

# FELSZÍN ALATTI VIZEK NAPRENDSZERBELI ÉGITESTEK BEN

Takácsné Farkas Anikó – MTA CSFK Csillagászati Intézet és Eötvös Egyetem, TTK  
Kiss Csaba – MTA CSFK Csillagászati Intézet

*Az űrből nézve Földünk legfeltűnőbb jellegzetességei a csodálatosan kék tengerek és óceánok. A folyékony víz, ami ezeket a tengereket és óceánokat alkotja, az élet alapja a Földön. Szorosabb vagy tágabb kozmikus környezetünkben a Földön kívüli életet kutatva általában a földihez hasonló körülményeket, elsősorban folyékony vizet keresünk. Jelenlegi eszközeinkkel közvetlenül csak a Naprendszer égitestjeit tudjuk vizsgálni. Vannak arra utaló jelek, hogy folyékony víz létezhetett a Marson, azonban biztosak lehetünk benne, hogy jelen pillanatban a Föld az egyetlen égitest a Naprendszerben, aminek felszínén folyékony vizet találunk.*

*Valóban le kell mondanunk arról, hogy a Naprendszerben az élet számára alkalmas helyszíneket találjunk, ha az élet kialakulásának feltételül mindenképpen a folyékony víz létezését szabjuk? Az égitestek felszíne az egyetlen hely, ahol folyékony vízre számíthatunk?*

A belső Naprendszer – a Jupiter pályáján belül – alapvetően „száraz” hely, csak néhány olyan kivételes égitestet találunk, amelyen jelentős mennyiségű víz fordulna elő (szerencsénkre Földünk ilyen). Kifelé haladva azonban – a Jupiter körül és azon túl – a szilárd felszínű égitestek többségének jelentős összetevői a különféle illó anyagok jegei, köztük a vízjég. Ezek az anyagok nemcsak megjelennek a felszínen, hanem nagy valószínűséggel jelentős részben ezek alkotják magukat az égitesteket is. Erre legegyszerűbben az ismert átlagsűrűségekből lehet következtetni, amelyek a külső Naprendszerben jóval alacsonyabbak, mint a belső vidékeken. Ez így van még olyan nagyméretű

égitestek esetén is, amelyeket a gravitáció közel gömb alakúvá tudott formálni, s ezért kizárható, hogy csak a belső Naprendszert felépítőekhez hasonló kőzetekből álljanak, belsejükben hatalmas üregekkel.

A külső Naprendszer égitestjeinek felszínén nem lehet folyékony víz, részben a légkör hiánya (közel vákuumban a víznek nincsen cseppfolyós halmazállapota), részben pedig az alacsony hőmérséklet miatt. Már a Jupiter távolságában is körülbelül 130 K (–140 °C) lenne egy légkör nélküli égitest felszíni hőmérséklete, ennél távolabb, a Neptunuszon túli vidéken pedig a felszíni hőmérséklet már a 30–50 K tartományában van. A nagyobb égitestek belsejében azonban a hőmérséklet természetesen nem ilyen alacsony. A Föld belsejéhez hasonlóan a Naprendszer égitestjei is minden bizonynyal tartalmaznak lassan bomló radioaktív elemeket, ahogyan arra a meteoritok elemzéséből is következtethetünk. Amennyiben egy égitest kialakulásakor a belső hőmérséklet elég magas volt, akkor az égitest differenciálódott, azaz a nehezebb (kőzet)komponensek az égitest középpontja felé süllyedtek, a könnyebb (jég)komponensek pedig az égitest külsőbb rétegeit hozták létre. Az így kialakult kőzetmagban a radioaktív elemek (elsősorban az urán 235-ös és 238-as, a tórium 232-es, illetve a kálium 40-es izotópja) jelentős mennyiségű hőt tudnak termelni. Elegendően nagy kőzetmag esetén ez a hő akkora lehet, hogy a kőzetmag határán a hőmérséklet meghaladhatja a felső jégréteg olvadáspontját, ami egy cseppfolyós halmazállapotú réteg, egy felszín alatti óceán létrejöttéhez vezethet. Ilyen óceánt sejtünk például a Jupiter Europa és Ganymedes holdjainak felszíne alatt. A becslések szerint az itt található víz mennyisége jelentősen meghaladhatja akár a Földön található összes vizét is. A radioaktív bomlás mellett az óriásbolygók holdrendszereiben nagy jelentősége van az árapályfűtésnek is, annak a belső súrlódásból származó hőnek, amelyet az óriásbolygók gravitációs tere okoz a holdak belsejében. Valószínűleg az árapályfűtés a fő hajtó mechanizmusa például a Szaturnusz Enceladus holdján megfigyelhető kriovulkanikus aktivitásnak, ahol a felszín alól folyamatosan anyag, legnagyobb valószínűséggel vízgőz áramlik ki és távozik a Szaturnusz körüli térségbe. (Az Enceladus túl kicsi ahhoz, hogy a radioaktív bomlás egyedül képes legyen elegendő hőt termelni egy felszín alatti folyékony óceán fenntartásához.) A Cassini szonda 2015 októberének végén átrepült a déli sark feletti kifújásokon, így hamarosan azt is megtudhatjuk, hogy valójában milyen az összetétele az innen származó anyagnak.

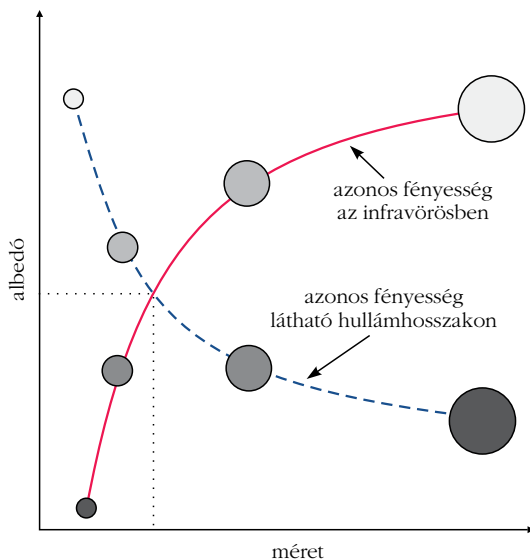
Az óriásbolygók (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz) rendszereiben található holdakat viszonylag jól ismerjük, ezekben a rendszerekben több űrszonda is végzett olyan gravitációs méréseket, amelyekből következtetni tudunk ezen égitestek belső



Takácsné Farkas Anikó ötödéves csillagász MSc hallgató az ELTE TTK-n, 2013-ban szerzett földtudományi szakirányú BSc fokozatot, jelenleg diplomamunkáját írja Kiss Csaba támogatásával a Neptunuszon túli égitestek belső szerkezetének modellezéséből.



Kiss Csaba az MTA CSFK Csillagászati Intézetének tudományos főmunkatársa, a Naprendszerkutató csoport vezetője. Érdeklődési területe elsősorban a Naprendszer kis égitestjeinek – a porszemektől a törpebolygóig – termális infravörös hullámhosszakon történő megfigyelése. 2004 óta vezeti az intézetben a Herschel űrtávcső csoportot.



1. ábra. A radiometriai módszerek működési elve. A látható tartományban észlelt fényességhez különböző méret és albedó tartozhat, ezeket a lehetséges értékeket az ábrán a szaggatott görbe köti össze. Ugyanezen égitesthez az infravörösbeli mérések alapján más méret- és albedókombinációk rendelhetők, ezeket a folytonos görbe pontjai jelölik. A két görbe metszéspontja megadja az égitest valódi méretét és albedóját.

szerkezetére. Legutóbb például a Cassini űrszonda repült el a Szaturnusz Dione, Enceladus és Titan holdjainak közvetlen közelében.

Nemcsak az óriásbolygók holdjai adhatnak otthont ilyen felszín alatti óceánoknak. A Neptunuszon túli térségben található a Naprendszer külső kisbolygó-öve, amelyre általában Kuiper-övként szoktak hivatkozni. Részben erről a vidékről, részben pedig a még távolabbi Oort-felhőből származnak az időnként a Naprendszer belső vidékein, a Föld közelében is megfigyelhető üstökösök, amelyekről tudjuk, hogy nagyrészt fagyott illő anyagokból, ezek között is jelentős részben vízből épülnek fel. Az üstökösöket – leginkább viszonylag kis méretük miatt – csak akkor tudjuk megfigyelni, ha a Nap közelébe kerülnek, de a nagy távolság ellenére ma már majdnem kétezer nagyobb égitestet ismerünk itt, a Naprendszer külső vidékein. Ezek között a jeges égitestek között vannak olyanok is, amelyek elég nagyok ahhoz, hogy belsejükben felszín alatti óceán alakulhasson ki. A legjobb jelöltek erre természetesen a Kuiper-öv legnagyobb képviselői, a külső Naprendszer törpebolygói, a Pluto, az Eris, a Makemake és a Haumea. Ezek közül, hála a New Horizons űrszondának ma már elég jól ismerjük a Pluto rendszerét. A New Horizons mérései alapján nagyon valószínű, hogy a Pluto felszínét ma is aktívan alakítja a kriovulkanikus tevékenység, azaz a felszín alól folyamatosan vagy epizódyszerűen kiáramló anyag. Az itt megfigyelt rendkívül fiatal (5 millió évnél fiatalabb), nagy kiterjedésű, friss „hóval” borított területek valószínűleg ilyen kriovulkanikus események eredményei lehetnek.

Annak megbecsléséhez, hogy a Naprendszer külső vidékein potenciálisan hány égitesten lehet felszín alatti óceán, először is ismernünk kellene ezen égitestek

tek legfontosabb fizikai paramétereit, elsősorban méretüket és tömegüket. Ez általában nem egyszerű feladat, mert a nagy távolság miatt földi távcsövekkel ezeket az égitesteket nem tudjuk felbontani, azok a legtöbb esetben pontszerűnek látszanak – így viszont nem tudjuk eldönteni, hogy ugyanaz a fényesség egy kicsi, de fényes, vagy egy nagy és sötét égitest felszínéről érkezik-e hozzánk (1. ábra).

Egy kisbolygó méretét meg tudjuk határozni csillagfedésekből, azaz amikor az égitest elvonul egy háttércsillag előtt. A fedés időtartamából meg tudjuk mondani, hogy mekkora volt a fedő égitest az átvonulás irányában, hiszen az égitest pályáját és így az átvonulás sebességét ismerjük. Több ilyen „húr” mentén észlelve a fedést, képet kaphatunk az égitest alakjáról is. A csillagfedés nagyon hatékony és izgalmas módszer, de sajnos az ilyen fedések nem igazán gyakoriak, és nehéz is azokat pontosan előre jelezni. Ezért csak kevés, nagyjából egy tucatnyi Kuiper-övbéli égitest méretére vannak csillagfedéseken alapuló információink. A módszerek másik csoportja, amelyeket összefoglalóan radiometriai módszereknek szoktunk nevezni, az égitestek hősugárzását hívják segítségül. Az égitestekre a Naphól érkező fény egy részét az égitest felszíne visszaveri (ezt tudjuk megfigyelni a látható fény hullámhosszain), egy másik részét viszont elnyeli, és hősugárzásként infravörös hullámhosszokon fogja visszasugározni. Míg látható tartományban ugyanazt a fényességet tudja produkálni egy kicsi, de fényes felszínű, és egy nagy, de sötét felszínű égitest, ez az infravörösben éppen fordítva van: egy kicsi és sötét égitest tud ugyanynyi hőt kisugározni, mint egy nagy és fényes, mivel egy fényes felszínű égitest adott nagyságú felületen kevesebb hőt tud elnyelni, mint egy sötét (lásd az 1. ábrát). Tehát, ha az égitest látható fénye mellett hősugárzását is megmérjük, akkor meg tudjuk mondani, hogy mekkora a test átmérője.

A ma rendelkezésre álló legnagyobb adatbázis, amely megbízható méreteket tartalmaz Kuiper-övbéli égitestekre és nagyrészt a Jupiter és a Neptunusz pályája között keringő kentaurokra, a Herschel-űrtávcső mérésein alapul. A „TNOs are Cool” nevű program a Herschel-űrtávcső egyik legnagyobb kulcsprogramja, amelynek keretein belül mintegy 140 égitest méretét és albedóját sikerült meghatározni, ami az ismert Neptunuszon túli égitesteknek mintegy 10%-a. Ezen adatbázis jelentősége nemcsak az, hogy ismerjük az egyedi égitestek méretét, hanem ezek alapján bizonyos populációkban meg tudjuk határozni a méreteloszlást is. A méreteloszlás – ahogyan azt neve is mutatja – arról tájékoztat minket, hogy ha ismerjük valahol például az 1000 km-es égitestek számát, akkor abból meg tudjuk mondani, hogy hány 100, vagy 10 km-es égitestet várhatunk ugyanebben a populációban. A méreteloszlás nagyon fontos jellemzője az egyes kisbolygó-populációk ütközési történetének, azaz hogy mi történt ezekkel a kisbolygókkal a Naprendszer keletkezése óta eltelt 4,6 milliárd év alatt.

Ha az égitestnek kísérője is van, akkor annak pályájából és a keringési időből a rendszer teljes tömege, a méret ismeretében pedig az átlagsűrűsége is meghatározható. Az ilyen ismert kettős rendszerek méret-sűrűség összefüggése alapján az is becsülhető, hogy mennyi egy ismert méretű égitest várható sűrűsége, ha egyébként annak tömegét nem ismerjük. Ezzel a becsléssel az összes ismert méretű égitestre alkalmazhatók a belső szerkezetre vonatkozó modellek.

Az egyedi égitestek belső szerkezetének közelítő meghatározásánál két-, illetve háromkomponensű modellel számolhatunk, attól függően, hogy a legbelső komponens, a kőzetmag határán elegendően nagy-e a hőmérséklet ahhoz, hogy ott folyékony víz létezhesen. Abban az esetben, ha ez a hőmérséklet túl alacsony, akkor a magot szilárd jégkéreg veszi körül, ellenkező esetben a mag és a jégkéreg között az utóbbi anyagából egy felszín alatti óceán alakul ki. Ennek vastagsága adott méretű kőzetmag és jégkéreg esetén is több tényezőtől függhet, egyebek között a jég összetételétől (a vízben oldott egyéb vegyületek csökkentik a jég olvadáspontját), a külső kéregből származó nyomástól, illetve a folyékony rétegen belüli hőátadás módjától, azaz, hogy például milyen áramlások alakulnak ki a felszín alatti óceánban, amelyek meg tudják növelni az óceán felső rétegének hőmérsékletét, ezáltal újabb jégrétegeket olvasztva meg a kéreg anyagából. Ebben a közelítésben egyetlen égitest esetében sem vesszük figyelembe azt, hogy egy esetleges kísérőtől valamekkora árapályfűtés származhat, ennek hatása ugyanis általában jóval kisebb kell legyen, mint az óriásbolygók rendszereiben fellépő árapályerőké.

Bár a felszín alatti óceán becsült tömege bizonyos mértékben függ az óceán összetételétől vagy a hőátadás hatékonyságától, abban minden modell egyetért, hogy a Kuiper-övben jelenleg csak a legnagyobb égitestek belsejében létezhet felszín alatti óceán: a két legnagyobb törpebolygón, a Plutón és az Erisen kívül már a többi, kisebb törpebolygó belseje is túl hideg ehhez. A felszín alatti óceán árapályfűtés nélküli fenntartásához ma a külső Naprendszerben 2000 km-nél nagyobb átmérőjű égitestek esetében van esély. Ezért, ha az összes ismert égitestet tekintjük, akkor ma a legtöbb folyékony vizet az óriásbolygók jégholdjain találhatjuk, legtöbbet valószínűleg a Jupiter Ganymedes holdjának felszíne alatt, ami egymaga több folyékony vizet hordozhat, mint a Föld felszínének teljes vízkészlete (2. ábra). De vajon minden 1000 kilométeres, vagy annál nagyobb égitestet ismerünk a Neptunuszon túli vidéken?

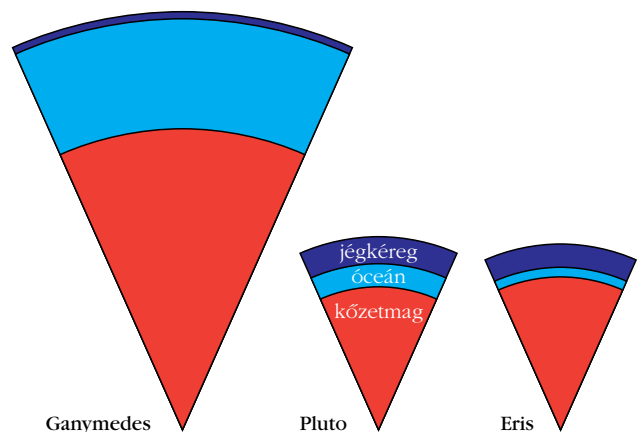
A klasszikus Kuiper-öv a Neptunuszon túli vidék azon része, ahol az égitestek közel gömb alakúak, kis hajlásszögű pályákon keringenek, nagyjából 40-50 csillagászati egység távolságban a Naptól. Ehhez a populációhoz tartozik a Makemake törpebolygó, illetve a Quaoar és Varuna nevű nagyméretű objektumok, amelyek felfedezésükkor a legnagyobb ismert Kuiper-övbéli égitestek voltak. Ezt a populációt vi-

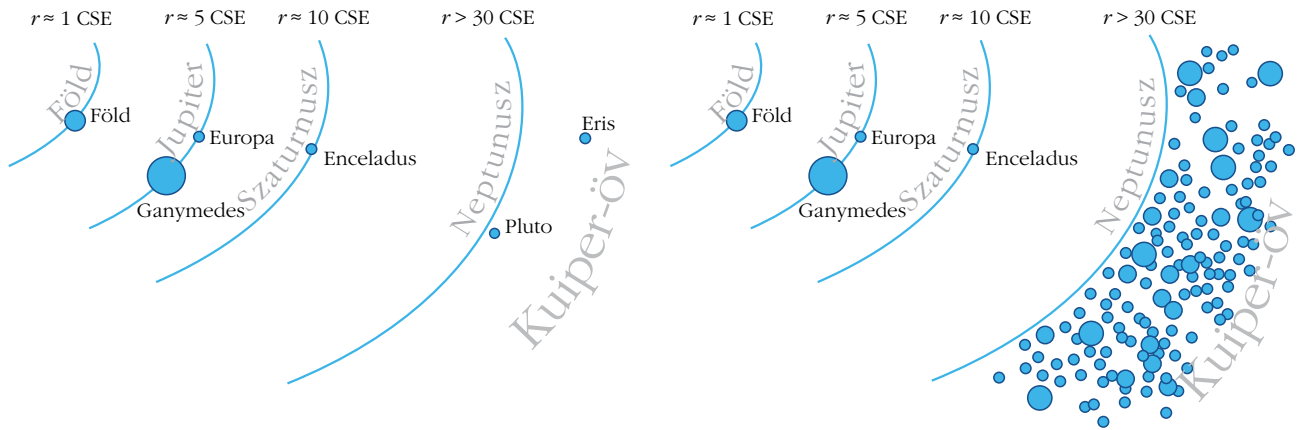
szonylag jól ismerjük, itt viszonylag kicsi az esélye, hogy újabb törpebolygót, vagy akár csak 1000 km átmérőjű, illetve annál nagyobb égitestet fedezzünk fel. Ugyanakkor a Neptunuszon túli vidéken számtalan égitest kering elnyúltabb és nagy hajlásszögű pályákon, a klasszikus Kuiper-övnél távolabb a Naptól – ezek az úgynevezett szórt korong és lecsatolódott populációba tartozó égitestek. Ezek közé tartozik a jelenleg ismert legnagyobb tömegű törpebolygó, az Eris is. A nagy távolság és egyéb kiválasztási effektusok miatt az utóbbi csoportokban még jelentős számban lehetnek felfedezetlen, nagyméretű égitestek. Ezen a külső vidéken a becslések az 1000 km-nél nagyobb égitestek számát több mint százra teszik, a teljes számnak ma nagyjából a tíz százalékát ismerhetjük, így nem elképzelhetetlen több, akár Pluto méretű égitest felfedezése is ezen a vidéken. Azonban, ha figyelembe vesszük ezeket a hiányzó, nagy égitesteket is, a folyékony víz naprendszerbeli súlypontja az óriásbolygók holdjaitól a Kuiper-öv felé tolódik el.

Naprendszerünk körülbelül 4,6 milliárd éves, a Földön is nagyjából 3,5 milliárd évvel ezelőtről vannak bizonyítékaink az élet jelenlétére. Vajon a folyékony vizet abban az időben is hasonló helyeken találhattunk volna, mint manapság?

A korai Kuiper-öv (körülbelül 4-4,5 milliárd évvel ezelőtt) sokkal nagyobb volt, mint ma, tömege körülbelül 100-1000-szerese lehetett a mainak. Ebből következően sokkal több olyan nagy, körülbelül 1000 km-es sugarúnál nagyobb égitest lehetett ebben a korai Kuiper-övben, amiben még ma is valószínű, hogy felszín alatti óceánt találnánk. Ugyanakkor a korai Naprendszer kőzeteiben nagyobb volt a radioaktív hő produkáló elemek gyakorisága is. Egyrészt azokból a hosszú felezési idejű elemekből is több volt, amelyek ma is nagyrészt a Föld és egyéb égitestek belsejének hőjét adják. Másrészt jelen voltak még olyan, rövid felezési idejű elemek is, amelyek mennyisége ma már gyakorlatilag elhanyagolható, de abban az időben jelentős radioaktív bomlási hő szolgáltatott. Ezek figyelembevételével abban az időben

2. ábra. A Jupiter Ganymedes holdja, valamint a Pluto és Eris törpebolygók belső szerkezete egy egyszerű háromkomponensű modell (kőzetmag, felszín alatti óceán, jégkéreg) alapján.





3. ábra. A folyékony víz mennyisége a Naprendszerben a keletkezés után körülbelül 500 millió évvel, a késői nagy bombázás időszaka előtt (bal oldalon), illetve napjainkban (jobb oldal). Ma a folyékony víz legnagyobb része az óriásbolygók jégholdjainak felszín alatti óceánjaiban található, míg 500 millió évvel ezelőtt a Kuiper-öv körülbelül 1000 km-nél nagyobb égitestjeinek belsejében a mai teljes mennyiségének több ezerszerese is lehetett.

nemcsak a körülbelül 1000 km sugarú, hanem a jóval kisebb, körülbelül 500 km sugarú égitestek belsejében is megfelelőek lehetnek a körülmények arra, hogy ott folyékony víz létezhesen a felszín alatt. Ezek az égitestek már elegendően nagyok ahhoz, hogy bennük a differenciálódás végbemehessen. Ebben az időben biztosan nem az óriásbolygók holdjain, hanem a Kuiper-öv égitestjeinek felszíne alatt volt a legtöbb folyékony víz a Naprendszerben, nagyságrendekkel több, mint amennyit ma a Naprendszerben összesen találunk (3. ábra).

A korai Naprendszer dinamikai átrendeződései miatt azonban ezen égitestek többsége már nem található meg a mai klasszikus értelemben vett Naprendszerben. Az egyik legfontosabb folyamat, amely eltávolította ezen égitestek nagy részét, a Neptunusz kifelé migrálása lehetett. A korai Naprendszer modelljei szerint a Naprendszer kialakulásakor a Neptunusz beljebb keletkezett, mint az Uránusz, s csak valamivel később, 3,8-4 milliárd évvel ezelőtt vándorolt mai helyére annak a folyamatnak az eredményeként, amelynek során a Jupiter és a Saturnusz elfoglalta mai helyét (NICE modell). Kifelé migrálása során a Neptunusz szétszórta az akkori, körülbelül 30 CSE távolságban lévő Kuiper-öv égitestjeinek jelentős részét. Ezen égitestek egy kisebb része a Naprendszer belseje felé szóródott, és jelentős számban ütköztek a belső Naprendszer égitestjeivel – ezek az ütközések gyakorlatilag felülírták az addigra már megszilárdult felszíneket. A Föld esetében az erózió és a tektonikus mozgások ennek a közvetlen nyomait már eltüntették, de a Holdon látható kráterek túlnyomó része ebből az időszakból, az úgynevezett késői nagy bombázás időszakából származik. Azok a Kuiper-övbéli objektumok, amelyek nem érték el valamilyen más égitest felszínét, nagyon távolra kerültek eredeti pályájuktól. Egy részüket valószínűleg ma is megtalálhatjuk nagyon távol a Naptól, a Naprendszert több ezer csillagászati egység távolságban körülvevő Oort-felhőben, míg mások örökre kilöködtek a Naprendszerből a csillagközi térbe.

A fiatal Napot körülvevő korongból, amelynek anyagából annak idején a bolygókezdemények és később a bolygók keletkeztek, mára már nagyon kevés maradt – a Naprendszer kisbolygóövei, a Mars és a Jupiter pályája között található fő kisbolygóöv és a Kuiper-öv is e korong maradványai. Tulajdonképpen e törmelékkorong része minden, a nem a nagybolygók rendszereiben keringő kis égitest, így például a Pluto és az Eris is. Az utóbbi két évtizedben, elsősorban az infravörös-űrtávcsöveknek (ISO, Spitzer, Herschel) köszönhetően nagyon sok, elsősorban fiatal csillag körül fedeztünk fel törmelékkorongokat – ezek hasonlóak lehetnek ahhoz, mint amilyen a Naprendszer törmelékkorongja lehetett évmilliárdokkal ezelőtt. Ezekben a törmelékkorongokban, hasonlóan a korai Naprendszerhez, nagy számban lehetnek olyan nagyméretű égitestek, amelyekben kialakulhattak felszín alatti óceánok is. Ma úgy gondoljuk, hogy a csillagok mindegyike körül voltak ilyen törmelékkorongok, bár öregebb csillagok esetében a Földről már nem tudjuk közvetlenül megfigyelni ezeket, mint ahogyan a mi Naprendszerünk törmelékkorongjának megpillantása is rendkívül nehéz lenne egy másik csillag távolságából. Összességében valószínűleg a fiatal törmelékkorongok körülbelül 1000 km-nél nagyobb égitestjeiben találhatnánk meg a legtöbb vizet ma a Tejútrendszerben, ha egyedi csillagokat nézünk.

Bár lakható bolygókat más csillagok körül is keresünk, ha Földön kívüli folyékony vízre vágyunk, akkor, mint ahogyan láttuk, ki sem kell mozdulnunk a Naprendszerből. Az exobolygók kutatása mellett az óriásbolygók holdjai és a Kuiper-övbéli legnagyobb objektumok a legjobb jelöltek arra, hogy folyékony vizet és talán az élet alkotóelemeit is megtaláljuk ezeken a helyeken. Jelenleg két olyan űreszköz is tervezés, illetve építés alatt van – a NASA Europa, illetve az ESA JUICE űrszondája –, amelyeknek a Jupiter holdrendszere és elsősorban annak Europa holdja áll a célkeresztjében. Ezek missziók célja többek között az, hogy a holdak belső szerkezetét megismerhessük, és képet kaphassunk például a felszín alatti víz mennyiségéről is, várhatóan valamikor a 2030-as évek elején.

Az Europa esetében biztosra vehetjük a felszín alatti óceán létezését, és ebben az esetben azt is tudjuk, hogy a felszín alatti óceán kapcsolatban van a felszínnel, onnan ugyanis jól látható anyagáramlás történik a felszínre. Így belátható időn belül közel kerülhetünk olyan világokhoz, ahol akár a miénkhez hasonló, víz alapú élet is kialakulhatott. A Kuiper-öbéli nagy égitestek (Pluto, Eris) esetében hasonló, kriovulkanikus

folyamatokat látunk, bár a nagyobb naptávolság (így alacsonyabb hőmérséklet) és az eltérő összetétel miatt minden bizonnyal más kémiával. Bár a nagy távolságok miatt a Kuiper-öv égitestjeinek vizsgálata jóval nehezebb, mint a Jupiter holdrendszeréé, a távolabbi jövőben ezek hasonlóan fontos szerepet játszanak majd a Földön kívüli élet kutatásában, mint ma a Jupiter holdjai.