

A FÖLDI VÍZ LEHETSÉGES FORRÁSAI

Dencs Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Gothard Asztrofizikai Observatórium

Forró nyári napokon gyakran érezzük szükségét a víz hűsítő hatásának akár egy hideg záporosó, akár egy ital formájában. Azonban a víz nem csupán szomjunk oltását szolgálja. Közhely, mégis fontos hangsúlyozni, hogy víz nélkül nem lenne élet a Földön. A cseppfolyós halmazállapotú víz hiányában nem fejlődhetet volna ki az élet. A víz rendkívül praktikus oldószer és közvetítő közeg, amelynek segítségével létrejöhetnek a sejteket alkotó komplex fehérjék. A sejtek táplálékul szolgáló anyagokat a víz szállítja, valamint maguknak a sejteknek is fontos alkotóeleme a víz.

Akár közvetlen környezetünket szemléljük, akár a világúrból tekintünk otthonunkra, megállapíthatjuk, hogy a Föld a víz bolygója. A fehér felhőfoszlányok takarója alatt bolygónk kék színben pompázik, a felszín több mint kétharmadát vízfelület borítja. A geográfiai használatos tengerszint egy adott tenger közepes vízszintjét tekinti referenciaértéknek a szárazföldek földrajzi magasságának meghatározásánál. Habár az egyes földtörténeti időszakokban eltérő volt a földi óceán vízszintje, így a vízzel borított felület nagysága is (például jégkorszakok idején a globális vízszint alacsonyabb, így a szárazföldek és a vízzel

borított területek aránya magasabb), mégis a felszíni vízkészlet teljes tömege állandónak tekinthető a földtörténet jelentős részében. Addig az időszakig visszatekintve, amelyre vonatkozóan még vannak megfelelő geológiai minták, a felszíni víz mennyisége változatlan [1].

A vízkészlet tömege $1,3 \cdot 10^{21}$ kg a Föld felszínén. Nem csupán a Földön, a belső Naprendszer többi kőzetbolygóján és a Holdon is található víz, bár igen csekély mennyiségben. Az űrtávcsövek segítségével távoli csillagok körül keringő kőzetbolygók légkörében is kimutatható a vízpára jelenléte, ez alapján következtethetünk felszíni víz jelenlétére. Amennyiben víz nyomait detektáljuk, érdemes elgondolkozni az élet megjelenésének lehetőségén az exobolygó felszínén [2].

A fő kérdések, amelyekkel ebben az írásban foglalkozunk: honnan származik a víz, és hogyan kerülhetett a Föld és a többi kőzetbolygó felszínére. Jelenleg nem tudjuk pontosan, hogyan és mikor jöttek létre az óceánok, kezdettől fogva volt víz a Földön vagy csak később, a bolygó kialakulását követően került a felszínre? Kevés közvetlen geológiai bizonyíték áll rendelkezésre e kérdések megválaszolására, azonban egyes csillagászati megfigyelések és számítógépes modellek szolgálhatnak válaszokkal.

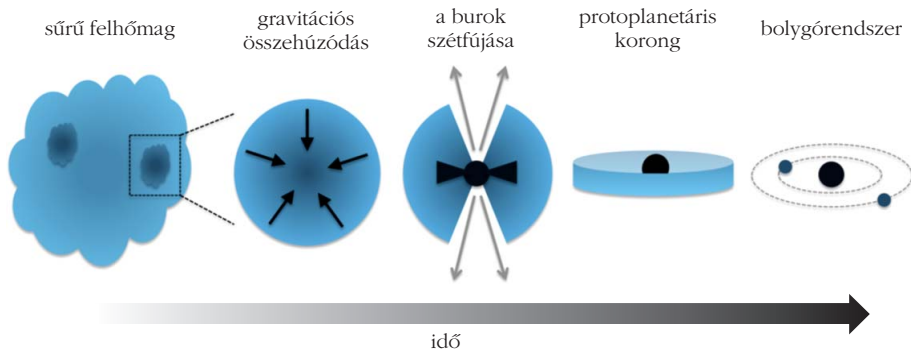
Csillagok, az elemek kohói

Ahhoz, hogy megértsük, honnan származik a földi víz, tekintsük át a Naprendszer keletkezésének körülményeit. A Naprendszer kialakulása közel 5 milliárd évvel ezelőtt vette kezdetét. Egy, a galaxisunkban található óriás molekulafelhő sűrű felhőmagjának gravitációs összehúzódásával született meg központi csillagunk, egy külső folyamat (például szupernóva-robbanás) hatására. A fiatal Napot ekkoriban egy szfé-

A szerző köszönetet mond Szabados Lászlónak a szöveg gondozásáért, valamint Regály Zsoltnak és Kereszturi Ákosnak a szakmai helyesség ellenőrzéséért, amellyel hozzájárultak a cikk színvonalának emeléséhez.



Dencs Zoltán földtudományi kutatóként végzett 2014-ben az ELTE TTK-n, csillagász oklevelet 2016-ban szerzett szintén a TTK-n. Az ELTE Fizika Doktori Iskola Részecskefizika és Csillagászat programjában doktorált 2021-ben Regály Zsolt témavezetésével. Jelenleg az MTA Lendület Tejútrendszer Kutatócsoport tudományos munkatársa az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriumban. Kutatási területei a hideg vörös óriáscsillagok kémiai összetételének vizsgálata és a bolygókeletkezés modellezése.



1. ábra. Csillagok keletkezése és a fejlődésük főbb fázisai [3].

A fiatal Napot körülvevő burok teljes egészében felbomlik a fúziós energiatermelés beindulását követően, csupán a csillag egyenlítői síkjában található gáz- és porokorong marad meg. Napunk ekkor kezdi meg élete leghosszabb fázisát, amelynek során energiakibocsátása jó közelítéssel állandó. A Nap körül kialakuló korongot protoplanetáris korongnak nevezzük, amely a bolygókeletkezés színhelye (1. ábra).

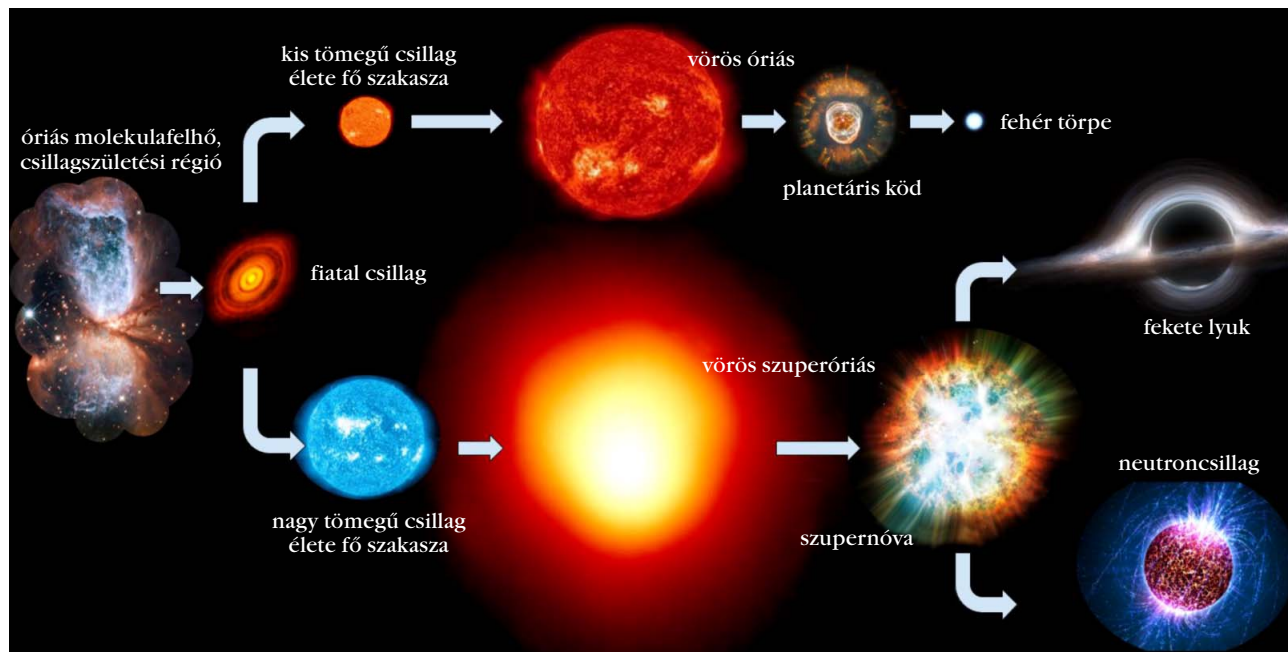
rikus szerkezetű ritkább burok vette körül, amelynek anyagából építkeztek a majdani bolygók. A gázból és elenyésző mértékben porból álló ritka burok a fiatal csillag körül forgott. A burokból folyamatosan anyag hullott a csillagra. Mivel a felhőmag perdülete állandó volt a csillag és a bolygórendszer kialakulása során, ezért a fiatal csillag forgástengelyére merőleges síkból az anyag nem tudott behullani. Így a fiatal csillag körül egy vékony korong alakul ki (1. ábra).

A felhőmag további összehúzódásával növekszik a hőmérséklet a centrumban. Megfelelően magas hőmérséklet esetén elindulhat a csillag legfontosabb energia-termelő folyamata, a proton-proton ciklus, amikor a hidrogénatommagok (protonok) fúziója során hélium keletkezik, amelynek tömege valamivel kisebb a kiindulási elemek teljes tömegénél. Az új elem keletkezésekor ugyanis az egyesülő atomok tömegének egy része energiává alakul. Ez az energia táplálja napjainkban is az életet a Földön. Azonban Napunk nem tekinthető minden időszakban ilyen jóságos életadó csillagnak. A heves aktivitást mutató fiatal Nap erős csillagszele a körülötte lévő anyag jelentős részét kifújta a rendszerből.

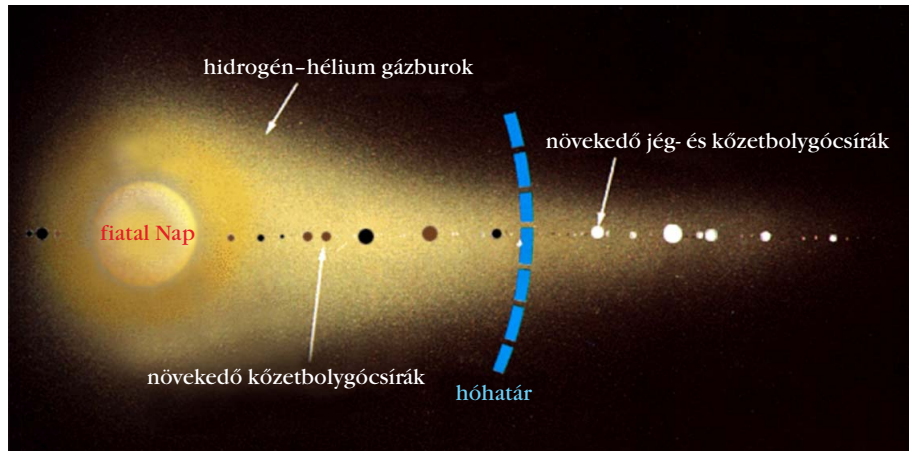
A Föld-szerű bolygók főként olyan magas tömegszámú elemekből épülnek fel, mint a vas, a nikkel, a szilícium vagy az oxigén. Az ilyen elemekből, illetve az általuk alkotott molekulákból álló szilárd felszíni csillagkörüli testek a kőzetbolygók. De nemcsak kőzetek, hanem a szobahőmérsékleten folyékony vagy gáznemű illékony anyagok (víz, ammónia, metán stb.) is jelentős részt képviselhetnek a kőzetbolygók összetételében. Vajon honnan származnak a hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemek?

A magasabb rendszámú elemek a csillagokban keletkeznek alacsonyabb rendszámú elemek fúziójából nukleoszintézis során. A Nap viszonylag kis tömegű csillag, magjában nem elég magas a hőmérséklet a fenti nehezebb elemek szintetizálásához. A Napnál legalább másfélszer nagyobb kezdeti tömegű csillagok magjában játszódik le a CNO-ciklus (szén–nitrogén–oxigén). A ciklus fő ágában hélium keletkezik, míg mellékágon oxigén is létrejöhet. A csillagok életük delén túl, egy későbbi fejlődési állapotban belépnek a vörös óriás (kis tömegű csillagok esetén) vagy a vörös szuperóriás (nagy tömegűeknél) fázisba (2. ábra).

2. ábra. Kis tömegű (felső ág) és nagy tömegű csillagok (alsó ág) életének fontosabb állomásai [4].



Ekkor felborul a csillagok életének fő szakaszát végigkísérő sugárzási egyensúly. A hőmérséklet rohamos növekedésnek indul a magban, ez lehetővé teszi a nehezebb elemek szintézisét: többek között oxigén, neon, magnézium, szilícium jön létre, majd végül a vas. A Naphoz hasonló csillagok életének végső fázisában ezek az elemek megmaradnak a magban, vagy legfeljebb az idős, halvány csillagmaradvány közvetlen környezetében szóródnak szét, rövid életű planetáris ködöt alkotva (2. ábra). A Napnál nagyobb



3. ábra. Növekedő bolygócsírák a protoplanetáris korongban. A korong a látóirány síkjában fekszik [7].

tömegű csillagok élete azonban látványos szupernóva-robbanással zárul. A vasnál nehezebb elemek szintézise is jellemzően ilyen robbanások során történik.

A robbanás során az egykori csillag magja sem marad érintetlen, az Ia típusú szupernóvák esetében szinte teljesen megsemmisül. Ennek során a nehéz elemek széles palettája szóródik szét, és tovább gazdagítja a csillagközi anyag molekulafelhőinek elemkészletét. Ezenkívül a szupernóva-robbanás nyomán létrejövő lökéshullámok hullámfrontjaiban összesűrűsödnek a csillagközi molekulafelhők. Így a robbanás eredményeként sűrű felhőmagok jöhetnek létre. Számos kutató úgy gondolja, hogy egy ősi szupernóva-robbanás hozta létre a Naprendszert szülő felhőmagot, valamint hozzájárulhatott a molekulafelhő feldúsításához a kőzetbolygókat is alkotó elemekkel, például [5].

Víz a fiatal Naprendszerben

A jelenlegi tudásunk alapján felvázolt elméletekből már el tudjuk képzelni, hogyan alakult ki a korai Naprendszer, és honnan származik a benne található víz. A Spitzer és a Herschel űrtávcsövek infravörös-hullámhosszakon végzett méréseiből színképelemzéssel a környező fiatal csillagok (például HD 100546, TW Hydrae) protoplanetáris korongjában is sikerült kimutatni a víz jelenlétét. A korongok forró régióiban gáz, míg a hidegebb területeken szilárd halmazállapotban van jelen a víz. A két régiót elválasztó hóhatár a csillagtól olyan távolságban található, amelyen túl a hőmérséklet megfelelően alacsony ahhoz, hogy a víz jég formájában legyen jelen a bolygóközi térben (3. ábra). A mai Naprendszerben a hóhatár a Mars pályáján túl, ~2,7 csillagászati egység (CSE) távolságban húzódik. Az egykori protoplanetáris korongban azonban a maitól eltérő hőmérsékleti viszonyok uralkodtak.

A szoláris köd anyaga kezdetben igen forró. Ez főleg két tényezőtől adódik:

- a csillag felé áramló anyag helyzeti energiája folyamatosan csökken, és az elvesző energia hővé alakul,

- a fiatal Nap luminozitása (a csillag teljes felületén időegység alatt kibocsátott energia) és aktivitása a jelenleginél nagyobb mértékű volt.

Ez azt jelenti, hogy a hóhatár a mainál távolabb helyezkedett el a Naptól [6]. Ebből adódóan a földpálya mai távolságában, 1 CSE-re a Naptól 1500-2000 K lehetett a hőmérséklet. Emiatt a kőzetbolygók kialakulásának kezdetén csupán a magas olvadáspontú, úgynevezett refraktorikus elemek lehettek jelen szilárd halmazállapotban a Naprendszer belső régiójában. Az alacsony olvadáspontú elemek (illékony anyagok) csupán a Naptól nagyobb távolságban kondenzálódhattak a gázfázisból. Mivel a protoplanetáris korong hőmérséklete a Naptól távolodva csökken, ezért nagyobb távolságokon magasabb a kondenzált anyagok aránya.

Az elemek és molekulák kémiai tulajdonságai alapján felírható egy kondenzációs sorozat, amely megmutatja, hogy az adott anyagok – olvadáspontjuktól

elem/molekula	kondenzációs hőmérséklet (K) 100 kPa nyomáson	kondenzációs front távolsága a csillagtól (CSE*)
kvarc (SiO ₂)	1958	> 0,3
vas (Fe)	1785	> 0,3
víz (H ₂ O)	270	> 3
szén-dioxid (CO ₂)	212	> 5
kén-dioxid (SO ₂)	197	> 5
ammónia (NH ₃)	192	> 5
metán (CH ₄)	90	> 30
ózon (O ₃)	79	> 30
nitrogén (N ₂)	62	> 30
oxigén (O ₂)	54	> 30

*csillagászati egység

függően – milyen távolságokon kondenzálódnak a gázfázisból. Az 1. táblázatban a földi élet szempontjából fontosabb anyagok fázisátalakulásához szükséges hőmérsékletek láthatók 100 kPa nyomás esetén. Fontos megjegyezni, hogy a vízjég szublimációja már jóval 0 °C (~273 K) alatt megkezdődik, különösen a bolygóközi térben uralkodó viszonyok között, alacsony nyomáson, ezért a csillagászatban ~150 K-nek szokás választani a víz kondenzációs hőmérsékletét. A jégkristályok keletkezéséhez szükség van továbbá kondenzációs magokra, amelyek a protoplanetáris korongot alkotó szilikátszemcsék.

Az 1. táblázatban szerepel, hogy a bolygókeletkezés kezdeti fázisában hozzávetőlegesen milyen távolságban kondenzálódnak az egyes elemek és molekulák a gázfázisból. A kondenzációs front távolsága a központi csillagtól azonban időben változó. A bolygókeletkezés első néhány millió évét követően a kondenzációs front fokozatosan közelebb került a fiatal Naphoz. A protoplanetáris korong ugyanis a fiatal Nap lassú halványodása és a csillagba történő beáramlás lassulása miatt hűlni kezdett. Eközben a gáz is folyamatosan eltűnik a korongból, megfigyelések alapján a csillag születését követően kevesebb mint 10 millió éven belül. Emiatt a gáz eltűnése idején uralkodó állapot konzerválódhatott a Naprendszer égitestekének összetételében [8]. Ezért a Naphoz közelebbi régiókban keringő bolygók magasabb olvadáspontú anyagokból épülnek fel, mint a távolabbi, hóhatáron túl keringő bolygók, törpebolygók (3. ábra).

A fenti elmélet szerint a Naprendszer belső régiójában keringő kőzetbolygók keletkezése során a növekedő bolygócsírák nem gyűjthettek össze jelentős mennyiségű illékony anyagot jég formájában a hóhatáron belül. A bolygócsírák tömege pedig még túl alacsony volt ahhoz, hogy gravitációs vonzáskörzetükben gáz halmazállapotú illékony anyagokat gyűjtsenek és tartsanak meg. Ebből adódik az a kérdés, hogy a Földre, illetve a hozzá hasonló kőzetbolygókra hogyan kerülhetett víz. Amennyiben a kőzetbolygók a mai pályájuk közelében keletkeztek (a mindenkori hóhatáron belül), hogyan gyűjthették össze vízkészletüket?

„Szárason” vagy „nedvesen” keletkeznek a bolygók?

Naprendszerünk legnagyobb tömegű vízkészletet tartalmazó kőzetbolygója a Föld. Azonban a víztartalmat relatív értelemben nézve már közel sem sorolható első helyre a Föld. Noha a felszín közel 2/3 részét víz borítja, mégis csupán a Föld tömegének 0,02%-át teszi ki a víz. A relatív víztömeget tekintve ennél még kisebb a víz tömegaránya a többi kőzetbolygó esetén. Hiányos ismereteink miatt nagyon nehéz becslést adni egyes bolygók, holdak vízkészletének tömegére, de általánosan igaz, hogy a Merkúron, a Vénuszon, a Holdon vagy a Marson feltételezett víz tömege nem haladja meg a 10^{16} kg-ot. A Merkúron és a Holdon főleg kötött formában, ásványok kristályszerkezeté-

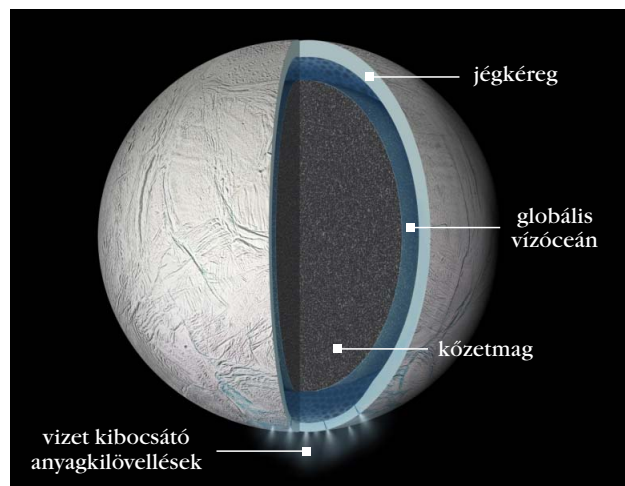
ben fordul elő víz, míg a Marson jégspakákban és felszín alatti, porral fedett jégtömbökben. Megfelelően nagy nyomású légkör hiányában a víz rendkívül szűk hőmérsékleti tartományban lehet jelen folyékony halmazállapotban a Marson. Egyes területeken legjobb esetben is 2 °C környékén felforr a folyékony víz.

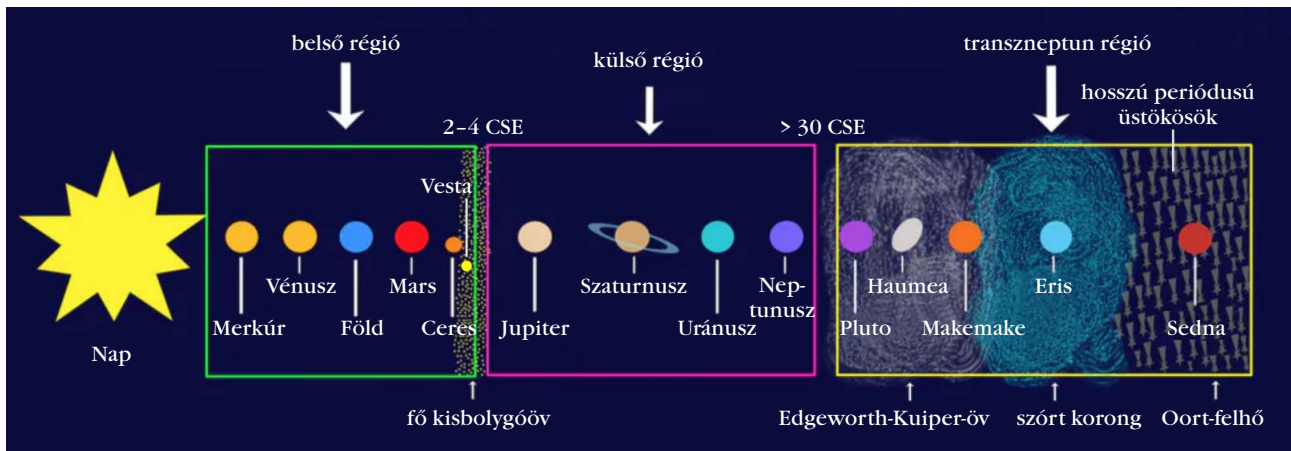
A legnagyobb relatív víztömeget tartalmazó égitesteket a Naprendszer külső régióiban kell keresnünk. A hóhatáron túl a jelentős kőzettesteket az óriásbolygók holdjai képviselik. Az óriásbolygók vízkészlete is számottevő, mégsem tárgyaljuk ezeket, hiszen a víz eredetét az élet aspektusában keressük, ez szilárd felszínű égitesteken könnyebben elképzelhető, mint gázóriások légkörében.

A Galilei-féle holdak közül a Callisto és a Ganymedes tipikus példái a jégből és kőzetből felépülő égitesteknek: összetételük 25-50%-át víz alkotja, amely jég formájában van jelen a hőmérsékleti és nyomásviszonyok miatt. A holdak felszínét több 100 km vastag jégpáncél borítja. Fontos még kiemelni a Jupiter Europa holdját, amelynek felszínét 10-100 km vastag jégpáncél borítja. Azonban a felszín alatt a jégkéregből származó nagy nyomás és a Jupiterrel való gravitációs kölcsönhatásból adódó árapálysúrlódás hatására feltételezhető egy folyékony vízóceán jelenléte. Az Europa óceánjának tömege meghaladhatja a földi óceánok tömegének háromszorosát. Ez azt jelenti, hogy az Europa folyékony vízkészletének tömegaránya közel 8%.

A Galilei-féle holdak tulajdonságait a Galileo űrszonda 1995 és 2003 közötti mérései alapján ismerhettük meg. Nem szabad megfeledkeznünk a Cassini űrszonda küldetéséről. A Szaturnuszt és holdrendszerét tanulmányozó űrszonda Huygens nevű leszállóegysége a Szaturnusz Titan holdján landolt. A Titan is részben kőzetből, részben jégből épül fel. A hold viszonylag sűrű légköre alatt a felszínen folyékony halmazállapotú metán található. A fagyott metán- és vízjég kéreg alatt körülbelül 100 km mélységben folyékony vízóceán található. Becslések szerint a folyékony víz tömege tízszerese is lehet a földi óceánok tömegének.

4. ábra. Az Enceladus feltételezett belső szerkezete [9].





5. ábra. A Naprendszer fontosabb régiói a Naptól mért távolság alapján [10].

Ismereteink szerint a Szaturnusz igen kis méretű Enceladus holdjának felszíne alatt is lehet folyékony vízóceán (4. ábra). Az óceán víztömege csupán százada a földi óceánok tömegének, azonban az Enceladus tömege négy nagyságrenddel kisebb a Földénél. Így az Enceladuson a teljes tömeg 14%-át a folyékony víz alkotja, ezzel a dobogó első helyén áll a relatív víztömeg tekintetében.

A Naprendszer távolabbi peremvidékén a fentiek-nél nagyobb tömegarányt is képviselhet a víz a törpebolygók és egyéb kis méretű kőzettestek, például az úgynevezett Neptunuszon túli (transzneptun) objektumok (TNO, 5. ábra) körében. Azonban az alacsony nyomás és hőmérséklet (légkör és árapályfűtés hiánya) miatt nehezen elképzelhető, hogy a víz cseppfolyós halmazállapotban forduljon elő. A lényeg jól látható a fenti felsorolásból: a Naprendszer hóhatárán belüli égitestek összetételében jelentősen alacsonyabb akár a víz, akár a vízjég tömegaránya, mint a hóhatáron túli kőzettestekben. Így továbbra is kérdés: honnan származik a belső bolygók, köztük a Föld vízkészlete?

A földi víz eredetének magyarázatára két klasszikus elmélet áll egymással látszólagos ellentétben. Elsők között *Morbidelli* és munkatársai [11] voltak azon tábor képviselői, amely szerint a bolygókeletkezés vég-ső aktusát követően aszteroidák és kisbolygók közvetítésével érkezett a víz a Földre. A másik tábor képviselői – köztük *Drake* és *Campins* [12] – szerint a Föld már a kialakulása kezdetétől fogva vízgőzt és fluidzár-ványokat tartalmazó szilikátszemcséket gyűjtött össze, azaz a Föld „nedves” körülmények között keletkezett. Alább látni fogjuk, hogy a két modell valójában kiegészíti egymást.

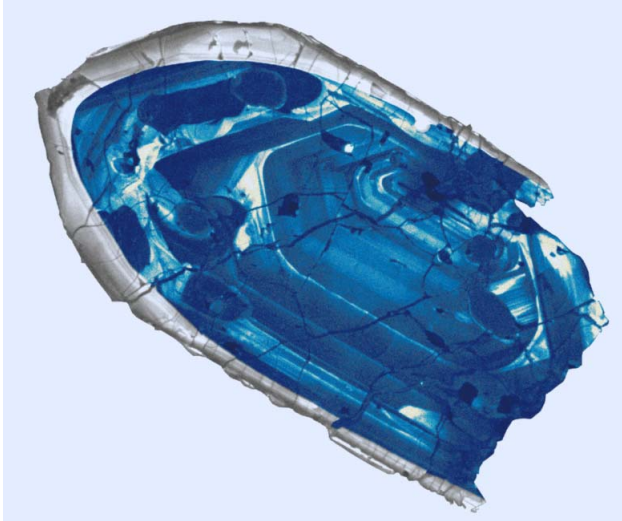
Megérkezik a víz a Földre

Az első csoport elmélete alapján a bolygókeletkezés idején a protoplanetáris korong Naphoz legközelebbi régiójában uralkodó magas hőmérséklet nem tette lehetővé, hogy a Föld akkora vízkészletet gyűjtsön, mint a mai óceánok tömege. Ebből szükségszerűen következik, hogy a Naprendszer hóhatárán túl kelet-

kezett égitestek (például üstökösök, vízben gazdag aszteroidák) szállították a vizet a már kialakult Földre a protoplanetáris korong eltűnése után. Ezt az elméletet erősíti *Gomes* és munkatársai [13] a korai Naprendszer dinamikáját szimuláló számítógépes modellje. Megmutatták, hogy a Jupiter befelé vándorlása által kiváltott aszteroidabombázás során vízben gazdag kisbolygók érkezhettek a belső Naprendszerbe. Ezt az eseményt késői nagy bombázásnak (late heavy bombardment, LHB) szokás nevezni. Az LHB esemény bekövetkezésének idején a Naprendszerben már befejeződött a bolygókeletkezés. Ez alapján valóban elképzelhető, hogy a Föld „száraz” körülmények között keletkezett.

Gomes és munkatársai modellje szerint a vizet szállító aszteroidák jelentős része a 3,8 milliárd évvel ezelőtt bekövetkezett LHB során érkezett a Földre, csaknem félmilliárd évvel a bolygókeletkezés befejeztét követően. Ebben az időben a Földet és a Holdat is szilárd kéreg borította. A Holdon csak a szilárd kéreg-be történő becsapódások által maradhattak fenn a bombázási esemény nyomait megőrkítő kráterek. Az egykori LHB lehetősége éppen a holdi kráterszám-lás és a kráterek korának meghatározása kapcsán merült fel. A bolygókeletkezés melléktermékeiként fennmaradt törmelékek folyamatosan bombázzák a belső bolygókat és a Holdat. Emberi időskálán nézve viszonylag ritkák a jelentős becsapódások (tízezer éves nagyságrend), azonban geológiai időskálán gyakorinak tekinthetők. Tektonikai mozgások és légkör hiányában a becsapódási kráterek rendkívül hosszú ideig fennmaradhatnak a Hold felszínén. Ez alapján az újonnan megjelenő kráterek számának időben egyenletesen növekednie kellene. Ezzel szemben a holdkráterek számának időbeli eloszlásában egy kiugróan magas csúcs tapasztalható a 3,8 milliárd évvel ezelőtti időszakban. Ezt számos tanulmány, például [13, 14] az LHB eseménnyel magyarázza.

A szilárd földkéreg kialakulásának időpontja néhány különleges kőzetminta segítségével meghatározható. A Nyugat-Ausztráliában található Jack Hills területéről származó kőzetminták igen ősi cirkont tartalmaznak (6. ábra). Az eddig ismert legkorábban kiala-



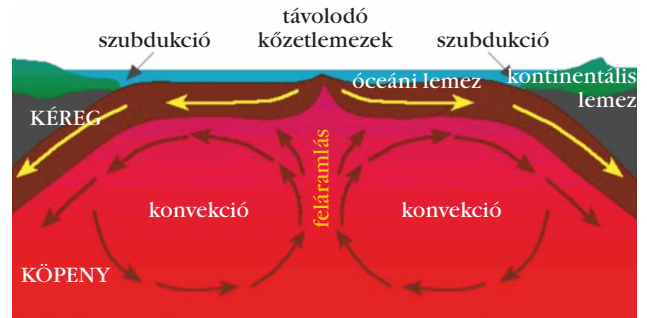
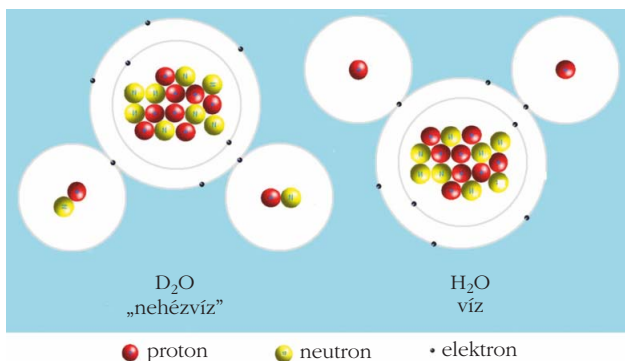
6. ábra. A legősibb ismert cirkonkristály hamisszínes mikroszkópos felvétele [15].

kult cirkon 4,37 milliárd éves. Ezek az ásványok igazolják, hogy 4,37 milliárd évvel ezelőtt a Föld felszíne már kellőképpen lehűlt a szilárd kéreg kialakulásához. A cirkon keletkezéséhez fejlett kéreganyag szükséges, amely feltételezi a kéreglemezek mozgásáért felelős konvekciós folyamat beindulását a földköpenyben (7. ábra). A konvekció során egyes kéreglemezek alábuknak a földköpeny magmájába, amit szubdukciónak nevezünk. Míg más területeken az egymástól távolodó lemezek szegélye gyarapodik a köpenyből feláramló és a felszínen megszilárduló lava által.

Watson és Harrison [17] szerint a lemeztektonika nem működhetne globális vízburok nélkül. A víz ugyanis jelentős szerepet játszik a konvekció fenntartásában: a víz csökkenti a magma viszkozitását és olvadáspontját. Mindez azt jelenti, hogy a földtörténet igen korai szakaszában, már az LHB előtt is jelentős vízkészletnek kellett lennie a Földön. A földköpenyben ma is számottevő, akár 10 óceántömeget kitevő víz is jelen lehet [18].

Mojzsis és munkatársai [19] a legősibb cirkonásványokat kémiai elemzésnek vetették alá. Az ásványok stabil oxigénizotópjainak aránya ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) is megerősíti, hogy már igen korán kialakulhatott a szilárd földkéreg, amelynek felszínén cseppfolyós halmazállapotú víz lehetett jelen. A mintákban kimutatható jelentős

8. ábra. A D_2O és a H_2O molekula atomjainak szerkezete [21].



7. ábra. A kéreglemezek mozgásáért felelős konvekció sematikus vázlatja [16].

^{18}O nyom arra utal, hogy a kőzetek nedves üledék-képződési folyamat során alakultak ki. A vizes környezetben keletkezett üledékes kőzetek lerakódtak a kőzetlemezek felszínén egy ősi óceán fenekén. Majd a lemez szubdukciója során a földköpeny magmája magába fogadta az üledékes kőzetet, így jöttek létre a cirkon ásványok. *Elkins-Tanton* [20] szerint mindez arra utal, hogy a Föld valójában nem „szárazon” keletkezett, hanem kialakulása során gyűjtötte össze vízkészletét. Ez azonban nem zárja ki annak lehetőségét, hogy az LHB során is érkezhetett víz a Földre.

Egyes elméletek szerint a Föld vízkészletében mérhető deutérium és hidrogén aránya (D/H) lehet a kulcs az óceánok eredetének kiderítésében. A deutérium a hidrogén olyan izotópja, amelynek atommagjában egy proton és egy neutron található, ezért a deutérium atomtömege nagyobb, mint a hidrogéné. Előfordulhat, hogy a H_2O molekulában a hidrogén helyét átveszi a deutérium. A HDO molekula esetén hidrogén és deutérium, míg a D_2O -nál csupán deutérium van jelen az oxigén mellett (8. ábra). Azt a folyadékot, amelyben a D_2O molekulák jelentős hányadot képviselnek, „nehézvíznek” szokás nevezni. A jelenlegi földi vízkészlet D/H arányát összehasonlítva a Naprendszer egyéb részeiben fellelhető víz D/H arányával képet kaphatunk arról, mely területekről származhatnak a földi óceánok. *Geiss és Gloeckler* [22] szerint a Naprendszer bölcsőjéül szolgáló sűrű felhőmagban a D/H arány $0,21 \cdot 10^{-4}$ lehetett. A földi óceánokra a jelenlegi D/H arány ennél magasabb, $1,49 \cdot 10^{-4}$. Azonban a földi D/H arány idővel változhatott, ugyanis az ősi, elsődleges földi légkör nagy része elveszett. A légkörből az alacsonyabb atomtömegű hidrogén könnyebben megszökhet, mint a deutérium, ezért idővel a földi D/H arány növekedhetett. Ebből adódóan a mai földi vízkészlet D/H aránya magasabb, mint a Föld keletkezése idején, a korai Naprendszerben lehetett.

Tegyük fel, hogy a földi vízkészlet egy része külső forrásból származik, vagyis aszteroidák szállították a Földre a bolygókeletkezés befejeződését követően. Ebben az esetben a Földön és az aszteroidákon vagy üstökösökön mért D/H arálynak egyeznie kellene. A Giotto űrszonda 1986-ban megközelítette a Halley-üstökösöt, amikor az legutóbb a Naprendszer belső részében tartózkodott. Az üstökös anyagából gyűjtött mintákban $3,1 \cdot 10^{-4}$ a mért D/H arány. Más üstököshöz (Hyakutake, Hale-Bopp) hasonlóan a mért

D/H arány nagyjából a duplája a földi értéknek. Az üstökösök esetén nehezen elképzelhető, hogy idővel változott volna a D/H arány, ugyanis ezek a legkorábban kialakult égitestek közé tartoznak, amelyek a Naprendszer keletkezése utáni állapotot konzerválják. Az üstökösök főleg a Naprendszer legkülső régiójában fordulnak elő, ebben a távolságban igen alacsony lehet az égitestek hőmérséklete. Roberts és Millar [24] modelljei alapján azokban a környezetekben, ahol 50 K-nél alacsonyabb a hőmérséklet, a D/H arány viszonylag magas, 0,001–0,01 lehet. A közeli fiatal csillagokat körülvevő anyag mérései is ezt támasztják alá. A protoplanetáris korongok belső régióiban a magas hőmérséklet miatt gyors izotópcseré-reakciók¹ zajlanak a hidrogéntartalmú vegyületek között, ennek eredményeként a belső régiókban alacsony D/H arány alakul ki. Emiatt tapasztalható az, hogy az egykori protoplanetáris korong Naptól távolabbi, alacsonyabb hőmérsékletű területein létrejött üstökösökön relatíve magas a D/H arány, vagyis a külső régiókból származó üstökösök nem szállíthatták a Földre az óceánok vizét.

A fő kisbolygóöv aszteroidái mint lehetséges források

Az üstökösöknél közelebb keringő, de a Naprendszer hóhatárán túl keletkezett aszteroidák is szóba jöhetnek a vízkészlet lehetséges külső forrásaiként. Az LHB során a Jupiter jelentős számú közettörmelék pályáját perturbálta a Naprendszerben található fő kisbolygóövben, emiatt a kisbolygók elhagyták eredeti pályájukat. Kezdetben egy kiterjedt összefüggő törmelékörong lehetett jelen a Naprendszerben a Mars pályája és a rendszer külső határa között. Az óriásbolygók hatására ez a korong nagyrészt kiürült, és kevésbé összefüggő gyűrűkre bomlott. A fő kisbolygóöv az egyik ilyen maradványgyűrű, amelynek jelenlegi kiterjedése 2–4 CSE közé tehető (5. ábra), és tömege becslések szerint az egykori gyűrű tömegének ezredrésze ($\sim 5 \cdot 10^{-4}$ földtömeg).

A perturbált aszteroidák egy része a Naprendszer belső régiói felé szóródott. A Föld pályáját keresztező kisbolygók a Földdel ütközve vizet szállíthattak a felszínre. A főövbeli származó kisbolygók esetén a D/H arány jóval közelebb áll a földihez, mint az üstökösökben. Ezen kisbolygók számottevő hányadát az úgynevezett szenes kondritok adják, amelyeken $1,4 \cdot 10^{-4}$ az átlagos D/H arány. A fő kisbolygóöv második legnagyobb aszteroidájáról, a Vestáról származó meteoritok tanulmányozása rávilágított, az aszteroidák D/H aránya közelítőleg hasonló a földköpenyből származó mintákéhoz. A köpeny mélyebb részeiből származó minták azért fontosak, mert ezek szolgáltatják a Földön elérhető legősibb adatokat a D/H arányra. Rendkívül kevés olyan helyet ismerünk, ahol tanulmányozhatók a köpeny mélyebb régióinak kőzetei, ilyenek például a hawaii vulkánok kráterei és a

¹Nem játszódik le kémiai folyamat két molekula között, csupán az izotópok cserélődnek ki.



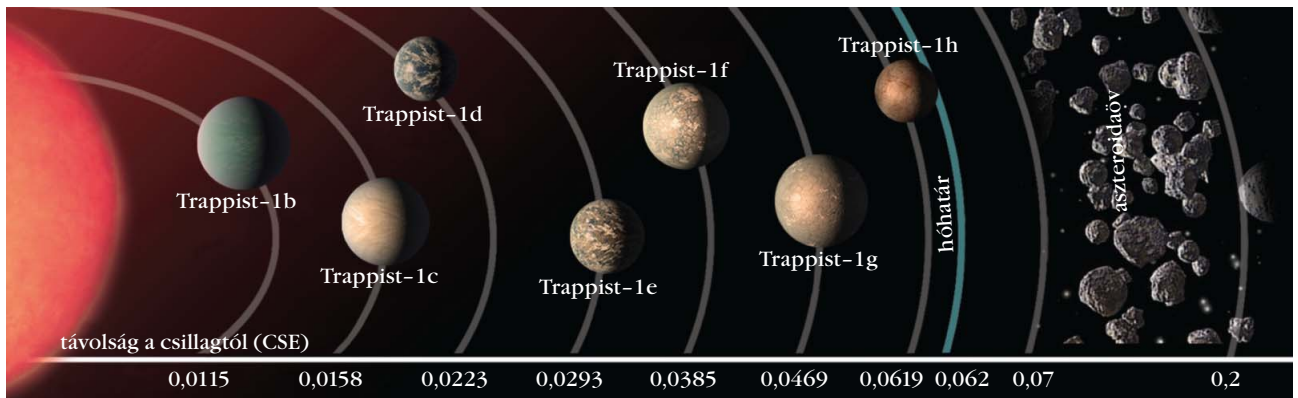
9. ábra. Zöld olivinkristályok megkövesedett lágában [23].

Kanada északkeleti partvidékén található Baffin-sziget. A szigetről begyűjtött kőzetmintákban található hidrogéntartalmú olivinkristályok a Föld keletkezése során szilárdultak meg, és megőrizték a korabeli D/H arányt (9. ábra). Itt fontos megjegyezni, hogy a D/H arány mérése nem feltétlenül szabad víz- vagy jégmintából történik. A fiatal csillagok körüli protoplanetáris korong esetén a H₂ molekulákat vizsgálják színkép-elemzéssel. A Földön és az üstökösök esetén közvetlen mintagyűjtéssel jellemzően a H₂O molekula arányát vizsgálják, míg aszteroidáknál a hidroxilcsoport (-OH) zárványait elemzik ásványokban. A Vesta esetén az apatitásványok szerkezetében kötött víz D/H arányát mérték meg.

Az eredményeket összevetve nincs teljes egyezés az aszteroidákon és a Földön mért D/H arány között, az átlagos eltérés körülbelül 25%. Ez azt jelenti, hogy a földi óceánok vízkészlete nem származhat teljes egészében aszteroidáktól. Ugyanezt erősíti meg számos elmélet és az LHB modellezése, amelyek alapján az óceánok vízkészletének legfeljebb 1-10%-át szállíthatták aszteroidák a Földre. Eszerint kijelenthető, hogy a Föld nem teljesen száraz körülmények között keletkezett, kialakulása során már jelentős mennyiségű vizet összegyűjtött. Az ásványokban megkötött víz a kéreg megfelelő mértékű lehűlése után a földköpenyből vulkanizmus révén kerülhetett a felszínre, illetve a légkörbe.

Alternatív elméletek a kőzetbolygók vízkészletének eredetére

Napjaink exobolygó-felfedezései alapján egyre változatosabb bolygórendszerek létezésére derül fény. Ezzel egyidejűleg a bolygókeletkezési elméleteket is fejleszteni kell ahhoz, hogy meg tudjuk magyarázni a különféle bolygórendszerek kialakulását. A csillagok fénygörbe-analízisén alapuló tranzitmódszerrel számos Föld-szerű bolygót fedeztek fel kis tömegű, hideg, vörös törpecsillagok körül. Az egyik legismertebb példa



10. ábra. Az ismert TRAPPIST-1 rendszer és egy feltételezett aszteroidaöv a hóhatáron túl [25].

erre a TRAPPIST-1 rendszer (10. ábra), amelyben 7, közel földtömegű kőzetbolygó kering a központi csillag körül [26]. A legkülső bolygót leszámítva az összes bolygó a rendszer hóhatáránál jelentősen közelebb kering a csillaghoz. A bolygólegkörök színképelemzése alapján legalább négy bolygó esetén feltételezhető légköri víz jelenléte [27]. Ebben az esetben is felvetődik a kérdés: hogyan kerülhetett víz a bolygókra.

A TRAPPIST-1 rendszer igen kompakt, a bolygópályák egymáshoz szorosan közel helyezkednek el. Egyes szomszédos bolygópályák a Föld–Hold-távolságnál is közelebb helyezkednek el egymáshoz. Ahhoz, hogy egy ilyen rendszer hosszú időn át stabil maradjon, a bolygóknak egymással középmozgás-rezonanciában kell keringeniük. Ez azt jelenti, hogy a bolygók keringési periódusainak aránya kis egész számok hányadosa. A rezonancia lehetővé teszi a szoros megközelítések elkerülését, ami a rendszer széteséséhez vezetne. Luger és munkatársai [28] szerint a TRAPPIST-1 és a hozzá hasonló kompakt rendszerek bolygói a jelenlegi pályájuktól távolabb keletkeztek. A TRAPPIST-1 rendszerben a bolygókeletkezés a hóhatáron túl kezdődhetett. A bolygók innen vándoroltak a csillag felé millió éves időskálán, majd egy rezonancia-láncot alkotva elfoglalták jelenlegi pályájukat. A gyarapodó fiatal bolygók vándorlásuk során gyűjthették össze vízkészletük jelentős hányadát, vízben gazdag bolygócsírákkal és aszteroidákkal való gyakori ütközések révén. Ez azonban nem zárja ki annak lehetőségét, hogy egy késői heves aszteroidabombázás szállította a bolygók felszínére a víz egy részét [29].

Habár a Föld nagy valószínűséggel a jelenlegi pályája közelében keletkezett, mégis elképzelhető, hogy gazdag víztartalmú bolygócsírákkal ütközhetett a kialakulása során. Peslier és munkatársai [30] szerint a Naprendszer hóhatára közeléből érkező jeges bolygócsírák elnyelésével kerülhetett víz a fiatal Földre. Csúpn néhány ilyen gazdag víztartalmú bolygócsírával történő ütközés elegendő lehetett a földi óceánok vízkészletének biztosításához (lásd a hóhatáron túli holdak „Szárason” vagy „nedvesen” keletkeznek a bolygók? fejezetben bemutatott vízkészletét). Az ütközésekre a Föld kialakulásának végső fázisa idején kerülhetett sor, amikor bolygónk a mai tömegének 60-90%-át elérte.

A Hold kialakulása is egy hasonló ütközési eseményhez köthető: jelenlegi modelljeink szerint egy Mars-méretű bolygócsíra ütközhetett a fiatal Földdel. Az ütközés következtében a Földből kiszakadt törmelék összeállásával jöhetett létre a Hold. Ha a földfelszínen ekkor már volt folyékony víz, az ütközés hője miatt annak el kellett párolognia. Ebből adódóan a mai vízkészletet valamilyen forrásból pótolni kellett. Erre az egyik lehetséges magyarázat az előbb említett fejezetben felvázolt elmélet, amely szerint a víz vulkanizmus útján került a földkéropenyből ismét a felszínre és a légkörbe. Maga a becsapódó bolygócsíra is jelentős vízmennyiséget szállíthatott a Földre, ha a hóhatáron túlról érkezett.

Összegzés: a földi óceánok legvalószínűbb forrása

A csillagközi anyag vizsgálata alapján a víz az óriás molekulafelhőkben vízgőz, de akár jégkristályok formájában is előfordulhat. A sűrű felhőmagokból keletkező fiatal csillagok körül kialakuló protoplanetáris korongok is tartalmaznak vizet. A csillaghoz közeli régiókban a magas hőmérséklet miatt a víz főleg gáz halmazállapotú, míg távolabb jég formájában van jelen. Ez az elkülönülés jól tükröződik a protoplanetáris korongban kialakuló kőzetbolygók kőzet–jég összetételében: a csillaghoz közeli kőzetbolygókon a víz (jég) aránya alacsonyabb, mint a távolabbi bolygók, holdak esetén.

A Naphoz relatíve közel keringő Föld esetében máig sem tudjuk pontosan, hogyan és mikor keletkeztek az óceánok, hogyan került a víz a Földre a csillag körüli korongból. Ennek magyarázatára számos elméletet láthatunk. A legvalószínűbb elmélet szerint a következőképpen foglalható össze a földi óceánok keletkezése (lásd az első belső borítót [31]).

1. A fiatal Föld nagyobb kőzettömbök és bolygócsírák elnyelésével növekszik. A növekedés hője miatt a bolygó teljes anyaga olvadt magma. A földkéropeny ekkor már tartalmaz némi vizet.

2. A fiatal Föld anyaga sűrűség szerint rétegződött, a legsűrűbb elemek a középpontban koncentráálódnak. Kialakul a Föld magja. Eközben továbbra is vál-

tozatos méretű bolygócsírákat nyel el a Föld. A legtöbb víz a köpenyben található kötött formában, ásványi zárványokban.

3. Egy Mars-méretű bolygócsíra ütközik a Földdel. Ennek hatására a földi légkör és a vízkészlet nagy része elvész. A kirepülő közettörmelékéből később összeáll a Hold.

4. Száraz kéreg képződik a köpeny külső rétegéből. Vulkáni kigőzölgés és a szórványosan becsapódó aszteroidák révén újraképződik a légkör.

5. A földkéreg megfelelően hideg és szilárd, elindul a lemeztektonika. Megjelenik a felszínen a folyékony víz. A másodlagos légkörből kicsapódó víz tengerekbe gyűlik.

6. Az óriásbolygók vándorlásának hatására a bolygókeletkezés melléktermékeiként megmaradt jeges aszteroidák és üstökösök nagy számban szóródnak a belső Naprendszer felé. Közülük sokan ütköznek a Földdel, ezáltal vizet és más, az élet számára fontos elemeket, molekulákat szállítva a felszínre.

7. A heves bombázási eseményt követően a Föld felszíne lehűl, a légkörből jelentős mennyiségű víz csapódik ki, létrehozva a globális vízóceánt. Az óceánfenéki vulkanizmus során a felszínre törő láva kihűl és megszilárdul. A láva folyamatos utánpótlása lehetővé teszi a kontinensek gyarapodását.

8. Kialakul a szárazföldek és a vízzel borított felszín mai aránya.

A folyamatos mintagyűjtésnek és kémiai elemzésnek, az űrtávcsöves megfigyeléseknek, valamint a számítógépes numerikus modellezésnek köszönhetően egyre közelebb juthatunk a fenti kérdések megválaszolásához. Lehet, hogy az újabb kutatások olyan elméleteket és modelleket eredményeznek, amelyek jobban egyeznek a mérésekkel, mint a jelen cikk keretében felvázolt teóriák. A földi víz eredetének megismerése választ adhat arra is, jelen lehet-e más bolygókon, exobolygókon is az általunk ismert élet kialakulása és fejlődése számára nélkülözhetetlen folyékony víz.

Irodalom

1. Lovelock J.: *Gaia: A New Look at Life on Earth*. Oxford University Press (1979).
2. Kereszturi Á.: *Asztrobiológia*. Magyar Csillagászati Egyesület (2011).
3. Van 't Hoff M., <https://www.merelvanthoff.com>
4. Toogood O., <http://www.alevelphysicsnotes.com/astrophysics/deadstars.php>
5. de Souza Torres K., Cabo Winter O., arXiv:1803.01452 (2018).
6. Pontoppidan K. M. és mtsai., *Protostars and Planets VI*. eds. H. Beuther et al., Univ. of Arizona, Tucson (2014) 363.
7. <https://futurism.com/is-earth-actually-water-deficient-2>
8. Petrovay K., in *Meteor Csillagászati Évkönyv*, MCSE, Budapest (2008) 207.
9. <https://www.bbc.com/news/science-environment-39592059>
10. <https://www.shutterstock.com/hu/image-illustration/solar-system-planets-dwarf-ones-their-575550817>
11. Morbidelli A. és mtsai., *Meteoritics & Planetary Science* 35 (2000) 1309.
12. Drake M. J., Campins H., in *Asteroids, Comets, Meteors, Proc. IAU Symp.* (2006) 229, eds. D. Lazzaro et al., 381.
13. Gomes R. és mtsai., *Nature* 435 (2005) 466.
14. Ryder G., *Journal of Geophysical Research (Planets)* 107(2002) E4, id. 5022.
15. Valley J., <http://www.sci-news.com/geology/science-jack-hills-zircon-oldest-known-fragment-earth-01779.html>
16. <https://slideplayer.com/slide/8897263/>
17. Watson E. B., Harrison T. M., *Science* 308 (2005) 841.
18. Karato S.-ichiro és mtsai., *Progress in Earth & Planetary Sciences* 7 (2020) 76.
19. Mojzsis S. J. és mtsai., *Nature* 409 (2001) 178.
20. Elkins-Tanton L. T., *Astrophysics & Space Science* 332 (2011) 359.
21. <http://vleeprotronz.blogspot.com/2011/05/now-for-sale-on-ebay-heavy-water.html>
22. Geiss J., Gloeckler G., *Space Science Rev.* 84 (1998) 239.
23. Rae S., <https://astronomy.com/magazine/2019/04/where-did-earths-water-come-from>
24. Roberts H., Millar T. J., *Astronomy & Astrophysics*, 361 (2000) 388.
25. Došović V. és mtsai., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 499 (2020) 4626.
26. Gillon M. és mtsai., *Nature* 542 (2017) 456.
27. de Wit J. és mtsai., *Nature Astronomy* 2 (2018) 214.
28. Luger R. és mtsai., *Nature Astronomy* 1 (2017) 0129.
29. Dencs Z., Regály Z., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 487 (2019) 2191.
30. Peslier A. H. és mtsai., *Space Science Rev.* 212 (2017) 743.
31. Jewitt D., Young E. D., *Scientific American* (2015. március) 36.

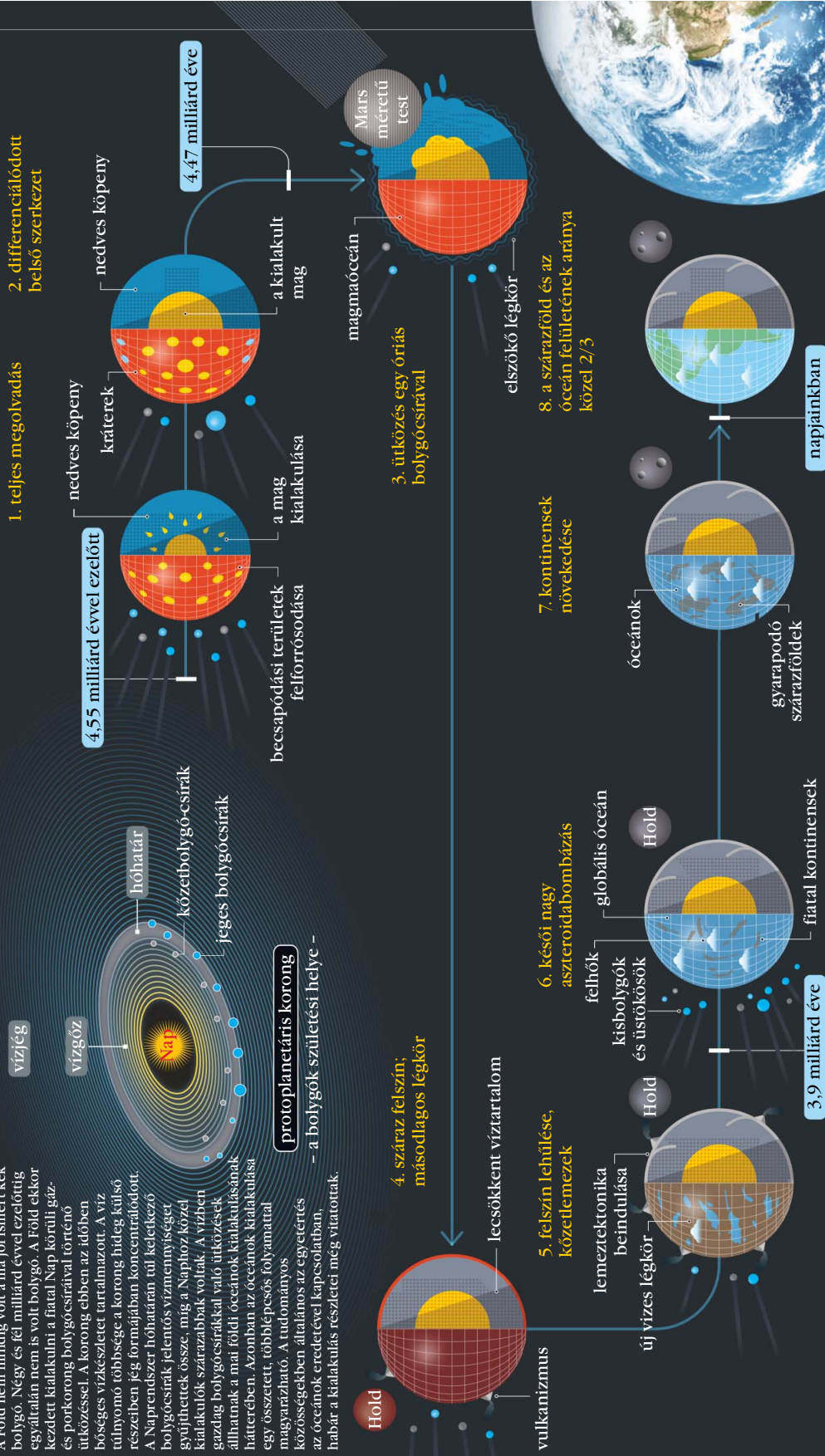
SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!



**Támogasd jövedelemadód
EGY százalékkal
az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot!**
Adószámunk: 19815644-2-43

A Föld keletkezése és az óceánok lehetséges eredete - Dencs Zoltán cikkéhez

A Föld nem mindig volt a ma jól ismert kék bolygó. Négy és fél milliárd évvel ezelőttig egyáltalán nem is volt bolygó. A Föld ekkor kezdett kialakulni a fiatal Nap körüli gáz- és porkorong bolygócsíráival történő ütközéssel. A korong ebben az időben hőseges vízkészletet tartalmazott. A víz túlnyomó többsége a korong hideg külső részében jég formájában koncentrálódtott. A Naprendszer hóhatárán túl keletkező bolygócsírák jelentős vízmennyiséget gyűjtöttek össze, míg a Naphoz közel kialakultok szárazabbak voltak. A vízben gazdag bolygócsírákkal való ütközések állhattnak a mai földi óceánok kialakulásának hátterében. Azonban az óceánok kialakulása egy összetett, többlépcsős folyamattal magyarázható. A tudományos közösségekben általános az egyetértés az óceánok eredetével kapcsolatban, habár a kialakulás részletei még vitatottak.



Az ábra forrása: <http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/papers/2015/JY15.pdf>