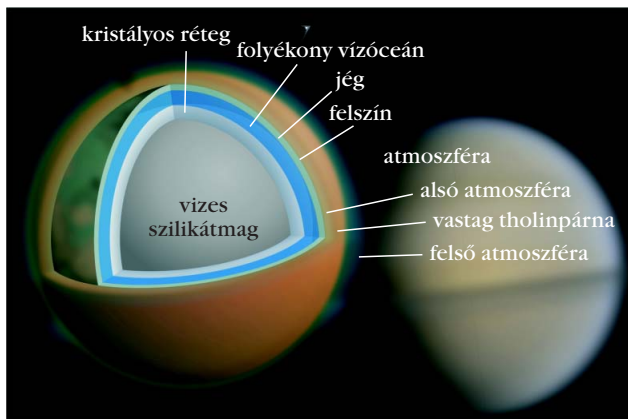
Titan

A Titan a Szaturnusz legnagyobb holdja, 5150 km átmérőjű, tehát az Enceladus méretének tízszerese, sőt nagyobb a Merkúr bolygónál is. A Titan mint égitest fele-fele arányban vízjégből és szilikátokból épül fel, valamint ez az egyetlen hold a Naprendszerben, amelynek sűrű atmoszférája van. A Titan már a Voyager-2 látogatása óta foglalkoztatta a kutatókat, mert akkor még

nem sikerült bepillantani a hold vastag, narancssárga atmoszférikus rétegei alá. 2004 nyarán a Cassini–Huygens szondapár már többek között fejlett radarberendezéssel, infravörös és egyéb hullámhossztartományokban működő kamerákkal és részecskedetektorokkal érkezett meg a Szaturnuszhoz, és a Titan vizsgálata az űrmisszió elsődleges tudományos céljai között szerepelt. A Cassini keringő egység az ott töltött 13 év alatt összesen 127 alkalommal közelítette meg a

11. ábra. A Huygens leszállóegység történelmi jelentőségű landolása a Titanon, valamint a Huygens által a leszállóhely közvetlen környezetéről készített fotó.





12. ábra. A Titan hold feltételezett belső felépítése és összetétele.

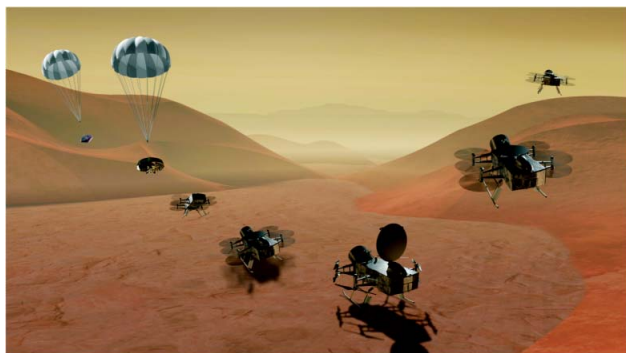
Titant, valamint 2005. január 14-én a Huygens leszállóegység sikeresen végrehajtott történelmi landolását a hold felszínén (11. ábra).

A Titan kiterjedt atmoszférája miatt megfigyelhetünk a holdon egyfajta évszakos ciklikusságot, valamint az atmoszférikus metán komplex körforgását (csapadék-képződés, tavak, folyók) is. Nem kizárt, hogy az élet lehetőségének több tényezője is jelen van a Titanon. A metán atmoszférikus cirkulációja mellett a felszínen kriovulkanizmusra (jégvulkánok jelenlétére) utaló jeleket is találtunk, ami arra utal, hogy a felszín alatt – ha nem is globálisan, de – lehetnek folyékony vizet tartalmazó rétegek. Elméletileg 50-100 km-es mélységben lehetnek kedvezők a feltételek ehhez.

A kőzetekből álló magot valószínűleg több rétegből álló, kristályos jég veszi körül (12. ábra). Elméletileg a Titan korai összehúzódásából visszamaradt belső hő még mindig elegendő lehet ahhoz, hogy a hold belsejében fenntartsion egy vízből és ammóniából álló, folyékony, magmaszerű keveréket. Ebben a közegben az ammónia jelenléte lehetővé teszi, hogy a víz rendkívül alacsony hőmérsékleten (akár $-97\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on) is folyékony maradjon.

Mindezeket konkrét űrszondás mérések is alátámasztják. A Cassini műszereivel az extrém alacsony frekvenciájú rádiótartományban végzett vizsgálatok alapján a Titan felszíne alatt réteges szerkezet képe rajzolódott ki. Mivel a hold közvetlen felszíne ezeket a rádióhullámokat nagyon gyengén veri vissza, valószínű-

13. ábra. A Dragonfly robothelikopter landolása és vizsgálódásai a Titanon (forrás: NASA).



síthető, hogy azok inkább a felszín alól, a folyékony és a fagyott tartomány határfelületéről verődtek vissza.

A Titan sok szempontból hasonlít korai Földünkre, és amellett, hogy különféle szerves vegyületekben rendkívül gazdag, még vizet, sőt reményeink szerint bizonyos tartományaiban folyékony vizet is tartalmaz, ezért előkelő helyre került Naprendszerünk azon égitestjei között, amelyek feltehetőleg alkalmasak lehetnek a primitív élet hordozására.

Dragonfly űrmisszió a Titanhoz

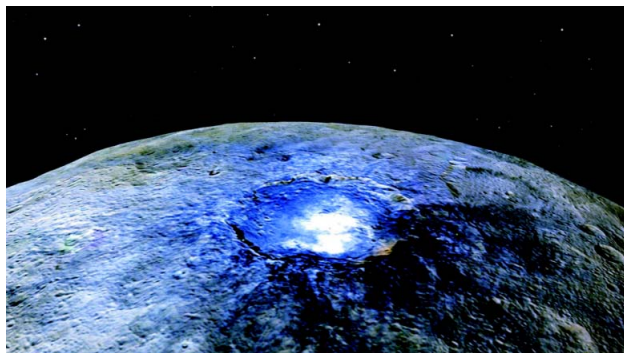
A Titanon feltételezett szerves élet feltételeinek felkutatására a NASA előreláthatólag 2026 áprilisában egy különleges, mobil űreszközt indít útjára. A Dragonfly missziót 2017-ben a Johns Hopkins Applied Physics Laboratory javasolta a NASA New Frontiers programjának keretében, ekkor az első két kiválasztott projekt egyike lett, jelenleg fejlesztés alatt áll. A Dragonfly (13. ábra) asztrobiológiai misszió egy propelleres leszállóegység, amely képes lesz navigálni, valamint különféle kijelölt célpontokat megközelíteni és megvizsgálni a hold felszínén. A propellerrel történő helyváltoztatás a Titan esetében ideális megoldás a hold sűrű atmoszférájában, valamint képessé teszi az űreszközt a függőleges fel- és leszállásra. A Titan az élet eredetének tanulmányozására kivételes helyszín.

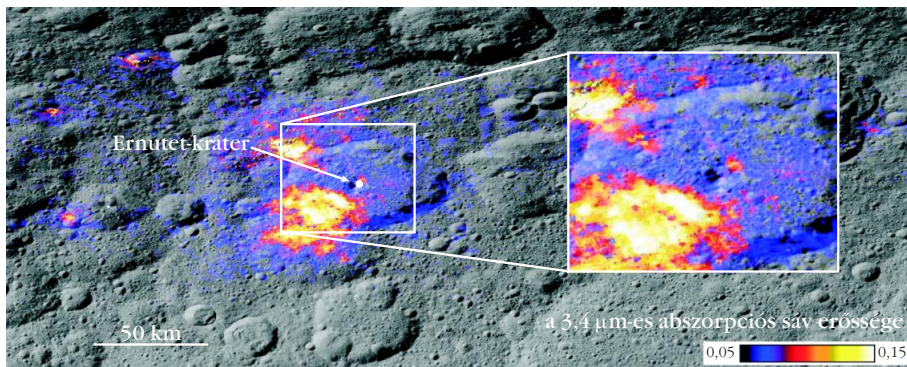
Egy különleges égitest, a Ceres

Végül megemlítünk egy különleges jelöltet a Mars és Jupiter között húzódó aszteroidaövből is. A NASA a Dawn missziót (2007–2018) két speciális égitest, a Vesta kisbolygó és a Ceres törpebolygó felkutatására fejlesztette ki. A Dawn 2015 márciusában állt pályára a Ceres körül (sugara 467,2 km). A 2006-ban a kisbolygók közül a törpebolygók közé átsorolt Ceresben egyesül a kisbolygóöv teljes tömegének ~35%-a.

A Ceres felszínén már nagyobb távolságból is megfigyelhető volt az Occator nevű becsapódási kráter aljzatán kirajzolódó két, a környezetéhez képes kiemelkedően nagy fényvisszaverő képességű folt (később kiderült, hogy az egyik inkább kisebb foltok csoportja) (14. ábra).

14. ábra. A Ceres törpebolygó szerves vegyületeket tartalmazó fehér foltjai (forrás: NASA).





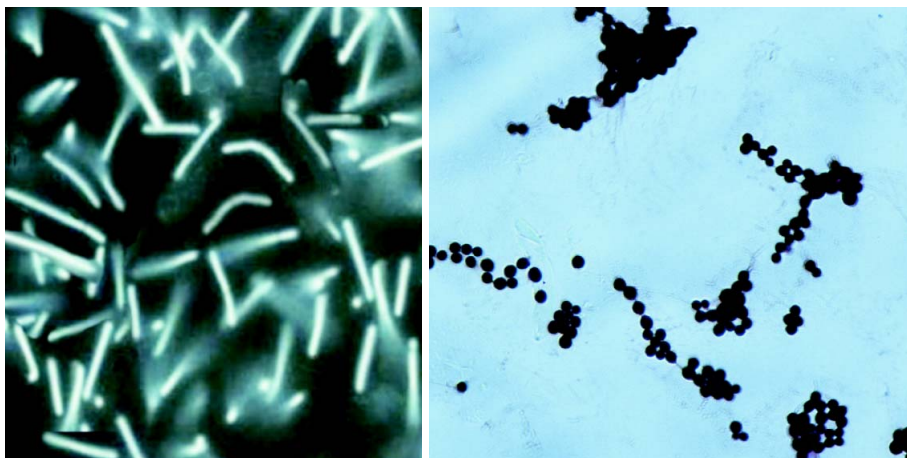
15. ábra. Szervesanyag-lerakódás a Ceres felszínén, az Ernutet-kráter környezetében (forrás: NASA).

A foltokat közelebről megvizsgálva úgy találták, hogy azok szénvegyületeket, valamint egyéb sólerakódásokat tartalmazhatnak. A sóösszetevő esetében leginkább a magnézium-szulfát tűnik jelentősnek, de a foltok kapcsolatba hozhatók egy ammóniában gazdag, agyagos jellegű talajszerkezettel is [4]. A kutatók szerint a fényes foltokra vonatkozóan a Ceres felszíne alól korábban feltört sóval telített, és a felszínre érkezést követően azonnal szublimált víz modellje a legelfogadhatóbb magyarázat, és a szublimációt követően csak a sólerakódás maradt hátra [5]. A fényes felületek közeli infravörös hullámhossztartományban végzett vizsgálatai nagy mennyiségű nátrium-karbonátra és kisebb mennyiségben ammónium-kloridra vagy ammónium-bikarbonátra utalnak, amelyek a szublimációt követően maradhattak vissza a felszínen.

2020 nyarán a NASA megerősítette, hogy az adatok elemzése során kapott részletes eredmények arra utalnak, hogy a Ceres vízben gazdag égitest, amelynek a felszín alatti mélyebb rétegeiben sóval telített víz található, ami különféle csatornákon keresztül (az Occator-kráter belsejében észleltékhez hasonlóan) helyenként a felszínre szivárog [6].

A Ceres felszínén az előbbieken tárgyalt felszíni sajátosságok mentén a Dawn űrszonda Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIR) műszerének adatait elemezve egy további érdekes területet találtak, ahol szerves anyag maradványait fedezték fel a törpe-

16. ábra. Extrém melegtűrő (hipertermofil) Archea (balra), valamint a csernobili atomreaktor falán felfedezett sugárzástűrő gombafaj (jobbra).



bolygó felszínén. A vöröses anyaglerakódás $\sim 1036 \text{ km}^2$ nagyságú területet fed le, az északi féltekén található Ernutet-kráter környezetében (15. ábra). A kutatók szerint a vöröses anyag magáról a Ceresről származik, eloszlása és környezete alapján nem valószínű, hogy meteorok vagy kisebb méretű aszteroidák becsapódása által került oda.

A Ceres tehát a mai napig aktív égitest, amelynek felszíne alatt különféle sókkal telített, ásványi és szerves anyagokban gazdag folyékony víz található, azaz a Ceresen is megtalálhatók az élet alkotóelemei.

Példák extrém körülmények között létező élőlényekre

A következőkben a teljesség igénye nélkül felsorolunk néhány extrém körülmények között is életképes organizmust, amelyekkel egyelőre csak bolygónkon találkoztunk, de talán az űrben folytatott mérések finomodásával Naprendszerünk más égitestjein is felfedezhetünk hozzájuk hasonlókat [7].

Egyrészt ismerünk olyan egysejtű, fotoszintetizáló zöld algákat, amelyek savas környezetben is életben maradnak (például *Dunaliella acidophila*, *Chlamydomonas acidophila*), de ide sorolható egy vörös algafaj is (*Cyanidium caldarium*), amely hőforrásokban él, és 2–4 pH-értékű tartományban képes szaporodni. Bizonyos lila és zöld cianobaktériumok (*Thiobacillus*, *Thermococcus archaea*) számára az optimális hőmérsékleti tartomány az 50–70 °C (termofilek), és elsősorban hőforrásokban, vagy a mélytengeri és óceáni hidrotermális kúrtók környezetében élnek (16. ábra). A hőmérsékleti skála másik oldalán helyezkednek el az extrém hidegtűrő élőlények (kriofilek), amelyek jelen vannak az alpesi és sarki jéggel borított ta-

lajban, jeges gleccserekben, és mélytengeri vizekben, továbbá az Antarktiszon is. Az antarktisi Voszto-tóban például több mint 3500-féle létformát találtak. Az óceánok mélyvizeiben élők nagy nyomást, a tengeri jégben élők nagy sókoncentrációt is tolerálnak. Az antarktisi száraz területeken élőknek pedig nagyon kicsi a víz- és tápanyagszükséglete. Megemlítendő a Mariana-árok legmélyén élő és szaporodó *Gromia sphaerica* amőbák is. A felsorolásnak ugyancsak kivételes tagja egy, a csernobili

atomerőműben, extrém magas radioaktív sugárzási környezetben a reaktor falán megtelepedett gombafaj (16. ábra). A gomba fekete színű, mivel nagy mennyiségű melanint termel, amivel a magas háttérsugárzás ellen védekezik. A különleges gombát a Nemzetközi Űrállomáson tanulmányozzák tovább.

Legvégül megemlítjük egy nemrégiben publikált kutatás eredményeit [8], amelyben kifejezetten egy, az Enceladus óceánjáról mostanáig kialakított modell ismeretében potenciálisan életképes mikroorganizmus vizsgálatára összpontosítottak. Ez a metanogén (oxigénmentes környezetben az anyagcsere-folyamatai révén metánt termelő) és az archeák (prokarióta egysejtűek) csoportjába tartozó *Methanothermococcus okinawensis*, amely anyagcseréje során a molekuláris hidrogént és a szén-dioxidot metánná konvertálja. Ezek közül mindegyik összetevő megtalálható az Enceladus gejzírjeiből kiáramló anyagban. Földünkön ezek az organizmusok a japán partok mentén található mélytengeri hidrotermális kúrtók közvetlen környezetében élnek. Az egysejtű vizsgálat kutatócsoport több metanogén szerkezetet is megvizsgált, de kísérleti körülmények között egyedül a *Methanococcus okinawensis* bizonyult túlélőnek, kiváltképp amikor az Enceladus gejzírjeiből kimutatott formaldehidet, szén-dioxidot és ammóniát is hozzáadták a mesterséges közegehez. Elméletileg tehát elég valószínű, hogy ha a jövőben *M. okinawensis*-t juttatnánk az Enceladus óceáni

kürtőinek közelébe, akkor ez a mikroorganizmus nagy valószínűséggel képes lenne ott megtelepedni.

Irodalom

1. J. H. Waite Jr, et al: Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and ^{40}Ar in the plume. *Nature* 460 (2009) 487–490.
2. F. Postberg, N. Khawaja, B. Abel, G. Choblet, C. R. Glein, M. S. Gudipati, B. L. Henderson, H.-W. Hsu, S. Kempf, F. Klenner, G. Moragas-Klostermeyer, B. Magee, L. Nölle, M. Perry, R. Reviol, J. Schmidt, R. Srama, F. Stolz, G. Tobie, M. Trierloff, J. H. Waite: Macromolecular organic compounds from the depths of Enceladus. *Nature* 558 (2018) 564–568.
3. H.-W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horányi, A. Juhász, N. Altobelli, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, S. Tachibana, S. Sirono, G. Moragas-Klostermeyer, R. Srama, Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. *Nature* 519 (2015) 207–210.
4. E. Landau: *New Clues to Ceres' Bright Spots and Origins*. NASA, 2015.
5. M. Neveu, S. J. Desch: Geochemistry, thermal evolution, and cryovolcanism on Ceres with a muddy ice mantle. *Geophys. Res. Lett.* 42/10, (2015) 197–206.
6. G. McCartney, G. Hautaluoma, A. Johnson: *Mystery Solved: Bright Areas on Ceres Come From Salty Water Below*. NASA, (2020)
7. Pálinkás G.: Túlélők kerestetnek! Élet extrém körülmények között. *Kémiai Panoráma* 2017/17
8. R.-S. Taubner, P. Pappenreiter, J. Zwicker, D. Smrzka, C. Pruckner, P. Kolar, S. Bernacchi, A. H. Seifert, A. Krajete, W. Bach, J. Peckmann, C. Paulik, M. G. Firneis, C. Schleper, S. K.-M. R. Rittmann: Biological methane production under putative Enceladus-like conditions *Nature Communications* 9 (2018) Article number: 748.