

ELTE TTK Fizikai Intézet Kari TDK dolgozat

**A felszín alatti vízréteg jelenlétének
vizsgálata és asztrobiológiai vonatkozásai az
Europa és az Enceladus holdakon**

Szerző: Keszthelyi Zsolt, Fizika BSc, IV.

Témavezető: Dr. Kereszturi Ákos, MTA
Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont,
tud. munkatárs

Budapest, 2012

Kivonat

Az 1970-es években Carl Sagan volt az, aki elsőként adott hangot annak, hogy a Jupiter körül keringő Europa felszíne alatt, ha létezik egy óceán, akkor abban élőlények is előfordulhatnak. Azóta is az Europa az asztrobiológiai kutatások egyik fő célpontja a Naprendszeren belül. Az Europa felszínét jég fedi, de feltehetően víz-óceán húzódik alatta, melyet a hold belső energiával lát el (geotermikus hő, árapály fűtés). Az Enceladus, mely a Szaturnusz körül kering, aktív anyagkibocsátásával hívta fel magára a figyelmet. Az elméleti modellek arra engednek következtetni, hogy felszíne alatt szintén folyékony vízkészlettel rendelkezhet. A felszín alatt feltételezett vizes környezet mind az Europa, mind az Enceladus esetében érdekessé teszi a holdakat az asztrobiológia számára, lévén, hogy i) egyes elméletek szerint a földi élet is az óceánok mélyén kezdődhetett, és ii) a legújabb földi tengerfenéki kutatások a napfény teljes hiányában is igen gazdag élővilágról számolnak be. Az Europa esetében egy szimplifikált nyomásbecslés készült, mely a dolgozatban egy táblázat formájában kerül összefoglalásra. Ez a számítás jó egyezést mutat az irodalomban talált adatokkal, továbbá hasonló nagyságrendbe esik, mint a Föld óceánjaiban tapasztalható értékek. Az Europa óceánjának mélyére számolt nyomás értéke 105000 kPa és 240200 kPa közé esik. A dolgozat célja a szakirodalmi adatok és a becsült nyomásértékek által következtetéseket levonni a jeges holdak felszín alatti fizikai paramétereiről és életfeltételeiről.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Europa	5
2.1. A felszín	6
2.2. A feltételezett vízóceán	7
2.3. Nyomásbecslés az Europa óceánjára	8
2.4. Asztrobiológiai vonatkozások	10
3. Enceladus	12
3.1. A felszín és a kifúvások	13
3.2. A feltételezett vízkészlet	15
3.3. Asztrobiológiai vonatkozások	16
4. Vosztok-tó	17
5. Diskusszió	19
6. Konklúzió	21
Köszönetnyilvánítás	21
Hivatkozások	22

1. Bevezetés

A földön kívüli élet lehetőségének vizsgálata esetén egy jelentős kiválasztási effektussal küzdünk: egyetlen egy példát ismerünk. A földi bioszféra azt sugallja, hogy az élet kialakulásához és fenntartásához elengedhetetlen i) valamilyen energiaforrás ii) egy közvetítő közeg, ahol reakciók játszódhatnak le, és iii) szerves anyagok jelenléte. A földi közvetítő közeg a víz, és noha elképzelhető más anyag is (pl. metán), jelen munkában a víz jelenléte kerül fókuszba. Le kell szögezni azonban, hogy a folyékony vízkészlettel való rendelkezés önmagában nem elegendő, az általunk ismert élethez feltétlenül szükséges i) és iii) teljesülése is - illetve még kevésbé ismert paraméterek/tulajdonságok is közrejátszhatnak.

A Jupiter körül keringő egyik Galilei hold, az Europa, nagy valószínűséggel víz-óceánt rejt a felszíne alatt, melynek jelenlétére magnetométer-vizsgálatok is utalnak (Anderson et al., 1998, Khurana et al., 1998, Showman and Malhotra, 1999). Az általánosan becsült érték ennek az óceánnak a mélységére 100 km. Természetesen ez függ a felette elhelyezkedő jégpáncél vastagságától is, melyet átlagosan 20-30 kilométerre becsülnék. Ezeknek a paramétereknek az ismeretében szimplifikált nyomásbecslés végezhető. Ugyanakkor a víz kémiai összetétele, sűrűsége nem ismert, ezekben az esetekben kénytelenek vagyunk elméleti modellekre, hipotézisekre szorítkozni.

A Szaturnusz rendszerében keringő Enceladus holdat a pre-Cassini érában a Voyager szondák vették szemügyre, de az igazi áttörést a Cassini szonda felvételei és mérései hozták meg. Ezek alapján egyértelmű, hogy a hold valamilyen belső energiaforrással rendelkezik, mely ahhoz vezet, hogy az Enceladus kitöréseket produkál. Ezek a kitörések főleg vízgőzt tartalmaznak, de már szén-dioxidot is kimutattak benne (Hansen et al., 2006, Waite et al., 2006). A kitörések forrása még nem ismert, azonban néhány modell már született, hogy megmagyarázza és leírja miként történhet ez a megfigyelt mechanizmus. Feltehetően létezik egy folyékony vízkészlet az Enceladus belsejében, mely táplálja ezeket a kifúvásokat.

A "jeges holdak" megismeréséhez közelebb vezethet a jelenleg legalkalmasabbnak tűnő földi analógia: a Vosztok-tó. Elképzelhető, hogy az Europa és az Enceladus rendelkezik az általunk ismert élethez szükséges feltételekkel, vagyis folyékony víz, belső energiatranszport, és szerves anyagok is jelen lehetnek. Ezek kombinációja érdekessé teszi őket az asztrobiológiai kutatások számára. Számos olyan extremofil (vagyis szélsőségeket kedvelő, tűrő) élőlény fordul elő a Földön, amely kedvező esetben talán ezeken a holdakon is megélne. Az extremofileknek néhány releváns fajtája kerül említésre a dolgozatban: a hőtűrők (termofilek), a nyomástűrők (piezofilek), a sugárzástűrők (radiofilek), és a sótűrők (halofilek).

2. Europa

A Jupiter körül keringő Europa hold mióta megjelent a Voyager szondák képein (1977-79) már az asztrobiológiai érdeklődés (akkor még bioasztronómia, vagy exobiológia) egyik fókuszába került. Ennek oka, hogy a holdon felszín alatti vízóceán létére utaló jelek vannak, feltehetően belső energiaforrással is rendelkezik, és szerves anyagok is jelen lehetnek. Ezek összessége eddigi ismereteink szerint kedvező feltételeket teremthet az élet kialakulásához és fejlődéséhez.

A Galileo űrszonda (1995-2003 között keringett a Jupiter rendszerében, majd befejezve pályafutását elégett az óriásbolygó légkörében) az Európához eddig legközelebb került berendezés (legkisebb távolságú megközelítése során 200 km-re haladt el az Europa mellett). A szonda egyik legfontosabb műszere a közeli infravörös tartományban működő spektrométer (Near-Infrared Mapping Spectrometer, NIMS) volt, melynek segítségével sikerült feltérképezni az Europa felszínét.

Felfedező, felfedezés éve	Galileo Galilei, 1610
Sugár	1560 km
Tömeg	$4,79 \cdot 10^{22}$ kg
Excentricitás	0,009
Átl. távolsága a Jupitertől	671 100 km
Felszín anyaga	vízjég
Felszíni nehézségi gyorsulás	$1,314 \text{ m/s}^2$
Keringési idő	3,55118 nap
Szökési sebesség	2025 m/s

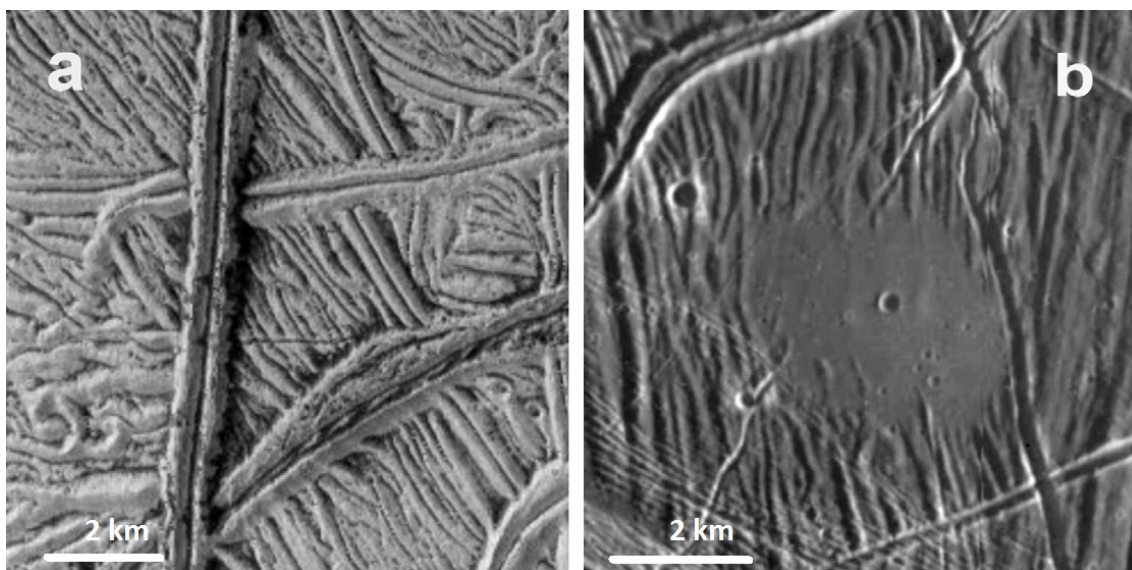
1. táblázat. Az Europa fontosabb paraméterei

2.1. A felszín

Az Európát összefüggő jégpáncél fedi, és a felszínen különböző alakzatok különíthetők el, úgy mint káosz-területek, ún. lentikulák, repedések, dómok. A felszínformák akár információval szolgálhatnak a jég alatti folyamatokról is, vagy a jégréteg vastagságáról, illetve asztrobiológiai vonatkozásairól (Keszthelyi, 2012). A jégpáncél vastagságát két eltérő modell írja le, míg az egyik szerint a jégréteg vékony, néhány km-es mindössze, addig a vastag jégpáncél modelljében több tíz kilométerre becsülik (Schenk, 2002, Schilling et al., 2004). A jelenleg legvalószínűbb elképzelés az, hogy globálisan vastag lehet a jégréteg (20-30 km), de lokálisan a káosz-területek alatt időszakosan vékony, 2 km-es lehet (Kereszturi, 2002). A vékony jégréteg modellje szerint a hold belsejéből érkező fűtés csak konduktív módon (hővezetéssel) valósul meg a jégrétegben, ezzel szemben a vastag jégréteg modellje szerint a hőtranszport mind konduktív, mind konvektív módon (hőáramlással) zajlik.

A hold felszíne geológiai értelemben fiatalnak tekinthető, 50-60 millió éves lehet mindössze (Zahnle et al., 2008). Emellett a nagyobb becsapódásos kráterek meglepő módon nem elég mélyek az átmérőjükhöz képest. Ez arra enged következtetni, hogy a jégréteg mozgásba jöhet, a kráterek visszaemelkedhettek, így a felszín viszonylag sima maradt – ahogy azt ma látjuk. Az összefüggő jégrétegen azonban érdekes repedések, törések figyelhetők meg, melyek több kilométer hosszan húzódnak. Ezek minden bizonnyal a felszín alatt zajló folyamatok eredményei: hőáramlás vagy (mechanikai) feszültség okozhatja. A Galileo szonda mérései alapján a jégpáncél felszíni hőmérséklete 100 – 110 K körüli.

Az Europa felszínén sötétebb területek is láthatók, jellemzően vöröses elszíneződések figyelhetők meg, melyek egyrészt az Io-ról származó kén lerakódása révén keletkezhetnek, másrészt a Jupiter magnetoszférájából érkező részecskék által, melyek a jégben okozhatnak kémiai reakciókat. Illetve esetlegesen az óceánból is juthat "szennyező anyag" a felszínre. A Galileo NIMS által felvett spektrum hasonló a laboratóriumban felvett magnézium-szulfát és nátrium-szulfát sós vízzel való oldatának színeképehez (Orlando et al., 2005), a legjobb egyezést pedig egyértelműen a hidratált szulfátok (62%) és hidratált sók (37%) közös elegye mutatta. Ha valóban az óceánból is kerül a felszínre szennyező anyag, akkor az alátámasztja azt az elképzelést, hogy az óceánban rendelkezésre állhat olyan kémiai diverzitás, mely adott esetben élőlények metabolikus funkcióit segítheti elő.



1. ábra. Az a) és b) kép a Galileo 12., illetve 4. megközelítése során készült nagy felbontással, mely megközelítőleg 26 m/pixel. Az a) felvétel több különböző korú repedést mutat, a legfiatalabb a kép közepétől balra, az egész képet átszelő dupla törésvonal. Ez a törés átszeli a többi, ezáltal még komplexebb felszíni struktúrát hoz létre. A repedések szélén sötétebb területek figyelhetők meg. Az idősebb repedések ugyanakkor világosabbak, mint a fiatalak. A b) felvétel háttérében szintén törésvonalak húzódnak, azonban a kép közepén egy olyan nagyjából 3 km átmérőjű terület látható, amely akár kriovulkanizmus (vagy ahhoz hasonló folyamat) eredményeképpen is keletkezhetett. (NASA, JPL)

2.2. A feltételezett vízóceán

Az óceán jelenlétére indirekt bizonyítékok utalnak. Az egyik legerősebb érv a Galilei szonda által mért roppant gyorsan változó mágneses tér a hold körül. Ennek oka feltételezhetően az, hogy az óceánban lévő sók keverednek, és mintegy elektrolit oldat gyanánt mágneses teret keltenek. Az óceán mélysége ilyen módon 100 kilométerre becsülhető (Anderson et al., 1998, Khurana et al., 1998, Showman and Malhotra, 1999). Ugyanakkor az is feltételezhető, hogy a hold belső energiaforrással rendelkezik. A káosz területeknél megfigyelt mátrixok a jég felszínén jól elkülöníthető alakzatok, és jelenlétük indikál egy felszín alatt húzódó vízréteget.

Továbbá a Jupiter ár-ápály hatása is formálja a felszíni jégréteget. Ez azért is érdekes, mert az Europa kötött keringésű hold (akárcsak a Föld Holdja). Mindazonáltal, az Europa két féltékéje között még nem mutattak ki jelentős asszimmetriára utaló jeleket, holott a Jupiter felé mutató oldal egész biztosan nagyobb deformációnak van kitéve. Mindemellett, a Jupiter felé mutató oldal extrém besugárzásnak is ki van téve, az óriáshold magnetoszférája által gyorsított részecskék nagy számban érkehetnek az Europa felszínére. Azonban ez a besugárzás csak centiméteres

nagyságrendben hatolhat a jég rétegbe, tehát a felszín alatt húzódó óceán esetleges életfeltételeire nincs hatással.

A víz a maximális sűrűségét $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on éri el 1 bar (101 kPa) nyomáson. Ellenben 27 MPa felett már a fagypontra maximális a sűrűsége. Mint a szimplifikált nyomásbecslés rámutat (2.3) ekkora nyomásérték nagy valószínűséggel előfordulhat az Europa óceánjában. Ez azt is jelentheti, hogy az Europa óceánja érdekes rétegződést mutathat a hőmérséklet szerint. Akárhogy is, a modellszámítások mellett kiemelkedően fontos szerepe lenne az *in situ* méréseknek, melyhez egy kriobottal rendelkező misszió nyújthat segítséget. Ennek hiányában mindössze megfontolt becslésekkel és feltételezésekkel élhetünk az óceán fizikai-kémiai paramétereit illetően. A hold sugarának ismeretében és az óceán mélységének feltételezésével megbecsülhető az, hogy mekkora az Europa holdon lévő folyékony vízréteg összterfogata. Ebből az adódik, hogy az Europa óceánjának terfogata hasonló nagyságrendbe esik, mint a Földön lévő összes folyékony víz terfogata (melyet általában $1,5 - 2 \cdot 10^9\text{ m}^3$ -re becsülnék), esetleg 2-szer, 3-szor annyi is lehet.

2.3. Nyomásbecslés az Europa óceánjára

Arkhimédész törvényét felhasználva,

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

egyszerű számolással lehet becsléseket végezni az Europa hold óceánjában uralkodó nyomásról (Kereszturi, Keszthelyi, 2012). Ezt két specifikus helyen érdemes megvizsgálni: közvetlenül a jég réteg alatt, és az óceán alján. A számoláshoz két szélsőérték használható, az egyik modellben tiszta víz szerepel, míg a másikban feltehetően már túlzottan magas sótartalmú vizes oldat. Kémiai megfontolások alapján a magas sótartalmú víz esetén 15 % MgSO_4 koncentráció feltételezhető. A magnézium-szulfát jelenlétére felszíni spektroszkópiai mérések utalnak (Dalton et al., 2005, Prieto-Ballesteros et al., 2005). A megfelelő szélsőértékek közötti intervallum biztosan tartalmazza a tényleges nyomást a megfelelő helyeken. A becsléshez a víz- és a jég réteg vastagsága is két szélsőértékkel, és egy átlagosan használt értékkel jellemezhető. Konkrétan 2 – 40 km (átlagosan 25 km) a jégpáncél vastagságára, míg a folyékony vízrétegre 80 – 170 km (átlagosan 100 km). Ugyanakkor ezek az adatok is becslött értékek, de feltételezhetően a szélsőértékek közül helyezkedik el a valós érték is.

Fontos megemlíteni, hogy az óceán mélyén számolt nyomáshoz a vízoszlop súlya mellett még hozzáadódik a jég réteg súlyából adódó nyomás is. Azonban ez külön nincs a 2. táblázatban feltüntetve, mert a sok becsült érték mellett kaotikusan sok nyomásérték születne, ha az óceánmélységhez külön minden jégvastagságot is megvizsgálnánk. Ezért a nyomásértékek a jégpáncél nyomását, és magának az óceánnak jég réteg nélkül vett nyomását tartalmazzák.

A sűrűség adatok közül a tiszta víz és jég értékei: 1000 kg/m^3 és 917 kg/m^3 , míg a szilárd MgSO_4 esetén 2660 kg/m^3 , a folyékony halmazállapotú magnézium szulfátnál pedig 1500 kg/m^3 értékekkel lehet számolni. A holdon a nehézségi gyorsulás értéke $1,314 \text{ m/s}^2$.

a jég réteg vastagsága [km]	az óceán mélysége [km]	nyomás tiszta víz esetén a jég réteg alatt / az óceán mélyén [kPa]	nyomás sós víz esetén a jég réteg alatt / az óceán mélyén [kPa]
2	80	2409 / 105120	3096 / 113004
25	100	30123 / 131400	38712 / 141255
40	170	48197 / 223380	61939 / 240134

2. táblázat. Az Europa óceánjára számolt nyomás

A 2. táblázatban szereplő nyomásértékek jó egyezést mutatnak az irodalomban található becslésekkel. Hussmann és munkatársai (2006) a termális energiatranszportot modellezve az Europa esetében 205 MPa-os nyomást feltételeznek az óceán mélyére, míg Melosh et al. (2003) hőmérséklet-mélység-nyomás modellje szintén konzisztens, a felszíntől a mag felé haladva 30 km-t a lineárisan változó nyomás 40 000 kPa-ig terjedhet.

Szumházva, a számolás eredményeképp az Europa óceánja mélyén lévő nyomás 105 120 kPa-tól 240 134 kPa-ig terjedhet, míg közvetlenül a jég réteg alatt 2 409 kPa-tól 61 939 kPa-ig.

2.4. Asztrobiológiai vonatkozások

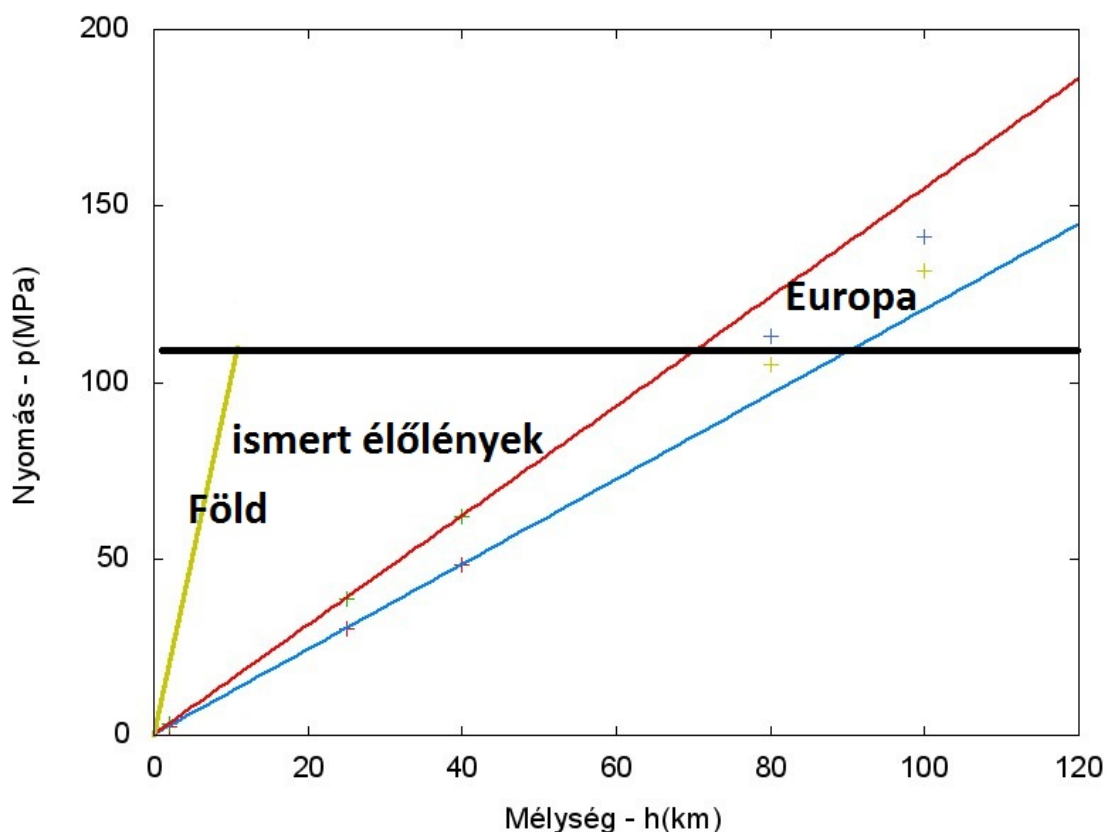
A Föld felszínén az átlagos nyomásérték 101 kPa, a legmélyebb tengerfenéken (Mariana-árok) körülbelül ennek ezerszerese (101 MPa). A földi tengerekben és óceánokban a hidrosztatikus nyomás jó közelítéssel 10 méterenként 1 barral (101 kPa) emelkedik. Természetesen a légkörnek ebben szignifikáns szerepe van, a levegőoszlop súlya hozzáadódik a vízoszlopéhoz. Az Európán nagyon ritka, főleg molekuláris oxigénből álló atmoszféra létezik (10^{-6} Pa), így ez elhanyagolható a nyomás számolásánál.

A 2. ábráról jól látható, hogy az Európán, ha létezik óceán, akkor jó eséllyel hasonló nagyságrendbe esik a mélyén lévő nyomás, mint a Föld legmélyebb pontjain. A kérdés az, hogy létezhet-e bármilyen életforma ilyen körülmények között.

Számos földi példa mutatja, hogy szélsőséges körülmények között is előfordulnak extremofil élőlények. Ezek főleg apró baktériumok, melyek adoptálódtak olyan, számunkra meghökkentő életfeltételekhez, mint a szélsőséges hőmérséklet, nyomás, sótartalom, vagy egyszerűen csak a napfény teljes hiánya – esetleg ezek kombinációja. Az extremofilek rendkívül változatosak, és egyes elképzelések szerint az első földi életformák is extremofilek voltak.

A legnagyobb esélyük valószínűleg a halofileknek lenne, ezek a fajta extremofilek ugyanis rendkívül ellenállóak. Például, a *Halomonas salaria* kifejezetten magas nyomáson (102 000 kPa) képes csak élni (Kim et al., 2007), míg a *Halobacterium sodomense* magas koncentrációjú magnézium-szulfát oldatban is fejlődik (Hand & Chyba, 2007). A piezofilek (nyomástűrők, másnéven barofilek) a tengerfenéken aktív élővilág megfelelő analógiájaként szolgálhatnak, ezek az élőlények ugyanis a földi mélytengerek legmagasabb nyomásértékeit is elviselik. Ezen felül laboratóriumi kísérletek bizonyították, hogy például az *Escherichia coli* mesterségesen előállított $\approx$ 1000 MPa nyomásértéken is életképes (Vanlint et al., 2011).

A legújabb riportok arról számolnak be, hogy a Mariana ároknál 10 896 méteres mélységben (vagyis megközelítőleg 109 686 kPa nyomáson) is élnek egyszerű életformák, amőbák (Gooday et al., 2008, 2011). Ezek a foraminiferák törzsébe sorolható eukarióták a jelenleg ismert legnagyobb egyedüli sejtű organizmusok, melyek amellett, hogy nagy mélységben, nagy nyomáson, alacsony hőmérsékleten, a napfény teljes hiányában élnek, még a magas nehézfém koncentrációt is jól bírják. Több tucat faj tartozik ebbe a törzsbe, és ugyan eleinte 6000-7000 méteres mélységben detektálták jelenlétüket, egyre mélyebbre haladva a Challenger Deep területen is sikerült kimutatni ezeknek az élőlényeknek az aktivitását. Elméletileg ilyen élőlények talán meg tudnának élni az Europa óceánjában is.



2. ábra. A földi óceánokban a nyomás 10 méterenként 101 kPa-al növekszik. Az egyenes illesztéshez a kezdő és a végpont lett felhasználva, 0 (km) : 0 (MPa) és 10,896 (km) : 109,686 (MPa). A földi óceánok nyomás-mélység görbáját a zöld egyenes jelzi. Az Europa esetében két variáció került ábrázolásra. Az egyik esetben az óceán vizének kemizmusa leegyszerűsített, tiszta vízzel került számításba (kék egyenes). A másik esetben szintén kémiai (és felszíni megfigyelésekből nyert) megfontolások alapján 15 %-os MgSO_4 oldat és víz keveréke adja az óceán összetételét jellemző sűrűséget (piros egyenes). Az Europa óceánjában uralkodó nyomás tehát a piros és kék egyenes közötti részben helyezkedik el, mivel szélsőértékeket vettünk számításba. Az egyenes illesztéshez az első három pont került felhasználásra, révén az óceán mélyére számolt nyomás a bizonytalanságok miatt nem tartalmazza a jégpáncél súlyából adódó nyomást. Az ábra és az egyenesek illesztése a *gnuplot* program segítségével készült, a 2. táblázat adatait felhasználva. A fekete egyenes jelzi azt a határvonalat, ahol természetes körülmények között megfigyeltek már élőlényeket a Földön. Ugyanakkor, földi laboratóriumi kísérletek szerint (vagyis mesterségesen előállított nyomáson) ennél magasabb nyomást is kibírnak piezofil organizmusok.

A Jupiter magnetoszférája rendkívüli besugárzásnak teszi ki a holdjait, így az Europa felszínén aligha lehetne életformák megjelenését várni. Viszont fontos megemlíteni, hogy az extremofil élőlényeknek létezik egy speciális fajtája: a sugárzástűrők (radiofilek). Ezek közül híres példa a *Deinococcus radiodurans*, melyet többek

között atomreaktorokban és sivatagokban is találtak, és a világűrben is teszteltek. A *D. radiodurans* ugyanis képes arra, hogy a sugárzás által szétroncsolt DNS-t helyreállítsa. Így, ha nem is áll potenciálisan keresésünk céljában, még elvi lehetőségek fennállnak, hogy sugárzástűrő baktériumokat akár a jégrétegben találjunk.

3. Enceladus

A Szaturnusz körül keringő Enceladus egy olyan hold, amely asztrobiológiai szempontból érdekes tulajdonságokkal bír. Erre utal az a feltételezett vízkészlet a felszíne alatt, ahol akár szélsőséges tűrőképességű mikroorganizmusok is előfordulhatnak. Megtévesztő lehet, de ezt a vízkészletet egyaránt illetik óceán és tenger elnevezéssel is. Ennek oka, hogy a folyékony víz nem biztos, hogy globális rétegben található a holdon - lehet, hogy csak déli pólus környékén létezik a jég alatt. Emellett fontos az is, hogy a hold geológiailag aktív, és földi gejzírekhez hasonló kinézetű kitöréseket produkál (Porco et al., 2006). Ugyanakkor le kell szögezni, hogy a gejzírkitörés földi fogalom, és az Enceladus holdon megfigyelt kitörés egy új és másféle jelenség, forrása még nem ismert. Az viszont igazolást nyert, hogy a kifúvások az úgynevezett tigriskarmolásokon keresztül hagyják el a hold felszínét.

Felfedező, felfedezés éve	William Herschel, 1789
Sugár	252 km
Tömeg	$1,08 \cdot 10^{20}$ kg
Excentricitás	0,0047
Átl. távolsága a Szaturnusztól	238,020 km
Felszín anyaga	vízzég
Felszíni nehézségi gyorsulás	$0,11 \text{ m/s}^2$
Keringési idő	1,37022 nap
Szökési sebesség	240 m/s

3. táblázat. Az Enceladus fontosabb paraméterei

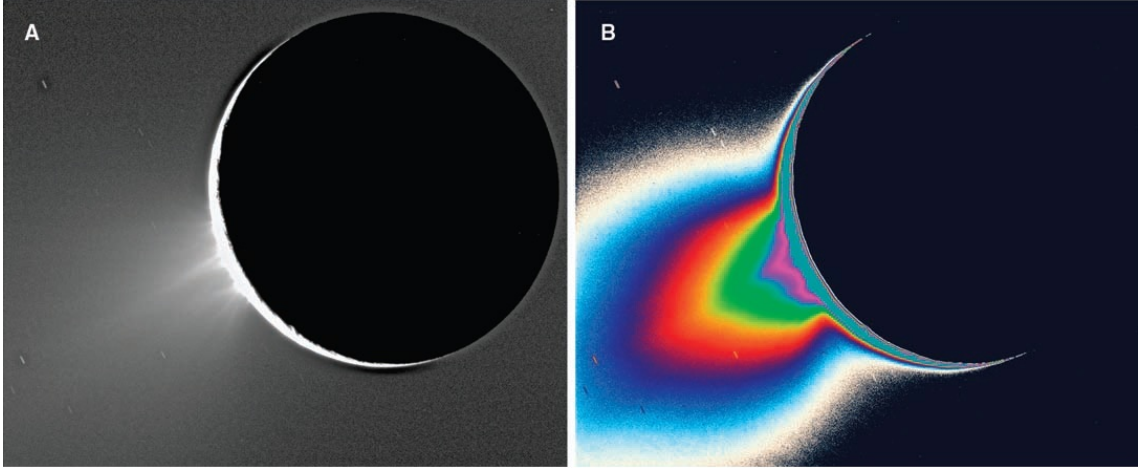
Az Enceladus holdon négy egymással közel párhuzamos törésvonal húzódik 130 km hosszan, melyek alig 2-3 km szélesek, ezek a tigriskarmolások (*Alexandria Sulcus*, *Cairo Sulcus*, *Baghdad Sulcus*, *Damascus Sulcus*). Az Enceladus részletes feltárását a Cassini szonda kezdte meg, mely 2004 óta kering a Szaturnusz rendszerében. Amellett, hogy a Cassini leszállóegységet juttatott a Titan holdra (Huygens), az Enceladust is közlelről szemügyre vette, legkisebb távolságú megközelítése mindössze 25 km volt.

3.1. A felszín és a kifúvások

Az Enceladus két féltékéje jelentősen különbözik egymástól, ugyanis míg a délit úgynevezett tigriskarmolások szelik át, és anyagkiáramlás (geológiai aktivitás) jellemzi, addig az északi részén a becsapódásos kráterek jelzik a múltbeli események nyomait. A déli pólus környékén azonban szinte egyáltalán nem figyelhetők meg becsapódásos kráterek, a felszín tehát sokkal idősebb az északi félgömbön. Egyelőre tisztázatlan, hogy hogyan alakulhat ki ilyen aszimmetria egy égitesten, és hogy ennek mi lehet az oka. (Feltehetően az égitest kis mérete közrejátszik.) Az eltérés viszont az Enceladus lapultságán is meglátszik, a modellek szerint a déli térség deformálódott, és sokkal kevésbé követi a gömbformát, mint az északi. Ennek feltételezhetően az az oka, hogy a belső hőtranszport és az anyagkiáramlás miatt megolvadt a jégréteg, ami egyrészt egy folyékony vízréteg kialakulásához vezetett, másrészt a felszín besüllyedt, ellaposodott.

A kiáramló gáz részletes vizsgálatából - a Cassini UVIS (Ultraviolet Imaging Spectrometer) és INMS (Ion and Neutral Mass Spectrometer) műszerei által (Hansen et al., 2006; Waite et al., 2006) - kiderült, hogy a 90% vízgőz mellett 10%-ban más gázok is jelen vannak, melynek nagy része CO_2 . A Cassini CDA (Cosmic Dust Analyzer) *in situ* mérése azt mutatja, hogy a kifúvódó jégrészecskék között nyomokban nátrium, kálium, illetve sók is előfordulnak, sőt legújabban nagyon kis mennyiségű szilíciumot is detektáltak (Hsu et al., 2010). Egyes kutatók feltételezései szerint az Enceladus felszín alatti vízkészletében ammónia (NH_3) lehet jelen, ez ugyanis drasztikusan csökkentheti a víz fagyáspontját, ami így nem $0\text{ }^\circ\text{C}$, hanem $-100\text{ }^\circ\text{C}$ is lehet. Ez egyben megmagyarázhatná azt is, hogy a kifúvásokban megfigyelt nátrium (N_2) honnan származik. A hold emissziójáról továbbá sikerült megállapítani, hogy a részecskék kiáramlási aránya 150-300 kg/s (Hansen et al., 2011). (Ez nagyjából megegyezik a Yellowstone Nemzeti Park Old Faithful nevű gejzírjének az anyagkiáramlásával.)

A kifúvás relatíve stabil maradt 18 hónapon keresztül, tehát az emisszió többé-kevésbé egyenletes ütemben zajlik. Ugyanakkor a számítások szerint ez azt jelenti, hogy az Enceladus anyagkibocsátása nem történhet a keletkezése óta, mert akkor már nem állna elég anyag a rendelkezésére.



3. ábra. A két képen az Enceladus éppen kitakarja a Napot, amint a Cassini űrszonda lefényképezi (ISS NAC). Jól megfigyelhető, hogy a napfény szóródik a hold déli pólusából kiáramló részecskéken. Ezek a részecskék fontos információkat hordoznak, ugyanis a hold belsejéből származnak, így vizsgálatukból következtetni lehet a felszín alatti folyamatokra is. Az *A* kép 2005.11.27-én készült, megközelítőleg 0,89 km/pixel-es felbontással. A *B* kép az előző hamisszínes változata, amelyen több részlet válik láthatóvá, így a kifúvás tulajdonságai is jellemezhetők, mint a szemcseméret vagy a részecskeszám. (Porco et al., 2006)

Érdekesség, hogy a kiáramló részecskék sok esetben a Szaturnusz E gyűrűjét táplálják, ha elég nagy sebességre tesznek szert, vagyis meghaladják a szökési sebességet:

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \approx 240 \text{ m/s} \quad (2)$$

Amennyiben sebességük ennél kisebb, visszahullanak a felszínre. A Cassini VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer) már detektált is kis mennyiségű felszíni széndioxidot a tigriskarmolások közelében (Brown et al., 2006), mely nagy valószínűséggel a hold belsejéből származik. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a tektonikus jelenségek mellett a visszahulló részecskék is felszíninformáló szereppel bírnak. Így részleges magyarázatot kapunk arra a kérdésre, hogy miért látjuk ilyen fiatalnak az Enceladus felszínét a déli félgömbön.

3.2. A feltételezett vízkészlet

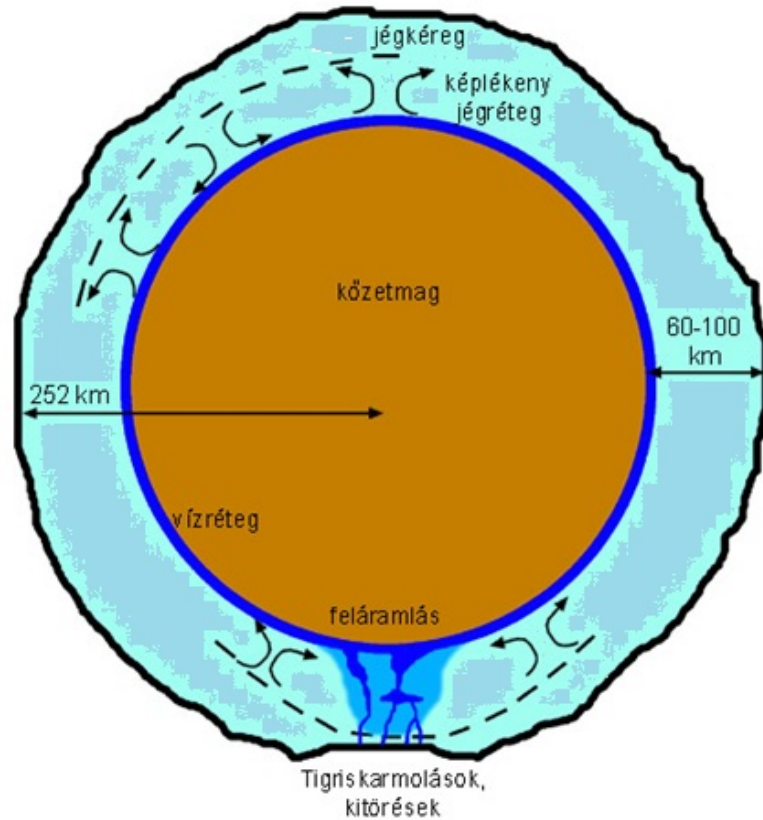
A Cassini mérései alapján elmondható, hogy a felszínen a déli pólus környékén található repedéseknél melegebb (114-157 K), mint a hold többi pontja (70-80 K) (Spencer, 2006). Mindemellett kiemelkedően magas, 180 K fölötti felszíni értéket is regisztrált a Cassini űrszonda, ez a *Damascus Sulcus* elnevezésű területen történt.

Abramov & Spencer (2009) elméleti számításai szerint lokálisan (a *Cairo Sulcus* nevű tigriskarmolás közelében) akár 223 K is lehet a felszíni hőmérséklet. Az általuk tesztelt modelleket különböző kezdeti hőmérséklet értékekkel kezelték, és ezeket a Cassini CIRS (Composite Infrared Spectrometer) által mért adatokkal vetették össze. Noha nem volt inkonzisztens a 130 – 155 K-es érték sem, ezt valószínűtlennek tartják, mert a felszíni repedések méreteivel nem egyeztethető össze. Mivel a tigriskarmolások megfigyelt vízgőz emissziója igen nagy, a kapott eredményt azzal magyarázzák, hogy a felszín alatt folyékony vízkészlet áll rendelkezésre a repedések és az anyagkiáramlások területén. Ha valóban így van, akkor ez arra utal, hogy az Enceladus differenciálódott az idők során. Akárhogy is, a felszín alatti víz jelenlétét számos elméleti modell megjósolja. Feltehetően arról van szó, hogy a hold belsejéből kiáramló hő megolvasztotta a fölötte elhelyezkedő jégkéreg, és így kialakulhatott egy folyékony vízréteg. Elképzelhető, hogy a hold belsejéből áradó geotermikus hő a magyarázata a tigriskarmolások, repedések kialakulásának a hold felszínén. Újabban Matson és munkatársai (2012) próbáltak becslést tenni, hogy jellemezzék az Enceladus felszíne alatti folyékony víz tulajdonságait. Modellszámításai szerint az óceán hőmérséklete $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül lehet, és még $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig nem fagy be.

Ha az Enceladus belsejében csak radioaktív hőforrás lenne, akkor az kb. 300 megawatt energiát jelentene becslések szerint (Kargel, 2006), azonban a Cassini által megfigyelt kifúvások létéhez szükséges hőt biztosító energia ennek legalább tízszerese, 3-7 gigawatt (Spencer et al., 2006), vagy akár 15 GW is lehet (Howett et al., 2011). A kérdéses többletet a Dione holddal fennálló 2:1 arányú rezonancia és az ebből eredő árapályfűtés adhatja. (A gázóriások körül keringő holdaknál egyáltalán nem ritka, hogy rezonancia áll fenn, többek között a Jupiter holdjai, az Io és az Europa is 2:1 arányú rezonanciában állnak egymással.)

Az Enceladus jelenlegi aktivitása még egy megmagyarázatlan probléma, és ugyan több elméleti forgatókönyv is kísérletet tesz, hogy modellezze, de feltehetőleg csak egy újabb űrszonda által nyert adatok adhatnának választ a kérdésre. A jelenlegi modellek közül egy vékony, folyékony felszín alatti vízréteg jelenléte a legvalószínűbb, ami elméletileg akár 273 K-es hőmérsékletet is jelenthet (Matson et al., 2012). Emellett klatrát-képződés és disszociáció (140 K) (Kieffer et al., 2006), vagy a felszíni jég szublimációja ($> 180\text{ K}$), vagy súrlódás általi fűtés (Nimmo et al., 2007) is felelős

lehet a megfigyelt aktivitásért, illetve az is elképzelhető, hogy ezek közül több is megvalósul egyszerre.



4. ábra. Az ábra az Enceladus belső szerkezetét modellezi. A déli pólusnál megfigyelt anyagkiáramlás - az ábra alján - forrása feltehetően egy folyékony vízkészlet, mely akár globálisan is jelen lehet a holdon. (Kereszturi, 2011)

3.3. Asztrobiológiai vonatkozások

A felszín alatt feltételezhető vízréteg, valamint az esetlegesen jelen lévő szerves anyagok, és a hold belsejéből származó hőtranszport együtt érdekessé teszi a területet a Földön kívüli élet vizsgálata szempontjából. Az Enceladus holdon akár az is elképzelhető, hogy a déli pólusnál húzódó tengerben esetleg adottak a feltételek az általunk ismert élet kialakulásához.

A földi mélytengeri környezetek hasznos analógiaként szolgálhatnak, itt a rendelkezésre álló hő, mely fekete/fehér füstölgőkből kerül az óceánokba, és a kémiaiilag hasznosítható szerves anyagokban gazdag anyagiáramlások alkalmas környezetet teremtenek számos faj számára. Érdekes tehát a mélytengeri kürtőknél előforduló főleg termofil, vagyis hőtűrő élőlényeket részletesebben is vizsgálni. Itt, példának okáért, csak néhány reprezentatív termofil kerül említésre: *Acidianus infernus* (90 °C az optimális hőmérséklet, melyen él), *Alvinella pompejana* (mely 81 °C-on él), és *Sulfobus acidocaldarius* (ami pedig 80 °C-os hőmérsékletérték mellett fejlődik). A termofileknél még reprezentatívabb analógiaként szolgálhatnak a hipertermofilek, melyek a legszélsőségesebb hőtűrők a Földön.

Ha az Enceladuson élnek mikroorganizmusok, akkor azok elvben akár hasonló tűrőképességűek is lehetnek azokhoz, melyeket a Földön mélytengeri környezetekben, magas hőmérsékleten fedeztek fel geotermikus hőforrások (fekete vagy fehér füstölgők) közelében, mint pl. a *Methanococcus jannaschii* vagy a *Pyrolobus fumarii*. Utóbbi egyébiránt a jelenlegi rekorder a hipertermofilek között, 113 °C-on él (Blöchl et al., 1997). Ugyanakkor a *Pyrolobus fumarii* olyan kemoautotróf baktérium, mely 90 °C alatt és 121 °C fölött már életképtelen. Hasonlóan szélsőséges hipertermofil a *Pyrodictium occultum*, mely számára az ideális hőmérséklet 105 °C.

4. Vosztok-tó

A Vosztok-tavat általánosan elfogadott analógiaként szokták említeni az Europa kapcsán, ugyanakkor az erről szerzett ismeretek alkalmazhatóak az Enceladusra is, vagy akár (exobolygók körül keringő) exoholdakra. A Vosztok-tó az Antarktisz keleti részén található, közel 4 km mélyen a jégpáncél alatt, a kontinentális kérgen. (A Vosztok-tó nem az egyetlen ilyen jégfelszín alatti tó, de a máig felfedezettek közül a legnagyobb a Földön.) Siegert et al. (2001) remek összefoglalással szolgál az Antarktisz jégrétege alatt húzódó tavak fizikai-kémiai-biológiai tulajdonságait illetően.

felfedezése	1973
földrajzi pozíciója	107,5 °E, 78,5 °S
maximális hosszúság	250 km
maximális szélesség	50 km
átlagos mélysége	344 m
a víz térfogata	(5400 ± 1600) km ³

4. táblázat. A Vosztok-tó fontosabb paraméterei

A jégfelszín átlagos hőmérséklete 218 K, ugyanakkor a Vosztok-állomásnál mérték eddig a legalacsonyabb földi hőmérsékleti értéket is: 184 K-t (azaz – 89 °C-ot, 1983.07.21-én). A jégpáncél alatt mégis létezik egy megolvadt vízréteg a geotermikus fűtésnek köszönhetően, melynek térfogata feltehetően időről-időre változik. A felsőbb réteg nagy valószínűséggel megolvad és újra megfagy, ahogy a víz cirkulációja zajlik.

A Vosztok-tó esetlegesen létező élővilága érintetlen, és különös figyelemmel kell eljárni, hogy a fúrások/vizsgálatok során ne szennyeződjön be. Ez roppant nehéz feladat, ugyanis a mai napig nincs olyan technika, vagy technológia, amely tökéletes sterilizációt tudna nyújtani. Ez a probléma jelentős bonyodalmat okoz az űrmissziók alkalmával is.

A Vosztok-tó jegébe fagyva már találtak mikroorganizmusokat. A *Hydrogenophilus thermoluteolus* 3607 méter mélyen az Antarktisz jegébe volt fagyva, néhány száz méterre, közvetlenül a Vosztok-tó felett (Bulat et al., 2004). Meglepő, hogy ez a baktérium egy termofil (hőtűrő) volt, amelyet addig csak hőforrások közelében mutattak ki. Ez arra enged következtetni, hogy a Vosztok-tó feltétlenül rendelkezik egy belső geotermikus energiaforrással. Meglehetősen nehéz volna más magyarázatot találni a *H. thermoluteolus* jelenlétére, minthogy a Vosztok-tó izolált élővilágának tagja, mely a víz cirkulációja révén került egy olyan rétegbe, amely befagyott.

A Vosztok-tó több szempontból is ideális analógia a "jeges holdak" esetében, de kétségtávol az egyik legjelentősebb tény a napfény teljes hiánya. Míg a földi bioszféra nagy részének nélkülözhetetlen a napfény, addig a kemotróf organizmusok kémiai elemek által valósítják meg metabolikus folyamataikat. Ugyanakkor a Vosztok-tó esete az eddig vázolt képnél némiképp összetettebb. A tó kialakulásának feltehetően az az oka, hogy évmilliókkal ezelőtt a lemeztektonika révén a kontinentális kéregben egy törés keletkezett, ahova víz folyt be. Ezt a vízréteget fedte el a később kialakuló jégkéreg. A Vosztok-tó ökoszisztémája még nem ismert, de feltehetően mára már csak (extremofil) baktériumok alkotják.

5. Diszkusszió

Az Europa és az Enceladus rendelkezhet az általunk ismert élethez szükséges feltételekkel. Ugyanakkor számos fizikai paraméter még ismeretlen, melyek közül az egyik legfontosabb a felszín alatt húzódó vízkészlet hőmérséklete. A Földön széles hőmérsékleti skálán fordulnak elő aktív élőlények (113 °C-tól egészen – 18 °C-ig).

Az optimális előfordulási hőmérsékletet tekintve számos baktérium ismert: *M. kandleri*: $T = 100\text{ °C}$, *M. jannasschii*: $T = 85\text{ °C}$, *M. thermoautotrophicum*: $T = 65\text{ °C}$, *Methanosarcina barkerii*: $T = 40\text{ °C}$, *M. burtonii*: $T = 23\text{ °C}$, *M. frigidum*: $T = 15\text{ °C}$. Emellett az is kiderült, hogy magas nyomást tűrő (piezofil) baktériumok fordulnak elő a földi óceánok legmélyebb pontjain is. Noha a mélytengeri környezetek még bővebb feltárást igényelnek, jelenleg úgy tűnik, hogy hemzsegnek az ott élő organizmusoktól.

Mindazonáltal szimplifikált nyomásbecslés által sikerült belátni, hogy az Europa hold óceánjában uralkodó értékek hasonlóak lehetnek a földi óceánokban tapasztaltakhoz. Mivel a földi óceánokban hasonlóan magas nyomáson is találtak mikroorganizmusokat (főleg eukariótákat), így elvi megfontolások alapján elképzelhető, hogy az Európán is létezhetnek.

Az Enceladus egyelőre rejtélyesebb, azonban a hipotézisek azt jósolják, hogy a földi élethez szükséges lételelemek jelen vannak ott is (vagyis energiaforrás, vizes közeg és szerves anyagok). Mivel a fentebb tárgyalt környezetek antropocentrikus aspektusból szemlélve túlságosan szélsőségesek, ezért a Földön megismert extremofil életformák hozhatók kapcsolatba leginkább az Europa és az Enceladus életlehetőségeit tekintve.

A Vosztok-tóról szerzett ismeretek roppant hasznosak a "jeges holdak" vizsgálata során, sőt akár exoholdakra is kiterjeszthetőek lesznek. Egyelőre a technikai bonyodalmak leküzdése a cél, és a kinyert minták precíz elemzése. Ebből hamarosan meg lehet majd állapítani, hogy egy ilyen izolált környezetben is élnek-e kemotróf baktériumok, esetleg fejlettebb organizmusok.

Az alábbiakban az Europa és az Enceladus vízkészletére vonatkozó legfontosabb ismeretek kerülnek összefoglalásra:

A vízkészlet kémiai jellemzői

Europa: Annak ellenére, hogy nem sikerült még *in situ* méréseket végezni, feltételezhető, hogy az óceán oldott sókat tartalmaz (Hand and Chyba, 2007). Erre a felszíni elszíneződésekből, és a Galileo magnetométer adataiból lehet következtetni. A felszín spektroszkópiai vizsgálatából feltételezhető a magnézium-szulfát felszín alatti jelenléte is (Prieto-Ballesteros et al., 2005).

Enceladus: A felszín alatt húzódó vízkészlet minden bizonnyal nem csak tiszta vízből áll, ugyanis a kifúvásokban a Cassini által megfigyelt gáz és por sem tiszta vízgőz és jég - noha ezek a főbb komponensek (90 %).

A vízréteg elhelyezkedése és becsült térfogata

Europa: A Galileo szonda adatai arra engednek következtetni, hogy a felszín alatt egy körülbelül 100 km vastag vízóceán húzódik globálisan. Ez az óceán a számítások szerint nem fagyhat be teljesen (Hussmann et al., 2002). A vízóceán térfogata nagyságrendileg hasonló lehet a Földön lévő összes víz együttes térfogatához, esetleg 2-3-szor annyi.

Enceladus: Noha egyelőre az Enceladus vízkészletének térfogatát illetően nem állnak rendelkezésünkre számítások, a Hold kis méretéből adódóan egy vékony réteg képzelhető csak el a déli pólus környékén, a tigriskarmolások alatt. Ugyanakkor, az óceán húzódhat globálisan is, de a felszínnel közvetlen kapcsolatban csak a déli pólus környékén van.

Az óceán hőmérséklete

Europa: A víz fagypontja alatt, melyet nagyban befolyásol a víz kémiai összetétele, vagyis hogy milyen oldatok alkotják. $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vagy még annál is kevesebb lehet (Melosh et al. 2004).

Enceladus: Matson et al. (2012) modellszámításai szerint $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli lehet a víz hőmérséklete. Fontos, hogy az vízben lévő oldatok közül pl. az ammónia drasztikusan csökkenti a fagyáspontot, akár $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal.

Az óceán kora

Europa: Ismeretlen. Lehetséges, hogy a hold kialakulása során létrejött.

Enceladus: Feltehetőleg az óceán fiatalabb, mint az Enceladus. Ha ugyanis a kialakulása során keletkezett volna, akkor mára már nem állna elég anyag a rendelkezésére, hogy a megfigyelt kitöréseket produkálni tudja. A jégréteg az idők folyamán olvadhatott meg, létrehozva ezáltal a vízóceánt.

6. Konklúzió

A további vizsgálatokhoz elengedhetetlen lesz *in situ* mérések elvégzése (legoptimálisabb esetben a Vosztok-tónál végzett fúrásokhoz hasonló). Ennek realizálása inkább az Europa esetében lehet, bár a valódi cél (egy kriobot, mely a jég alá fúrna) még igen távol áll a megvalósítástól. A NASA/ESA jelenlegi tervei szerint is - bizakodó becslések mellett - csak mintegy 15 éven belül érkezhethet újabb szonda a Jupiter rendszerébe. Az egyik mára már elvetett terv a Europa Jupiter System Mission (EJSM) volt, helyette jelenleg a Jupiter and Icy moons Explorer (JUICE) kerülhet megvalósításra. Egy ilyen misszióhoz számos tanulmány készült már feltárva a szükséges műszereket és tudományos célokat, például Clark et al. (2010).

A jelenlegi munka az úgynevezett "jeges holdakra" koncentrál. Ilyen holdak azonban nemcsak a Naprendszerben létezhetnek, hanem akár más naprendszerekben is. Az exobolygók növekvő száma, és a technikai fejlődés bizakodásra ad okot annak tekintetében, hogy ez a munka kiterjeszthető legyen a még nem felfedezett (exobolygók körül keringő) exoholdakra is.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Kereszturi Ákosnak. Segített a szakirodalom felhasználásában, hasznos véleményeket fűzött a dolgozathoz, és e-mailen keresztül hosszas diszkussziókat folytattunk. Hálás vagyok évfolyamtársam, Werner Bence tanácsaiért is.

Hivatkozások

- Anderson, J.D., et al. 1998, Europa's differentiated internal structure: inferences from four Galileo encounters, *Science* 281, 2019-2022
- Blöchl, E., Rachel R., Burggraf, S., Hafenbradl, D., Jannasch, H.W., Stetter, K.O., 1997. *Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113 degrees C. *Extremophiles*; 1:14-21. PubMed doi:10.1007/s007920050010
- Bulat, Sergey A. Bulat; Irina A. Alekhina, Michel Blot, Jean-Robert Petit, Martine de Angelis, Dietmar Wagenbach, Vladimir Ya. Lipenkov, Lada P. Vasilyeva, Dominika M. Wloch, Dominique Raynaud and Valery V. Lukin, 2004, DNA signature of thermophilic bacteria from the aged accretion ice of Lake Vostok, Antarctica: implications for searching for life in extreme icy environments, *International Journal of Astrobiology* 3: 1-12.
- Clark, K., et al., 2010, Return to Europa: Overview of the Jupiter Europa orbiter mission, *Advances in Space Research* 48 629-650
- Dalton, J.B., Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J.S., Jamieson, C.S., Jolivet J., Quinn, R., 2005, Spectral comparison of heavily hydrated salts with disrupted terrains on Europa, *Icarus* 177, 472-490
- Gooday, A.J., Todo, Y., Uematsu, K., Kitazato, H., 2008, New organic-walled Foraminifera (Protista) from the ocean's deepest point, the Challenger Deep (western Pacific Ocean), *Zoological J. of the Linnean Society*, 153, 399-423
- Gooday, A. J., Aranda da Silva, A., Pawlowski, J., 2011, Xenophyophores (Rhizaria, Foraminifera) from the Nazaré Canyon (Portuguese margin, NE Atlantic), *Deep-Sea Research Part II*, Volume 58, Issue 23, p. 2401-2419.
- Hand P.K., Chyba F.C., 2007, Empirical constraints on the salinity of the european ocean and implications for a thin ice shell, *Icarus* 189
- Hansen, C. J., et al., 2006, Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus Plume Composition and Structure, *Science* 311, 1422
- Hansen, C. J., et al., 2011, The composition and structure of the Enceladus plume, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11202
- Howett, C., Spencer, J., Pearl, J., Segura, M., 2011, High heat flow from Enceladus' south polar region measured using 10-600 cm-1 Cassini/CIRS data, *J. Geophys. Res.* 116, E03003
- Hussmann, H., T. Spohn, and K. Wiczerkowski, 2002, Thermal equilibrium states of Europa's ice shell: Implications for internal ocean thickness and surface heat flow, *Icarus*, 156, 143 - 151
- Hussmann, H., Sohl, F., Spohn, T., 2006, Subsurface oceans and deep interiors of medium-sized outer planet satellites and large trans-neptunian objects, *Icarus* 185 (1): 258-273
- Kargel, J., 2006, Enceladus: Cosmic gymnast, volatile miniworld. *Science* 311, 1389-1391.
- Kereszturi, A., Keszthelyi, Z., 2012, Astrobiological implications of chaos terrains on Europa to help targeting future missions, *Planetary and Space Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2012.08.028>
- Kereszturi, A., 2002, Crustal thickness estimation for Europa, *ESA SP-518*, p. 523-524
- Kereszturi, A., *Asztrobiológia*, MCSE 2011
- Keszthelyi, Z., 2012, Astrobiological potential of surface features on Europa and pressure calculation for the putative ocean, 43rd LPS Conference, 1095
- Khurana, K.K., et al. 1998: Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto, *Nature* 395, 777-780
- Kieffer, S.W., Lu, X., Bethke, C.M., Spencer, J.R., Marshak, S., Navrotsky, A., 2006, A clathrate reservoir hypothesis for Enceladus' south polar plume. *Science* 314, 1764-1766.
- Kim, K.K., Jin L., Yang H.C., Lee S., 2007, *Halomonas gomseomensis* sp. nov., *Halomonas janggokensis* sp. nov., *Halomonas salaria* sp. nov. and *Halomonas denitrificans* sp. nov., moderately halophilic bacteria isolated from saline water, doi: 10.1099/ij.s.0.64767-0 *IJSEM* vol. 57 no. 4 675-681.
- Matson, D.L., Castillo-Rogez, J.C., Davies, A.G., Johnson, T.V., 2012, Enceladus: A hypothesis for bringing both heat and chemicals to the surface, *Icarus* 221 53-62
- Melosh, H.J., et al., 2004, The temperature of Europa's subsurface water ocean, *Icarus* 168
- Nimmo, F., Spencer, J.R., Pappalardo, R.T., Mullen, M.E., 2007, Shear heating as the origin of the plumes and heat flux on Enceladus, *Nature* 447, 289-291.

- Orlando, T.M., McCord, T.B., Grievies, G.A., 2005, The chemical nature of Europa surface material and the relation to a subsurface ocean, *Icarus* 177, 528-533
- Porco, C.C., and 24 colleagues, 2006, Cassini observes the active south pole of Enceladus, *Science* 311, 1393–1401.
- Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J.S., 2005, Thermal state and complex geology of a heterogeneous salty crust of Jupiter’s satellite, Europa, *Icarus*, Volume 173, Issue 1, p 212-221.
- Schenk, P.M., 2002, Thickness constraints on the icy shells of Galilean satellites from a comparison of crater shapes, *Nature* 417, 419-421
- Schilling, N., et al., 2004, Limits on an intrinsic dipole moment in Europa, *J. Geophys. Res.* 109, E05006
- Siegert, M. J., et al., 2001, Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes, *Nature*, 414, 603 – 609.
- Showman, A.P., Malhotra, R., 1999, The galilean satellites, *Science* 286, 77-84
- Spencer, J.R. et al., 2006, Cassini encounters Enceladus: Background and the discovery of a south polar hot spot, *Science* 311, 1401–1405.
- Vanlint, D., et al., 2011, Rapid acquisition of gigapascal-high-pressure resistance by *Escherichia coli*. *mBio* 2(1):e00130-10. doi:10.1128/mBio.00130-10.
- Waite Jr., J. H., et al., 2006, Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus Plume Composition and Structure, *Science* 311, 1419
- Zahnle, K., Alvarellos, J.L., Dobrovolskis, A., Hamill, P., 2008, Secondary and sesquinary craters on Europa, *Icarus* 194 (2), 660–674.