

Lakható bolygók keresése a Gaia űrtávcsővel

Tudományos diákköri dolgozat



Készítette: Dencs Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar, Csillagász MSc

Témavezető: Dr. Nagy Imre, főiskolai docens, NKE HHK

Természettudományi Tanszék

Belső konzulens: Dr. Érdi Bálint, egyetemi tanár, ELTE TTK

Csillagászati Tanszék

Budapest

2014.

Tartalomjegyzék

Kivonat	4
Abstract	4
1. Bevezetés	5
1.1. Az exobolygó kutatás rövid története.....	5
1.2. Az exobolygók.....	6
1.3. Missziók exobolygók felfedezésére	7
1.4. Célok a Gaia űrtávcsővel.....	8
1.5. Élet a távoli bolygórendszerekben.....	9
2. Lakható világok	11
2.1. Az élet és a kialakulásához szükséges feltételek.....	11
2.2. Lakható világok tulajdonságai.....	13
<i>Egyes típusú környezetek</i>	<i>13</i>
<i>Kettes típusú környezetek</i>	<i>14</i>
<i>Hármas típusú környezetek</i>	<i>15</i>
<i>Négyes típusú környezetek</i>	<i>15</i>
<i>Lakható holdak.....</i>	<i>17</i>
2.3. Az exobolygó kutatás módszerei.....	18
2.3.1. Fotometria.....	18
2.3.2. Gravitációs mikrolencsék.....	19
2.3.3 Dinamikai effektusok.....	19
2.3.4. Egyéb módszerek.....	22

3. Kutatás lakható világok után	23
3.1. Csillagok imbolygása	23
3.2. A Gaia űrteleszkóp alkalmazása.....	25
3.3. A lakható zóna határai	27
4. Diskusszió	32
5. Összefoglalás	32
Forrásjegyzék	38
Köszönetnyilvánítás	40
Függelék.....	41

Kivonat

Célok: Annak bemutatása, hogy egy érzékeny műszerekkel rendelkező távcső – például a célnak megfelelő pályán mozgó, Gaiahoz hasonló űrteleszkóp – képes lehet exobolygók felfedezésére asztrometria módszer segítségével. Ehhez a 2014. november 19-ig felfedezett bolygók központi csillagainak imbolygását határoztam meg. Bemutatom továbbá az élet számára kedvező környezeteket, ugyanis első sorban lakható bolygókat szeretnénk találni. Ezért célom kideríteni, hogy az ismert exobolygók közül melyek keringenek alkalmas helyen ahhoz, hogy megfelelő geológiai adottságok mellett lakhatóvá váljanak. Igen kevés bolygót találunk a tényleges lakható zónában, és sokat nagyon közel a csillagjához. Itt a magas hőmérséklet miatt nem érdemes élet után kutatni. Célszerűbb a zóna külső határán túli bolygókat számításba venni.

Eredmények: Először megvizsgáltam az ismert tömegű exobolygók gravitációs hatását a csillagaikra, a rendszerben keringő bolygók száma szerint külön-külön. Kiszámítottam a központi csillagok kitérését. Másodszor a kapott értékekből meghatároztam, hogy a Gaia érzékelné-e a bolygók jelenlétét asztrometria szondájával. 642-ből 327 esetben képes lenne rá. Ezen kívül a csillagok luminozitása alapján meghatároztam, hogy bolygók a lakható zónában, illetve annak külső határán kívül keringenek-e. Számításaim szerint 102 bolygó található a zónában és 145 a fagyott vizes régiókban. Közülük 168-at észlelhetne a Gaia is.

Abstract

Aims: To show that a telescope with sensitive instruments – e.g. a space telescope similar to Gaia, which moves on a fit for purpose orbit – is able to discover exoplanets with astrometric method. For this I determined the wobbling of host stars of discovered planets until 19 November 2014. Furthermore I show the favorable environments for life, because we want to find primarily habitable planets. Therefore my related goal is to find out which of the known exoplanets orbit on suitable place to become habitable under sufficient geological conditions. Very few planets are found in the real habitable zone, and a lot of them are too close to the host star. So it is not worth to search for life because of the high temperature. It is more reasonable to look for it beyond the outer border of the zone.

Results: First, I examined the gravitational effect of exoplanets with known mass on their stars, separated by the number of planets in each system. I calculated the diversion of host stars. Secondly, I determined from these values if Gaia is able to detect the presence of planets around the stars with the astrometric probe. In 327 out of 642 cases it would be able to that. In addition after calculating the luminosity of stars I determined if their planets orbit in the habitable zone or out of the outer boundary of this. According to my calculations 102 planets can be found in the zone and 145 are in the area of frozen water. Gaia would be able to detect 168 of them.

„... számtalan, végtelen sok világtest van,
hasznók ahhoz, amelyen mi élünk és tenyészünk.”

/Giordano Bruno/

1. Bevezetés

1.1. Az exobolygó kutatás rövid története

A gondolat, hogy a Naprendszeren kívül máshol is létezhetnek bolygók az Univerzumban, nem új keletű. Giordano Bruno a korát évszázadokkal megelőzve veti fel 1584-es, *A végtelenről, a világegyetemről és a világokról* című művében, hogy a csillagok valójában távoli, a Naphoz hasonló égitestek, amelyek körül keringhetnek Földhöz hasonló bolygók. Ezeken pedig afféle életformák létezhetnek, mint a mi világunkon. Ez csupán filozófiai okfejtés, de a műszerek fejlődésének köszönhetően az 1850-es évektől beszélhetünk exobolygók utáni kutatásról. W. S. Jacob az első bizonyított fizikai kettőscsillag, a *70 Ophiuchi* mozgásában anomáliát fedezett fel, melyet egy bolygó jelenlétével magyarázott a rendszerben. Később ez tévesnek bizonyult.

Otto Struve 1950-es években megjelent cikkeiben ír a csillagok radiális sebességének méréséről, illetve a fedési módszerről. Kiszámította, hogy a kor leghatékonyabb távcsövével megmérve egy távoli hipotetikus csillag radiális sebességét, annak változásában egy $\pm 0,2$ km/s tartományú oszcilláció még észlelhető lenne. 1988-ban Campbell és társai megmérték a γ *Cephei* radiális sebességét, melynek változásából bolygó jelenlétére következtek. Ám ezt csak 2003-ban tudták igazolni.

Az 1960-as években Peter van de Kamp a *Barnard-csillag* körül feltételezett két bolygót asztrometriai mérések alapján, melyek során a csillag mozgásában fellépő imbolygást mutatta ki. Ez a mozgás a csillag és bolygói közös tömegközéppont körüli keringéséből származik. Van de Kamp felfedezését máig sem erősítették meg.

Az elsőként megerősített exobolygót Wolszczan és Frail fedezte fel egy pulzár körül. A pulzárjelek pontosan kimérhetők, ezek amplitúdójának és frekvenciájának változása exobolygó jelenlétére utal a rendszerben. A *PSR 1257+12* pulzár két bolygóját is megerősítették. Az ilyen felfedezések azonban igen ritkák, hiszen a pulzár egy szupernóva robbanás után visszamaradt csillag, a körülötte létrejött másodlagos törmelékkorongból pedig kis valószínűséggel alakulnak ki

bolygók. Emiatt az elsőnek felfedezett valódi exobolygóként az *51 Pegasi b*-t tartják számon, mely egy Naphoz hasonló paraméterekkel rendelkező, G2 színképtípusú csillag körül kering. M. Mayor és D. Queloz 1995-ben publikálták radiális sebesség mérésével tett felfedezésüket. A bolygó egy 0,46 jupitertömegű úgynevezett forró Jupiter, mely mindössze 0,05 CsE (csillagászati egység) átlagos távolságra kering csillagától. A következő években néhány felfedezéssel gyarapodott az exobolygók tábora, ám 2005 és 2014 között számuk ugrásszerűen növekedett.

1.2. Az exobolygók

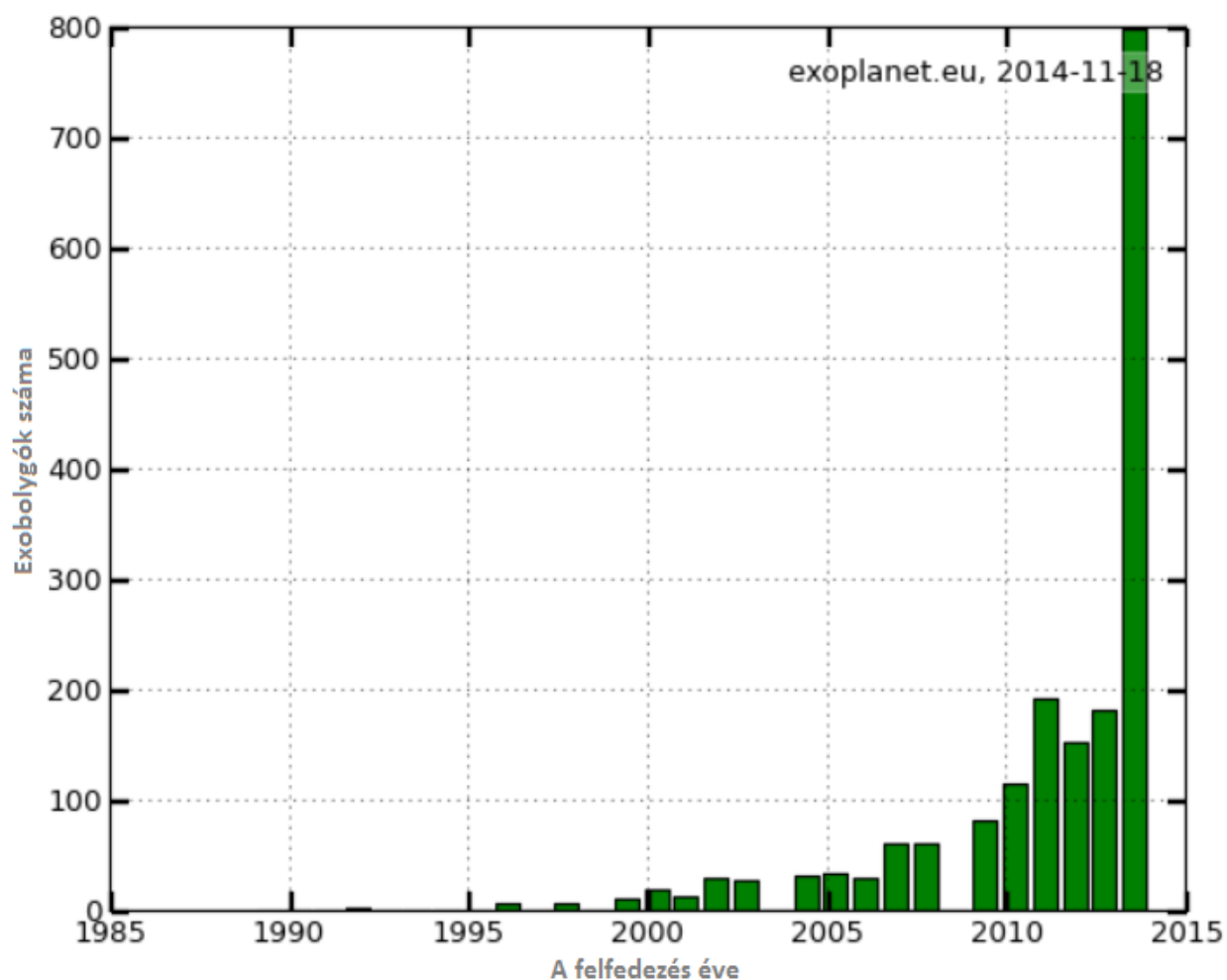
Az exobolygókat távoli csillagok körül kell keresnünk. Azonban létezhetnek csillag nélküli bolygók is, amelyek például bolygó társaik perturbáló hatására kilöködhetnek a rendszerükből. Ilyen égitesteket főleg infravörös tartományban lehet felfedezni. A bolygók és a csillagok között a legfontosabb különbség, hogy a bolygó élete során soha sem indul meg a fúziós energiatermelés egyetlen formája sem. 13 jupitertömeg a barna törpéket és óriásbolygókat elválasztó határ. Ennél nagyobb tömegű bolygók is létezhetnek, ha nem akkrécióval jöttek létre, és a belsejükben egy főleg szilikátokból álló nagyméretű mag található.

A Naprendszer vizsgálva leírhatók olyan tulajdonságok, amelyek a Nap összes bolygójára teljesülnek: mind fő planetáris testek, tehát egy központi csillag körül keringenek, alakjuk jól közelíthető gömbbel. Ezeken kívül pályájuk környékén csak náluk nagyságrendekkel kisebb átmérőjű égitestek fordulhatnak elő, az IAU (International Astronomical Union, 2006) deklarációja szerint. Más bolygórendszerekben is ezek a kritériumok érvényesek. Bolygóinkat csoportosíthatjuk anyaguk és méretük alapján. A Naprendszerben például jelen vannak kőzetbolygók, gázóriások és vízóriások. Más rendszerekben ezektől eltérő tulajdonságú bolygókat is fedeztek már fel, köztük a már említett forró Jupiterok, amelyek nagyon közel keringenek központi csillagjukhoz és fizikai tulajdonságaik az óriás gázbolygókéhoz hasonlóak, vagy a szuperföldek, amelyek sűrűségük alapján szilárd kőzetburokkal rendelkeznek, ám tömegük a Földének akár tízszeresét is elérheti. Az exobolygók pályaelemeiben és fizikai tulajdonságiban nagy változatosságot mutatnak, egyelőre képtelenség megmondani, hányféle bolygótípus létezhet. A felfedezésüknek csak a jelenleg rendelkezésünkre álló módszerek és műszerek szabnak határt.

Az eddig használt bolygó detektálási módszereket négy nagyobb csoportba sorolhatjuk: dinamikai, gravitációs mikrolencse, fotometriai és egyéb metódusok. Ezek részletes bemutatását a 2.3. alfejezet tárgyalja.

1.3. Missziók exobolygók felfedezésére

A módszerek sokféleségének és az egyre érzékenyebb műszereknek köszönhetően az exobolygó felfedezések száma rohamosan gyarapszik. 2014 novemberéig 1509 felfedezést erősítettek meg az exoplanetes.org adatbázisa szerint. Az elmúlt három évben csaknem ezer exobolygót fedeztek fel, ami másfél naponta egy megerősített bolygót jelent (1. ábra). A bolygójelöltek száma ennél jóval több, azonban sokukról később kiderül, hogy a szóban forgó égitest mégsem kerülhet be az adatbázisba. Ennek több oka is lehet: csupán hiba léphetett fel a mérés közben, illetve a tömeg meghatározása után barna törpecsillagnak bizonyulhatott a feltételezett bolygó.



1. ábra: Az évente felfedezett exobolygók száma az elmúlt három évtizedben, 2014 novemberéig.

Forrás: <http://exoplanet.eu/diagrams/>

Az egyik legtermékenyebb exobolygó kutató program a Kepler-misszió. 2009-es pályára állításától 2013-ig a Kepler-űrtávcső a Hattyú-csillagkép irányában pásztázott egy nagy égi területet a csillagok fényesség változásai után kutatva. Fotometria segítségével számos exobolygót és jelöltet fedezett fel. A távcső pozícionálási problémák miatt már nem képes a korábbi pontossággal fotometriai méréseket végezni, de az általa szolgáltatott adatok feldolgozása ma is zajlik. A munka során jelentős eredményt értek el: nagyjából 800 Naprendszeren kívüli bolygó megerősítése fél év alatt.

Egy másik jelentős exobolygó kutató űrteleszkóp a CoRoT (Convection Rotation and Planetary Transit) is fedési módszert alkalmazva keres bolygójelölteket. Ennek a műszernek köszönhető az első valódi kőzetbolygó, a *CoRoT-7 b* 2011-es felfedezése. A Hubble-űrteleszkópot leginkább radiális sebesség méréseknél alkalmazzák. A Spitzer űrtávcső műszerei főleg infravörösben voltak érzékenyek, amely hullámhossz tartományon a bolygók keletkezési régióit, a cirkumsztelláris porkorongokat lehet megfigyelni. A közeljövőben tervezik felbocsátani a TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) és a PLATO (Planetary Transits and Oscillations of stars) exobolygó kutató űrszondákat. Rajtuk kívül a 2018-ra elkészülő James Webb-űrteleszkóp is alkalmas lesz exobolygók kimutatására.

Számos földfelszíni program is fut a fentiekkel párhuzamosan. A HATNet (Hungarian Automated Telescope Network) magyar tervezésű és üzemeltetésű távcső hálózat, amelyben kis, 11 cm objektívátmérőjű teleszkópok sorozata működik együtt. Ezekből minden kontinensen található egy állomás, így egyes égterületek fürkészése megszakítás nélkül történhet huzamosabb ideig mind az északi, mind a déli égbolton. Az exobolygó „vadászat” fotometrián alapul, eddig 43 bolygó felfedezését erősítették meg. Hasonló hálózatba kötött távcsövek alkotják a WASP (Wide Angle Search for Planets) programot, amelynek keretében eddig 65 bolygót találtak, és az egyelőre kevésbé eredményes XO, illetve TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey) missziókat.

1.4. Célok a Gaia űrtávcsővel

A Kepler és a CoRoT bolygóátvonulások észlelésére alkalmas, de a fotometrián kívül más módszerekre is szükség van a valószínűsített bolygók megerősítéséhez. Ilyen például az asztrometriai módszer, mellyel a bolygók tömege is meghatározható. A Gaia űrtávcső mérési pontossága alapján képes lenne ilyen mérések elvégzésére, azonban mozgása miatt nem alkalmas a feladatra.

A világűr több szempontból is kedvezőbb, mint a földfelszín a nagy pontosságot igénylő mérésekhez szükséges műszerek telepítésére. Első sorban azért, mert így kiküszöbölhető a légkör zavaró hatása. Másrészt folytonos megfigyeléseket tesz lehetővé, hiszen az űreszköznek nem kell a felszínnel együtt mozognia. A Gaia¹ (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) szonda bolygónk L2 Lagrange-pontja körül állt pályára 2013 decemberében, ezért a Napból érkező fény-, hő- és egyéb hatások kevésbé zavarják a méréseket. A műszer elsődleges célja, hogy a Tejútrendszer csillagainak mozgását és fizikai paramétereit feltérképezze. Ezen adatok alapján várhatóan egy minden eddiginél pontosabb Hertzsprung-Russell-diagram fog előállni.

Az űrtávcső érzékenységének köszönhetően exobolygó kutatási célokra is alkalmas. Fotometriai észleléseket 20 magnitúdós fényességig képes végezni. Várhatóan ötezer bolygójelöltet fog találni ezzel a módszerrel. Csillagok radiális sebességét 17 magnitúdós határig mérheti meg, ennek segítségével is képes lehet exobolygók felfedezésére. Az űrtávcső elméletileg asztrometriai módszert alkalmazva is kimutathatja bolygó jelenlétét. Azonban túl kevés alkalommal fog egy-egy adott csillagot vizsgálni, ami elengedhetetlen ennél az eljárásnál. Becslések szerint összesen 8000 exobolygó jelölt és 1000 több bolygós rendszer felfedezésére is számítani lehet a küldetés során.

1.5. Élet a távoli bolygórendszerekben

Az egyre pontosabb műszerekkel már kisebb méretű és tömegű, akár Föld típusú bolygók kimutatása is lehetséges. Azért folyik a kutatás ilyen égitestek után, mert legkönnyebben a miénkhöz hasonló környezetekben tudjuk elképzelni az élet jelenlétét. A világűr többi része talán túl zord lenne az élet kialakulásának és fennmaradásának biztosításához. Jelenlegi biokémiai tudásunk alapján elképzelhetőek azonban tág tűrőképességű extrém életformák.

A földihez hasonló élet kialakulásának több feltétele is van. Ezek közül az egyik legfontosabb a folyékony vizes környezet. Ahhoz, hogy meghatározzuk, teljesül-e ez a feltétel, ismernünk kell, hogy az adott bolygó milyen távol kering a csillagától. A központi csillag luminozitásának megméréseével kijelölhetünk egy olyan cirkumsztelláris régiót, amelynek határai között létezhet folyékony víz egy szilikátbolygó felszínén, megfelelő nyomású légkör esetén.

¹ Az Európai Űrügynökség Gaiával kapcsolatos weboldala:

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Liftoff_for_ESA_s_billion-star_surveyor

Amennyiben lehetséges, ennek összetételét is meg kell határozni. Azonban létezhetnek olyan élőlények is, amelyek víz helyett más vegyületet használnak oldószerként. Ilyenekre ma még nem találtunk példát, és a szóba jövő alternatív biokémiai reakciókról is keveset tudunk.

Ha a bolygó a folyékony vizes lakható zónánál távolabb kering a csillagától, a felszínén vastag jég réteg alakulhat ki, amely megfelelő nyomást biztosít felszín alatti folyékony vízréteg fenntartásához, ám mindig fontos tényező a bolygó szilikátos összetétele. Ilyen környezetben is kialakulhat élet, de valószínűleg jóval alacsonyabb rendű, mint a felszíni esetben. Újabban felmerült szempontok alapján is kijelölhetjük a lakható zónát, mint például a környező csillagok sugárzása, vagy az árapály erőkből származó extra hő. Ez utóbbi a holdak lakhatósága miatt fontos tényező.

Nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy a magasabb rendű élet kialakulásához akár több milliárd évre is szükség lehet, így első sorban olyan csillagok után kell kutatni, amelyek ezen az időskálán stabilnak tekinthetők. Többnyire az F, G, K és M színképosztályok kistömegű csillagait szokás számításba venni.

A bolygónak huzamosabb ideig a lakható zónában kell keringenie. Nem lehet túl nagy a pályája excentricitása, ekkor ugyanis a keringés bizonyos fázisaiban kiléphet a lakható régióból. A keringési pálya fél nagytengelye sem változhat, mert akkor a bolygó tartósan a zónán kívülre kerülne. Még számtalan tényezőt említhetnénk, ami lassíthatja a már kialakult élet evolúcióját, illetve el is pusztíthatja. A kedvező körülmények együttes jelenlétének valószínűségét minimálisnak tekintve is igen elterjedt lehet az élet a galaxisunkban figyelembe véve a Tejútrendszer méreteit. A 2. fejezetben részletesen kifejtem, melyek az élet számára kedvező környezetek, és ezek milyen tulajdonságokkal rendelkeznek.

2. Lakható világok

2.1. Az élet és a kialakulásához szükséges feltételek

Az exobolygó kutatás fő mozgató rugója, hogy ráleljünk a földönkívüli életre. Ez bebizonyítaná, hogy az élet kialakulása nem egyszeri és megismételhetetlen jelenség az Univerzumban. Ráadásul a kutatások a földi élet eredetének kiderítéséhez is közelebb vihetnének. A kereséshez első lépésként meg kell határoznunk, mit tekintünk életnek. Másodszor pedig az életformák számára szükséges környezeti feltételeket kell megszabnunk.

Gánti Tibor *Az élet általános elmélete* (2000) című könyve alapján az élet egy különleges szerveződésű, lágy kémiai rendszer, ugyanis folyamatai oldatokban mennek végbe. Legjelentősebb oldószere a folyékony víz, amely elengedhetetlen az élőlényekben lezajló életfolyamatokhoz. Élőlényeknek nevezzük azokat a rendszereket, amelyekre minden körülmények között teljesülnek az alábbi kritériumok:

- a részek nem adnak képet az egész rendszerről
- a rendszer a külvilágból anyagot és energiát vesz fel a folyamatai fenntartásához
- a környezet megváltozásának ellenére állandó marad a rendszer belső állapota
- az életforma rendelkezik a teljes rendszert kódoló és dekódoló alrendszerekkel
- dinamikus biológiai rendszerben szabályozott folyamatok mennek végbe

A fentiekén kívül potenciális életkritériumok a növekedés, a szaporodás, az evolúció képessége, valamint a halandóság. Ezek a kritériumok nem teljesülnek minden élő rendszerre, például, ha hiányosak az élet fejlődéséhez szükséges környezeti feltételek. Ez nem feltétlenül jár együtt az élőlények pusztulásával. Némely esetben csupán hibernált állapotba kerülnek. Egy biológiai rendszer így akár egy bolygóközi utazást is túlélhet. Az élet térhódításának ezt a módját a panspermia elmélet írja le.

A Gánti-féle elméletből körvonalazódik az élet egy általános modellje, amely beilleszthető a földi környezetbe, de létrejöhet akár egy idegen világon is. Az egyetlen ismert életet hordozó planéta a Föld. Ez alapján feltételezhetjük, hogy a hozzá hasonló exobolygók vagy exoholdak rendelkezhetnek az élőlények megjelenése és fejlődése számára kedvező tulajdonságokkal. Az egyik legfontosabb feltétel a folyékony víz jelenléte a bolygótest felszínén (vagy akár a felszín alatt, lásd: 2.2. alfejezet). Ehhez megfelelő nyomás és hőmérséklet viszonyokra van szükség. A

hőmérsékletet a központi csillagról érkező sugárzási energia biztosítja. A csillag körül a luminozitását figyelembe véve kijelölhetünk egy távolságtartományt, amelyen belül egy földszerű bolygó elegendő energiához juthat a felszíni hőmérséklet megtartásához a víz olvadáspontja fölött. Ezt a tartományt irradiációs lakható zónának (IHZ) nevezzük (Dole, 1964). Kiszámítottam a megerősített exobolygóval rendelkező csillagok lakható zónáinak méretét. A módszer és az eredmények a 3. fejezetben szerepelnek.

A víz folyékony halmazállapotban tartásához megfelelő összetételű és nyomású légkörre is szükség van. Az üvegházhatású gázok (pl.: vízgőz, szén-dioxid, metán stb.) légköri jelenléte biztosítja a csillagról érkező energiaáram csapdázódását, ezáltal növelve a felszín hőmérsékletét. Ám a vízkészlet befagyhat, ha a légkör veszít tömegéből és nem biztosít elég nagy nyomást. A felső légkör illó anyagai könnyen megszökhetnek a csillagszél ionizáló hatására. Ez ellen a bolygó magnetoszférája nyújthat védelmet.

Az életnek otthont adó bolygótestnek szilárd szilikátos kőzetburokkal kell rendelkeznie. Ilyen környezetben megtalálhatóak azok az elemek, amelyek az élet „építőkövei” lehetnek. Arra a kérdésre, hogyan keletkezhetett élettelen anyagokból élő rendszer a Földön, évszázadok kísérleti tapasztalatai adhatnak választ (pl.: Miller, 1953). A bolygónkon megtalálható biogén elemek - szén, hidrogén, oxigén és nitrogén - az Univerzum leggyakoribb elemei közé tartoznak. Ezekből ultraibolya sugárzás hatására az ősi óceánban egyszerű szerves vegyületek jöttek létre. Makromolekulákká kapcsolódva olyan biológiai fontosságú vegyületeket alkottak, mint például az aminosavak, a lipidek és a szacharidok, azaz a sejtek alapvető építőelemei. Elképzelhető, hogy a folyamat más bolygótesteken is lejátszódott.

A többsejtű komplex életformák kialakulásához és fejlődéséhez évmilliárdokra van szükség. A kedvező környezetnek ezen az időskálán kell nagyjából állandónak lennie. A $2 M_{\odot}$ -nél (naptömeg) nagyobb tömegű csillagok körül nem érdemes lakható zónát keresni. Az ilyen, főleg O, B, A színeképtípusú csillagok néhány millió év alatt kimerítik energiaforrásukat. A $0,1 M_{\odot}$ -nél kisebbek pedig olyan alacsony energiájú sugárzást produkálnak, hogy az IHZ nagyon közel helyezkedik el hozzájuk. Amennyiben ebben a zónában bolygó keringene, azt rövid időn belül szétszakítaná az árapályerők.

F, G, K és M típusú csillagok stabilnak tekinthetők tág időintervallumon, így az IHZ kiterjedése is állandó. Azonban fontos, hogy az élet számára ideális bolygó pályája a zónában helyezkedjen el, és pályaelemei ne változzanak meg túl nagy mértékben. A pálya pericentrum

távolsága nem lehet kisebb a zóna belső határánál, az apocentrum távolsága pedig nem lehet nagyobb a külsőnél. Azonban egy csillagához közel keringő bolygó lehet kötött forgású, ami a két félgömbön markáns hőmérséklet különbség kialakulásához vezet. Ilyenkor is elképzelhető élet a bolygón, egy vékony gyűrűben a világos és a sötét oldal határán. Végül a pálya alakját is figyelembe kell vennünk. Kicsi vagy közepes excentricitás esetén előfordulhat, hogy a bolygó nem tartózkodik a teljes keringési periódusa alatt az IHZ-ben. Ilyenkor az élet számára még elviselhető határok között változhatnak a felszíni hőmérsékleti viszonyok, ha csak rövid időt tölt a zónán kívül.

2.2. Lakható világok tulajdonságai

Tételezzük föl, hogy a központi csillag luminozitása szerint kijelölhető lakható zónában kering egy bolygó. A csillag sugárzási energia kibocsátása több milliárd éven keresztül változatlan és a bolygó pályaelemei is állandóak ugyanezen időskálán. Mégsem biztos, hogy a planéta alkalmas bioszféra fenntartására. Itt kell megemlíteni a geológiai tulajdonságokat. Ezek alapján Lammer és társai (2009) négy kategóriát állítottak fel a bolygótestek csoportosítására. Az első csoportba tartoznak feltételezhetően a legmagasabb, míg a negyedikbe a legalacsonyabb rendű életformák kialakulását biztosító környezetek.

Egyes típusú környezetek: Földhöz hasonló bolygók. A légköri nyomás és hőmérséklet lehetővé teszi a jelentős felszíni vízkészlet szilárd, folyékony és gáz halmazállapotú jelenlétét. A bolygó kőzetburokkal rendelkezik, amely tartalmazza a kémiai evolúció beindulásához szükséges elemeket. A bolygókeletkezés előtt a víz és a szilikátok különböző távolságban kondenzálódnak ki a központi csillagtól a vegyi differenciálódás miatt. Kétféleképpen lehet megmagyarázni, hogyan kerülhet mégis víz a megszilárdult felszínre: a hidrofil ásványokban csapdázott H_2O vulkanizmus útján szabadul fel, illetve aszteroida bombázás révén.

Az egyes típusú bolygó szférái szoros kölcsönhatásban vannak egymással, összetett körfolyamatok alakulnak ki közöttük. Induljunk el a belső rétegek felől! A bolygó összeállása során az anyagok sűrűségkülönbsége miatt differenciált belső szerkezet alakul ki, ami általában magra, köpenyre és kéregre tagolható. A bolygó elég nagy méretű ahhoz, hogy magja néhány milliárd évig forró maradjon. A magas nyomás és hőmérséklet miatt radioaktív bomlások is fűtik a belsőt. A hőtöbblet vulkanizmus formájában tör felszínre. A folyamat során az illó anyagok a bolygókéregből a légkörbe kerülnek. Így születik meg egy másodlagos légkör, amely a csillagszél által elfújtt őslégkört helyettesíti. Fontos, hogy a másodlagos légkör ne veszítsen a tömegéből külső

hatásra. A bolygó mágneses pajzsa jelenti a legjobb védelmet számára. A Föld esetén a magnetoszférát a külső magban áramló vezető közeg (folyékony vas és nikkel) generálja. A lejátszódó folyamatot dinamómechanizmusnak nevezzük.

Egy Földhöz hasonló egyes típusú bolygónak geológiailag nagyon fejlettnak kell lennie, lemeztektonikával kell rendelkeznie. Ez biztosítja a belső hő egyenletes elvezetését. Így marad állandóan működésben a bolygó köré dipólus mágneses teret generáló dinamó. A földi tapasztalatok azt mutatják, hogy a kőzetlemezek mozgásban tartásához elengedhetetlen a folyékony víz, ami nem létezhetne ebben a formájában a mágneses védőpajzs és a megfelelő tömegű légkör nélkül (2. ábra). Ebből is láthatjuk, hogy milyen bonyolult kapcsolatban és kényes egyensúlyban vannak egymással egy földszerű bolygó folyamatai. Egy ilyen világon, ha elegendő időn át áll fenn az ideális környezet, intelligens életformák is kifejlődhetnek.

Kettes típusú környezetek: Vénuszhoz vagy Marshoz hasonló bolygók. Csakúgy, mint az egyes típusú lakható bolygók, a kettes típusúak is az IHZ-ben keringenek. Mindkét csoport képviselői egymáshoz hasonlóan alakulnak ki a csillag körüli porkorongból. Fejlődésük szakaszai is azonosak. Egy ponton mutatkozik eltérés. A kettes típusú planétákon hamar megáll a lemeztektonika, vagy be sem indul soha, így a dinamómechanizmus sem működhet, nem gerjesztődik erős mágneses tér, amely megóvná a légkört. A folyékony víz a légkör tömegvesztése után gyorsan elillan a felszínről. Egy ilyen bolygó történetének van olyan időszaka, amikor otthont nyújthat az életnek, de annak hosszú távú fejlődéséhez már nem képes megfelelő körülményeket biztosítani.

A Vénusz és a Mars méretben, tömegben és összetételben igen hasonlóak a Földhöz, mégsem rendelkeznek mozgó kőzetlemezekkel. A Vénuszon már korán leállhatott a lemeztektonika. A vulkáni tevékenység azonban folytatódott. Felborult az egyensúly a litoszféra és az atmoszféra között (2. ábra). Egyre több CO₂ került a légkörbe, ami megszaladó üvegházhatáshoz vezetett. A víz elpárolgott, a napsugárzás ionizáló hatására oxigénre és hidrogénre disszociálódtak molekulái.

A Mars esetén más folyamatok mehettek vége. A vörös bolygó nagyobb fajlagos felülete miatt gyorsan kihűlhetett, így a lemezeket mozgató konvekció leállt. Elveszett az egykori magnetoszféra is, ma csupán remanens mágneses teret érzékelünk egyes vidékeken. A légkör a napszél hatására gyorsan veszített tömegéből, így nyomása is lecsökkent. Az a vízmennyiség, amely nem fotodisszociálódott, most a felszínt borító porréteg alatt, illetve a poláris sapkákban található fagyott állapotban (Lammer & társai, 2009).

Hármas típusú környezetek: Az Európához hasonló bolygótestek. Általában az IHZ külső határán kívül keringő jelentős vízkészlettel rendelkező bolygók vagy holdak tartoznak ebbe a kategóriába. Felszínüket jégpáncél borítja. Azonban az IHZ-n belül is találhatnánk ilyen égitesteket, amennyiben a felszíni nyomás és hőmérséklet eltávolodik a víz hármaspontjától. Nagyjából 2,5 milliárd éve ez bekövetkezett a Földön is. Üledékvizsgálatok szerint ekkor a bolygót teljes egészében jég borította, ezt „hólabda” állapotnak² nevezzük. A jeges világokat négy alcsoportra oszthatjuk (3. ábra), melyek közül a (3)-as és a (4)-es kategóriákba sorolhatók a hármastípusú bolygótestek:

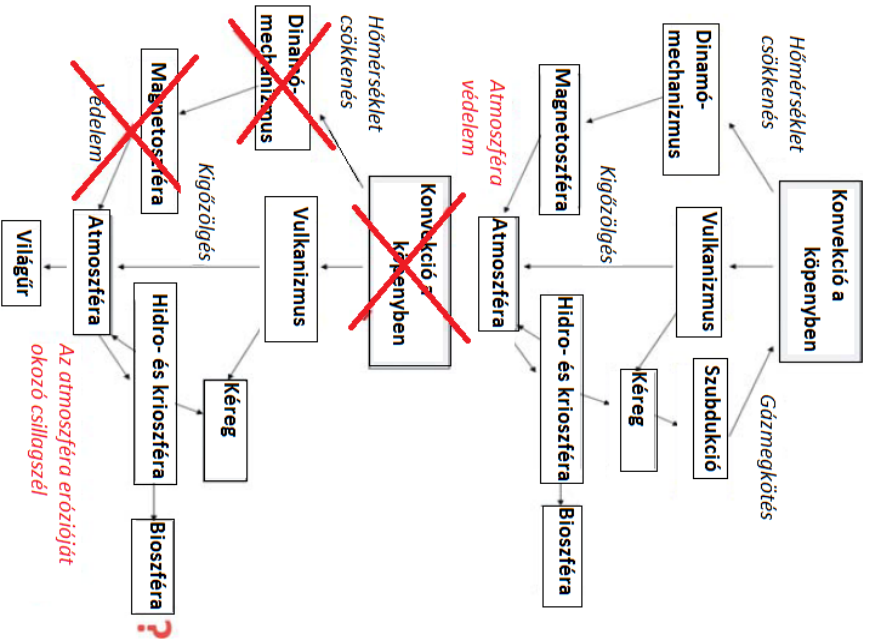
- (1) teljesen fagyott az egész vízburok 250 K alatti felszíni hőmérsékleten
- (2) egy alsó nagy nyomás alatt álló és egy felső jégréteg között található felszín alatti óceán 250 és 273 K közötti hőmérséklettel
- (3) 10 km-nél vastagabb felső jégréteg alatt folyékony vízburok található, amely érintkezik egy mélyebben lévő szilikátfelülettel. A szilikát réteg tetején uralkodó hőmérséklet és nyomás mellett a víz folyékony halmazállapotú, tehát nem alakul ki alsó jégréteg, amely elválasztaná a kőzeteket az óceántól (az élet számára szükséges vegyületek bekerülhetnek az óceánba)
- (4) 3-4 km vastagságú felső jégréteg alatti globális óceán húzódik, amely szintén közvetlen kapcsolatban áll egy alsó szilikátfelülettel

Az Europa a Jupiter egyik Galilei-féle holdja. Két tényező is arra utal, hogy a felszín alatt legfeljebb 100 km-re vízóceán található: a hold sűrűsége, illetve a mágneses tere. A felszín alatt egy elektromos vezető rétegnek kell elhelyezkednie (pl.: folyékony víz, benne oldott sótartalom), amelyben a Jupiter mágneses tere áramot indukál. Az Europa folyékony vize ezáltal saját mágneses mezőt fejleszt. Ezt a Galileo szonda³ mérte ki 1995-ben. Közben felvételeket is készített a jégpáncél töredezett felszínéről (4. ábra), amely árapály erők által mozgatott tektonikára utal. A kráterek hiánya pedig a törésvonalak mentén kiöntő, a felszínt elegyengető és újra megfagyó vízre utal (Illés, 1989).

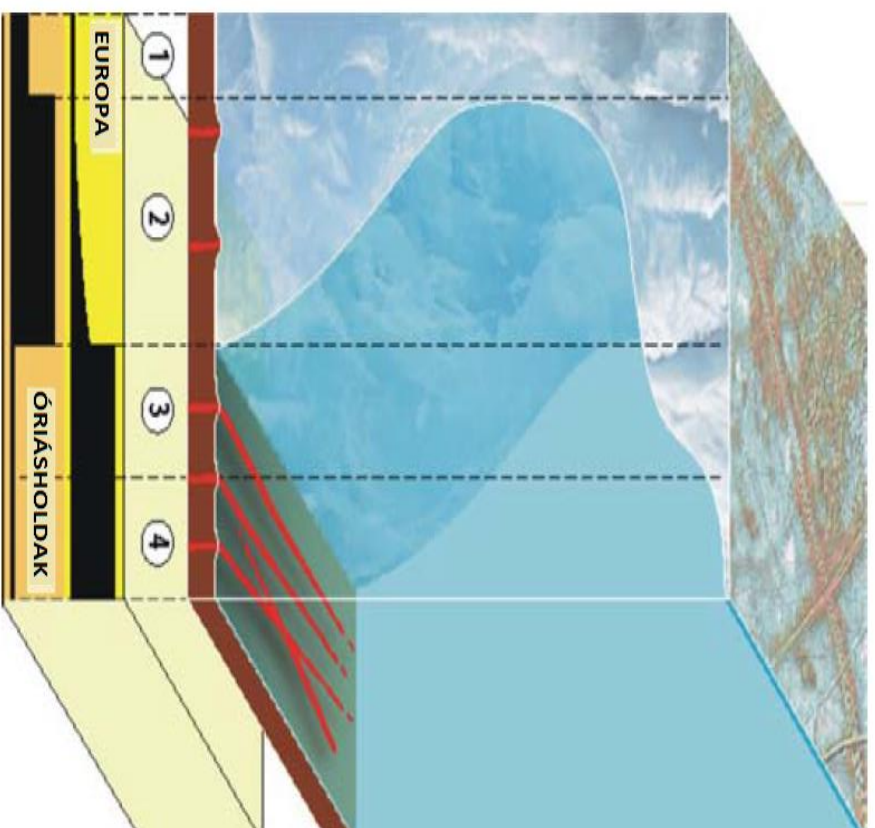
Négyes típusú környezetek: A fenti lista (1)-es és (2)-es csoportjába sorolhatók. Két jégréteg között található vízóceán feltételezhető a Titan és az Enceladus (Szaturnusz holdak), illetve a Ganymedes és a Callisto (Jupiter holdak) felszíne alatt. Ilyen környezetekben nehéz elképzelni, hogyan kerülnek az élet építőkövei az óceánba. Kérdéses, hogy egyáltalán kialakulhatnak-e primitív életformák.

² A hólabda állapotról bővebben: <http://www.matud.iif.hu/08jun/03.html>

³ A Galileo weboldala: <http://solarsystem.nasa.gov/missions/profile.cfm?Sort=Alpha&Letter=G&Alias=Galileo>



2. ábra: A lemezektonika, a köpenybeli konvekció és a dinamómechanizmus kapcsolatait mutatja be az ábra. Föltül: a rendszerben a közellenezek mozgása révén olyan folyamatot követhetünk végig, amely bioszféra kialakulásához vezethet. Alul: a lemezek nincsenek mozgásban. Emiatt a lánc több állomása is kihullik, és kérdéses a bioszféra lehetősége. A felső körfolyamat az egyes, míg az alsó a kettes típusú bolygókra jellemző (Lammer & társai, 2009).

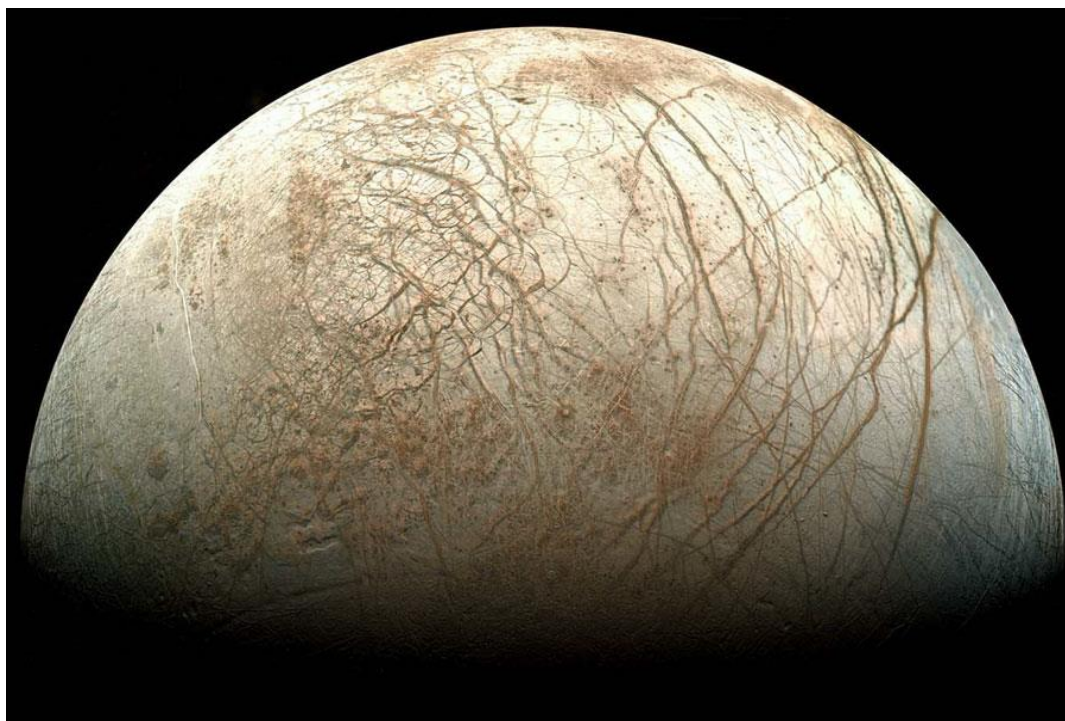


3. ábra: Föltül a folyékony vízréteg elhelyezkedésének lehetőségei. Függőleges szaggatott vonalak határolják: (1) a teljesen megfagyott réteg, (2) két fagyott réteg közé zárt óceán, (3) vastag, felszíni jégréteg alatti globális folyékony réteg, mely érintkezik egy szilikát felülettel, (4) az előbbihez hasonló, de vékony felső jégréteggel. Alul: látható, hogy az Europa, illetve az óriásholdak (Ganymedes, Callisto) mely csoportokba tartozhatnak (Lammer & társai, 2009).

Lakható holdak: a központi csillag IZH-jában keringő bolygó körül érdemes kutatni bioszférával rendelkező exoholdak után. A klímát egy hold felszínén a csillag luminozitásán kívül más hatások is befolyásolják. Például, a bolygóról visszavert fény, az árapályfűtés és az az idő, amit a hold a bolygója árnyékkúpjában tölt (Heller, 2012). Ezen szempontok összegzésével meghatározható egy új távolság tartomány a bolygó körül, amelyen belül található hold felszínén folyékony halmazállapotú víz lehet jelen.

A megfelelő energia mennyiség állandóságához lényeges, hogy a hold stabil pályán keringjen elég hosszú ideig az életformák kialakulásához. A Roche-sugárnál közelebb nem kerülhet a bolygójához, ugyanis ekkor az árapály erők szétszaggatnák a holdat. Legjobb, ha távol marad a Roche-határtól, ugyanis már annak közelében is a nagymértékű árapályfűtés miatt megemelkedhet a felszíni hőmérséklete, és a megszaladó üvegházhatás miatt a hold elvesztheti vízkészletét. Azonban túlságosan távol sem keringhet bolygójától, ekkor ugyanis a központi csillag vagy más bolygók erősen perturbálhatják és instabillá tehetik a holdpályát. A Hill-sugár 1/3-ánál rövidebb fél nagytengelyű pálya az ideális (Nagy & Pál, 2011).

Jupiterhez hasonló, vagy annál nagyobb tömegű bolygók körül akár Föld méretű holdak is előfordulhatnak. Ezeken megfelelő geológiai adottságok mellett akár egyes típusú környezet is kialakulhat.



4. ábra: Az Europa felszínét szabdaló repedések.

Forrás: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Europa>

2.3. Az exobolygó kutatás módszerei

A méréskehez számos módszer és egyre modernebb, pontosabb eszközök állnak rendelkezésre. A megfigyelések célja nem csupán az ismert exobolygók számának növelése, hanem a fizikai tulajdonságaik és pályapaelemeik meghatározása. A kutatási eljárásokat négy nagyobb csoportba sorolhatjuk: fotometrián, mikrolencsézésen, dinamikai effektusokon és egyéb módszereken alapuló megfigyelések.

2.3.1. Fotometria

Ebbe a kategóriába tartozik a közvetlen képalkotás, amelynek segítségével már fedeztek fel exobolygókat, bár igen keveset. Mégis előfordulhat, hogy földi vagy űrtávcsövek felvételein maga a bolygó látható a csillaga körül. Akár törmelékkorong is felfedezhető megfelelő rálátás esetén. A közvetlen észlelést a csillag erős fénye nehezíti, de mégis lehetséges, ha ezt kitakarjuk, illetve a bolygó elég nagy átmérőjű és kellően távol kering a központi csillagtól. Ezen kívül a bolygó többlétsugárzása, amely a csillag sugárzásához adódik, kimutatható infravörös tartományban. Az észleléshez szükséges pontosság elérését földi teleszkópok esetén az adaptív optika segíti, az űrbeli műszereknél pedig a légkör hiánya. A továbbiakban minden módszer indirektnek tekinthető⁴.

A fotometriához tartozik a Rossiter-McLaughlin-effektuson alapuló képalkotás. Ez a spektroszkópiai effektus a Doppler-hatással magyarázható, amely szerint a nyugalomban lévő megfigyelőhöz képest mozgó forrásból származó sugárzás frekvenciája, illetve hullámhossza változik. Tegyük fel, hogy a megfigyelt csillag a látóirányunkra nagyjából merőleges tengely körül forog. A felénk közeledő oldala a rövidebb hullámhosszú kék szín felé látszik eltolódni, míg a távolodó a vörös felé. A forgással megegyező irányban keringő bolygó, amikor átvonul a csillaga előtt, először a felénk közeledő, utána a távolodó oldalból takar ki egy részt. A csillag színe az átvonulás közben megváltozik.

Tranzit, vagy fedési módszernek nevezzük azt a detektálási eljárást, amely során az exobolygó átvonul a csillaga előtt és közben lecsökkenti a csillagból felénk érkező fényességet (5. ábra). A részleges fedés miatt a csillag intenzitása periodikus változást mutat, hasonlóan a változócsillagokhoz. A módszer jól alkalmazható sok rövid expozíciós idejű mérés elvégzésénél. Akár kisméretű távcsövekkel is kimutatható a bolygó által okozott csekély mértékű

⁴ Az indirekt módszerekről bővebben:

http://www.konkoly.hu/~kovari/CSILLAGASZAT/tananyag/CSILLAGASZAT/11_02.html

fényességváltozás, ha elegendő mérési adat áll rendelkezésre. Ezt az elvet alkalmazzák a bevezetésben már említett HATNet, WASP, XO és TrES földfelszínre telepített távcső hálózatok, amelyeknek nagyjából száz exobolygó felfedezését köszönhetjük. Azonban a tranzit módszert a Kepler-űrtávcső⁵ tette a jelenlegi legtermékenyebb eljárássá. A 2009-ben földkövető pályára állított teleszkóp által szolgáltatott adatok feldolgozása napjainkban is tart. A 2014 novembere után megerősített Kepler-bolygók száma 800 körüli, ám ez az érték még növekedni fog a feldolgozottság javulásával.

2.3.2. Gravitációs mikrolencsék

A gravitációs lencse-hatáson alapuló módszerrel eddig csupán néhány exobolygót detektáltak. Az észleléshez egy speciális térbeli helyzet szükséges: két, tőlünk különböző távolságban lévő csillagnak azonos látóirányba kell esnie. A megfigyelőhöz közelebbi csillag tömege révén a távolabbi egyenes vonalban haladó fényét eltéríti, és egy lencséhez hasonlóan összegyűjti, felerősíti. Ezt gravitációs mikrolencse-hatásnak nevezzük, amely annyiban tér el a gravitációs lencsézéstől, hogy itt nem galaxis tömegű objektumok görbítik meg a fény útját. Amennyiben az előtét csillag körül bolygó kering, annak gravitációs tere szintén lencsehatást hoz létre, a háttércsillag további kifényesedését okozva. A háttércsillag fénygörbéje ilyenkor az egyenletes fényesség erősödés mellett gyors másodlagos felfénylést is mutat. Ha a bolygó körül hold is kering, egy harmadlagos csúcs is megjelenhet.

A gravitációs mikrolencse jelenségnek köszönhetően a lengyel OGLE⁶ (Optical Gravitational Lensing Experiment) program keretében eddig 15 exobolygót fedeztek fel, közülük kettőt egyazon naprendszerben.

2.3.3 Dinamikai effektusok

A radiális sebesség mérés egy igen hatékony kutatási módszer, 2014 előtt a legtöbb exobolygót (kb. 400 megerősítve) ennek segítségével fedezték fel. A tranzit és a radiális sebesség módszer eredményeit tekintve elmondható, hogy e kettővel találták meg a jelenleg ismert exobolygók hozzávetőlegesen 80%-át. Az 1.1. alfejezetben szereplő, 1995-ben elsőként

⁵ A Keplerről bővebb információ:

<http://kepler.nasa.gov/news/nasakeplernews/index.cfm?FuseAction=ShowNews &NewsID=324>

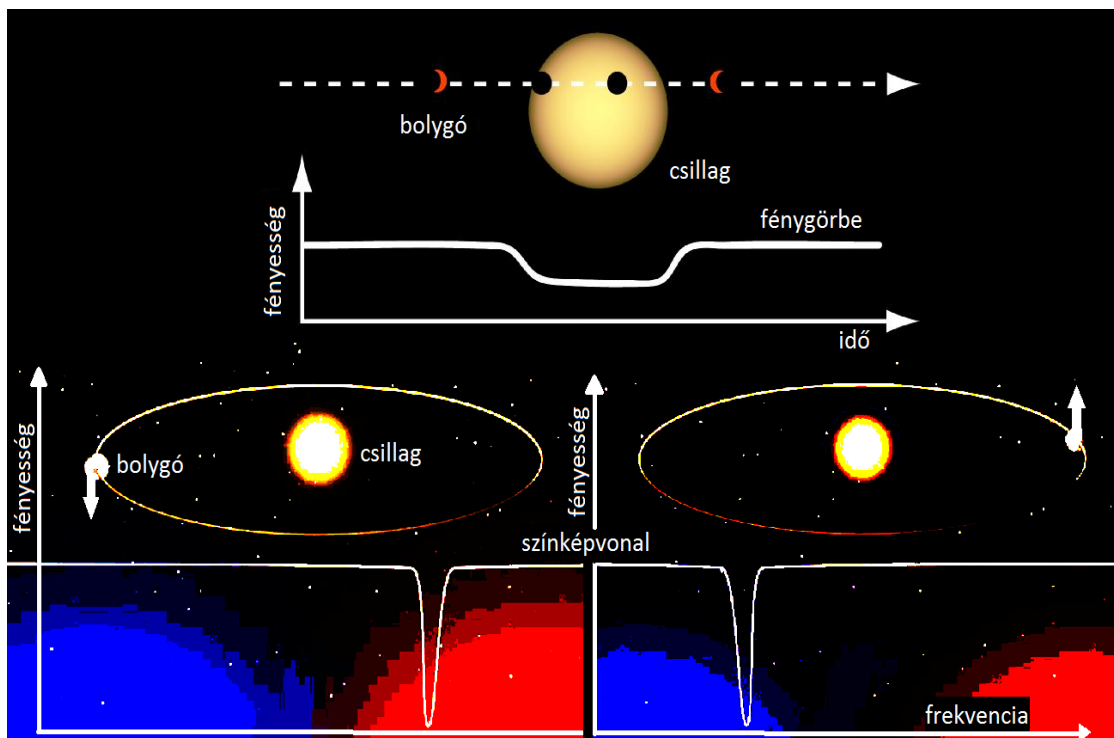
⁶ Az OGLE program honlapja: <http://ogle.astrouw.edu.pl/>

megerősített exobolygót is ezzel a módszerrel fedezték fel. Az eljárás a csillag és a bolygója vagy bolygói közös tömegközéppont körüli keringésén alapul. A rendszerben keringő bolygó hatására a központi csillag radiális sebessége periodikus változást mutat. Ha nem is merőleges a rálátásunk a bolygórendszer keringési síkjára, a Doppler-hatás következtében a központi csillag színképvonalai a keringés periódusa szerint akkor is eltolódnak vörös, illetve kék tartományba (5. ábra). A bolygók jelenlétének megerősítéséhez és paramétereik meghatározásához egyéb kiegészítő módszerekre van szükség.

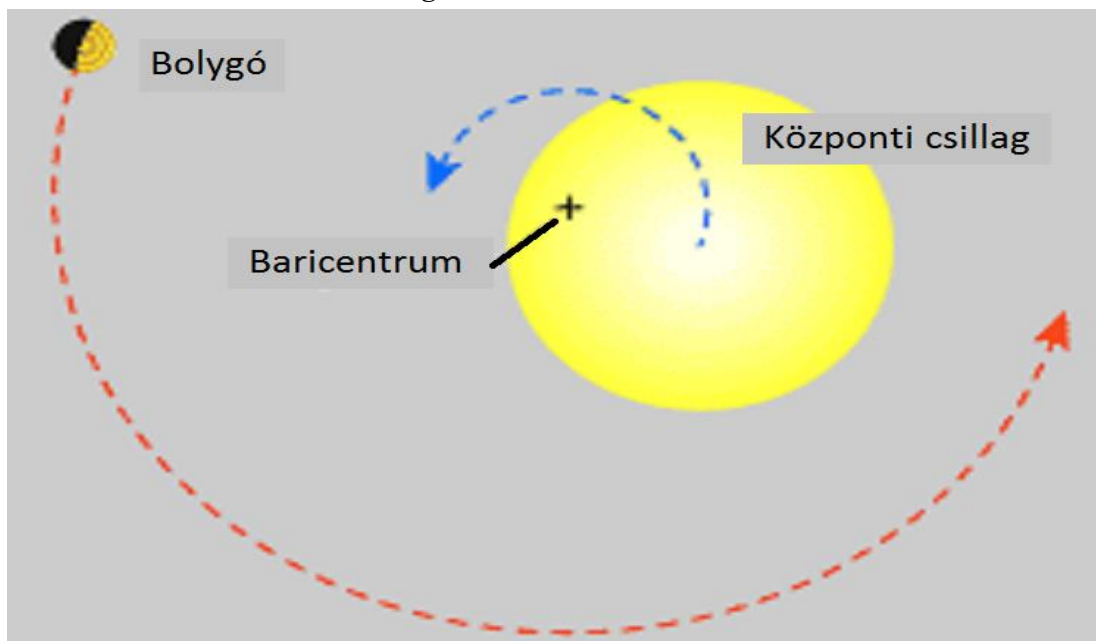
Dinamikai effektuson alapul a pulzárjelek modulációjának megfigyelése. Egy pulzár rádiójelében frekvencia és amplitúdó modulációt okozhat a pulzár és bolygója barincentrum körüli keringése. A pulzárok szupernóva robbanásból hátramaradt neutroncsillagok, amelyek maximum 10-100 km átmérőjűek, és röntgensugárzást bocsátanak ki. Az egykori csillag ledobott rétegeinek egy része körpályára állhat a pulzár körül, az anyagból másodlagos protoplanetáris korong jöhet létre, amelyben bolygók is kialakulhatnak. Az ismert élet számára az ilyen exobolygók kedvezőtlen környezetet jelentenek a közeli neutroncsillagból származó nagyenergiájú sugárzás miatt.

Egy csillag imbolygó mozgását az éggömbön egy vele közös rendszerben keringő másik csillag vagy exobolygó is okozhatja. Az egy rendszerben lévő égitestek közös tömegközéppont körül keringenek kúpszelet alakú pályákon (6. ábra). Asztrometriai módszerrel a csillag mozgásából következtetni lehet arra, hogy más nagyméretű test is kering a rendszerében. A test tömegének meghatározásával ki lehet zárni másik csillag, esetleg barna törpe jelenlétét. Ha a tömeg nem éri el a 13 jupitertömeget, valószínű, hogy egy vagy több exobolygó okozza a csillag kitérő mozgását. A keringés középpontjának elhelyezkedése függ a csillag, illetve a bolygók tömegétől és a bolygópályák fél nagytengelyétől. A baricentrum általában a központi csillag felszíne alatt helyezkedik el, de kellően nagy tömegű és megfelelően távol keringő bolygó vagy bolygók esetén a rendszer tömegközéppontja messzebb is kerülhet a csillagtól. Ilyenkor a csillag imbolygása nagyobb lesz, ezért műszerekkel könnyebben kimutatható. Azonban még a legnagyobb kitérést mutató csillag is csupán milli-ívmásodperces amplitúdóval imbolyog.

Asztrometria segítségével eddig kevés exobolygót detektáltak és erősítettek meg. A 2013 decemberében pályára állított Gaia űrszonda érzékeny műszereinek köszönhetően alkalmas lenne ezzel a módszerrel akár több ezer bolygó felfedezésére, jelöltek megerősítésére, illetve fizikai paramétereik meghatározására. Azonban egy-egy csillag csak kevés alkalommal és rövid időre kerül az űrtávcső látóterébe a teljes élettartama alatt. Megvizsgáltam, hogy a Gaiahoz hasonló érzékenységgű űrtávcső segítségével kimutathatók lennének-e az ismert exobolygórendszerek központi csillagainak imbolygásai asztrometriai módszerrel. Ezzel kapcsolatos számításaimat a 3. fejezet tartalmazza.



5. ábra: A spektroszkópai és a fedési módszer összekapcsolása. Fölül: a csillag fénygörbéjén intenzitás csökkenés látható az átvonuló bolygó miatt. Alul: baloldalt a felénk közeledő bolygó hatására a csillag távolodni látszik, intenzitásgörbéje a vörös felé tolódik. Jobbra épp ellenkezőleg, ekkor kékeltolódást észlelünk.



6. ábra: A vörös szaggatott vonal mentén mozgó bolygó és a kék mentén mozgó központi csillag megegyező irányban egy közös tömegközéppont körül keringenek. Az ábrán a centrum a csillag felszíne alatt található, de távol az égitest középpontjától. Forrás:

<http://www.hao.ucar.edu/research/stare/search.html>

2.3.4. Egyéb módszerek

További ritkábban használt, vagy eddig csak elméletben kidolgozott módszerek is léteznek, amelyek a fenti három csoportba nem sorolhatók be. Egy a csillagok körüli törmelékkorongok vizsgálatára irányuló módszer, amely a gravitációs perturbáló hatáson alapszik, segíthet exobolygók kimutatásában. A cirkumsztelláris törmelékkorongban amennyiben aszimmetrikus gyűrűket vélnek felfedezni, elképzelhető, hogy bolygók keringenek. Ezek pásztorkutya módjára terelik sávokba a törmeléket gravitációs perturbáló hatásuk révén, és nem engedik összeállni nagyobb égitestekké, ha megfelelő rezonanciában mozognak egymással. A módszer olyankor is használható, amikor egy már ismert exobolygó esetén pályaháborgást figyelünk meg. Ezt egy, a rendszerben keringő, eddig fel nem fedezett bolygó okozhatja.

Az exoholdak elméleti észlelhetőségét szintén ebbe a kategóriába soroltam. Bár még egyetlen exobolygó körül sem fedeztünk föl holdat vagy holdrendszert, ezek létezése szinte biztosra vehető. Főleg a Jupiterhez hasonló nagytömegű planétákat lenne érdemes megvizsgálnunk. Több elméleti módszer is létezik exoholdak kimutatására, amelyek hasonlóak az idáig felsoroltakhoz, ám érzékeny műszerekre van szükség eredményes mérésekhez. Fotometriai fedési módszer használatával szimulációt futtattak le a Föld-Hold rendszerre (Simon és társai, 2007), miközben átvonul a Nap előtt. Ennek eredményeként sikerült a Holdat detektálni és a tömegét meghatározni. A szóban forgó cikkben kiszámolták, hogy a jelenlegi technikával egy a Naphoz hasonló csillag körül 1 CsE sugarú pályán keringő Neptunusz méretű bolygó körül egy földtömegű holdat képesek lennénk kimutatni.

3. Kutatás lakható világok után

Az eddig felfedezett exobolygók listája elérhető az exoplanets.org internetes adatbázisában. A webhelyen 2014. október 14-én tárolt adatokat használtam fel munkám során, amelynek célja két kérdés megválaszolása volt. Először megvizsgáltam, hogy a megerősített exobolygók közül melyek lennének kimutathatók egy a Gaiához hasonló űrszonda érzékeny műszereinek segítségével asztrometriai módszert alkalmazva. Másodszor arra kerestem a választ, hogy közülük melyek keringenek a lakható zónában, illetve külső határán túl, vagyis hány exobolygó tartozhat a 2. fejezetben definiált élet számára kedvező hármas típusúként definiált környezetek közé. A válaszokhoz több részeredményen keresztül jutottam el.

A felhasznált és kiszámított adatok nagy mennyisége miatt nem lehetséges jelen dolgozatba a teljes táblázatot beilleszteni, így ezeket elektronikus formában mellékelem dolgozatomhoz, egy online megosztó oldalon keresztül (link a táblázatokhoz lásd: 39. old.). Azonban néhány válogatott adatot bemutatok ebben a fejezetben.

3.1. Csillagok imbolygása

A bolygóval rendelkező csillagok a körülöttük keringő testek hatására imbolyogni látszanak az égbolton egy bizonyos tartományon belül. Ennek a tartománynak a nagyságát számoltam ki az összes bolygóval rendelkező csillag esetére. Ez után megvizsgáltam, hogy egy adott csillag mekkora szögben tér ki az éggömbön vett átlagos helyzetétől. Ez képezi a 2.3.3 alfejezetben tárgyalt asztrometriai észlelési módszer alapját. A számításokhoz a mellékelt táblázatban szereplő adatokat használtam fel: bolygótömeg jupitertömegben megadva, bolygópálya fél nagytengelye csillagászati egységgel (CsE) kifejezve, pálya-excentricitás, valamint csillagtömeg naptömeg egységekben feltüntetve.

A táblázat további oszlopai tartalmazzák a számításaimat. Minden esetben meghatároztam a rendszer baricentrumának a központi csillag tömegközéppontjától mért távolságát. Első közelítésben az egy bolygós rendszerekben található exobolygók csillagukra gyakorolt kitérítő hatását vizsgáltam meg. Az alábbi függvényt alkalmaztam a baricentrum helyzetének meghatározásához:

$$R = \frac{m \cdot a}{m + M_*}$$

Az itt szereplő m a bolygó tömege, a a bolygópálya fél nagytengelye és M_* a csillag tömege. Így egy közepes távolságot kaptam a csillagtól. A Földről nézve ennek a távolságnak a szögátmérője mutatja meg a csillag imbolygásának nagyságát. Ezt követően a bolygópálya excentricitását is figyelembe vettem, hogy meghatározható legyen a legnagyobb távolság a csillag és a rendszer baricentruma között. Ehhez a fenti képletben szereplő a -t $a \cdot (1+e)$ alakra bővítettem, ahol e a bolygópálya excentricitása. A táblázatban a közepes és a legnagyobb csillagközéppont-baricentrum távolságokat CsE-ben adtam meg. A csillag legnagyobb kitérése az átlagos helyzettől akkor figyelhető meg, amikor a bolygó az apocentrumban található. Ilyenkor van legtávolabb egymástól a két égitest.

Ezt követően megvizsgáltam, hogy ezeknek a távolságoknak mekkora a szögátmérője a Földről nézve. Ehhez a csillagok Naprendszer-től vett távolságával bővítettem a táblázatomat. Tekintsünk egy derékszögű háromszöget, amelynek egyik befogója egy exobolygó rendszer baricentruma és csillaga közti távolság, a másik pedig a Naprendszer és a távoli rendszer távolsága. E két adat hányadosát képezve átlagosan mikro-ívmásodperces nagyságrendű értéket kapunk (ehhez képest elhanyagolható különbséget jelent a hányados tangense). Ezt a műveletet elvégezve, a csillagok kitérésére két értéket kaptam: közepes és legnagyobb imbolygási amplitúdó. Így kapjuk meg, hogy adott távolságból hány ívmásodperces szög alatt látszik a csillag és a rendszer tömegközéppontjának távolsága.

Külön megvizsgáltam a két, három, négy, öt, hat és hét bolygót számláló rendszereket. Esetükben is a fenti eljárást alkalmaztam. A bolygók pericentrumban kifejtett minimális kitérítő hatását figyelmen kívül hagytam, mivel $a \cdot (1-e)$ tartományban nem mozoghat a csillag. Ekörül alkot gyűrűt az imbolygási tartomány. Ezt a tartományt tekinthetjük kör vagy ellipszis alakúnak a bolygórendszerre való rálátás szögétől függően. Amennyiben több bolygó is jelen van a rendszerben, akkor a perturbáció miatt az ellipszis fél nagytengelye nem rezonáns esetben körbefordul. Vagyis hosszabb ideig figyelve a csillagot, merőleges rálátás esetén az apocentrum távolságának megfelelő sugarú tartományban látszik imbolyogni az égitest, a rendszer baricentrumával a gyújtópontban.

A több bolygós rendszerekben is közepes és maximális távolságokat számoltam. N számú bolygó esetén a legnagyobb távolság csillag és baricentrum között az alábbi képlet segítségével kapható meg:

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot (1 + e_i) \cdot m_i}{M_* + \sum_{i=1}^n m_i}$$

Feltételezzük, hogy a bolygók egy síkban keringenek, ugyanis ekkor a legnagyobb a csillagra gyakorolt kitérítő hatásuk. Ezeknél az eseteknél is megvizsgáltam a csillagok közepes és maximális imbolygását. Az egy rendszerben keringő bolygók száma alapján kialakított hét csoport mindegyikéből kiválasztottam a legnagyobb maximális kitérést mutató csillagot. Ezek összehasonlítása a 7. ábrán látható. Közülük a legnagyobb értékkel egy ötbolygós rendszer központi csillaga, az 55 Cnc rendelkezik. Ez ~2,8 milli-ívmásodpercet jelent.

Az eredmények kiszámításához felhasznált adatokat az 1. táblázat tartalmazza. Az alábbi oszlopok alkotják: égitest neve, bolygótömeg jupitertömeg egységben, fél nagytengely CsE-ben, excentricitás, csillagtömeg naptömegben, a baricentrum és a csillag középpontjának legnagyobb távolsága CsE-ben, végül a maximális imbolygás, ami az asztrometriai kimutathatóság miatt itt a legfontosabb adat. A táblázaton belül hat kategóriát alakítottam ki az egy rendszerben található exobolygók száma alapján. A teljes 1509 bolygós lista csak egy része látható itt. A kiválasztás fő szempontja az volt, hogy az ismertebb exobolygó kereső missziók felfedezései szerepeljenek benne. Fontos megjegyezni az itt szereplő hatbolygós rendszerrel (*HD 10180*) kapcsolatban, hogy a központi csillag körül jelenleg 9 bolygót gyanítanak, ám az újabbak kis tömegük miatt az imbolygást elhanyagolható mértékben befolyásolják (Tuomi, 2012). A számítás eredményei a 4. fejezetben tekinthetők meg.

3.2. A Gaia űrteleszkóp

A Hipparcos űrtávcső utódjának szánt Gaia, elődjéhez hasonló célokkal állt pályára, ám sokkal pontosabb műszerekkel rendelkezik, amelyekkel szemben az elvárások is magasabbak. Öt éves küldetése során nagyjából egy milliárd csillag mikro-ívmásodperces pontosságú pozícióját, parallaxisát, saját mozgását, valamint néhány fizikai tulajdonságát fogja felmérni, köztük a luminozitásukat. A misszió fő tudományos célja a Tejútrendszer minden eddiginél pontosabb háromdimenziós térképének elkészítése. Ennek segítségével galaxisunk keletkezésének és fejlődésének kérdéseire kaphatunk választ. További célkitűzés a kettős és többes csillagok megszámlálása, vizsgálata, a Lokális csoport tanulmányozása, méretskálájának pontosítása. Ezeken kívül várható kis naprendszerbeli égitestek (aszteroidák, plutinók, TNO-k stb.) detektálása, illetve exobolygók felfedezése.

A Gaia fókuszsíkja 106 CCD detektorból tevődik össze és négy nagyobb egységre osztható. Az égtérképező detektorok alkotják az elsőt. A második az asztrometriai mező (Astrometric Field), a harmadik pedig a BP/RP (Blue and Red Photometers) szakasz. A Gaia fedélzetén található még 12 darab RVS (Radial Velocity Spectrometer) CCD kamera. A fény tíz különböző reflektor segítségével jut el a CCD chipekre, amelyek egyenként 1966 pixelt tartalmaznak. A műszerek érzékenysége lehetővé teszi 20 magnitúdós fényességig a 0,35 milli-ívmásodperces mozgások felbontását. 10 magnitúdóig pedig akár 7 mikro-ívmásodperc is kimutatható. A radiális sebességmérést 17 magnitúdós csillagok esetén 1-10 km/s pontosságúnak becsülték (Jordi & társai, 2010; Lindegren, 2009).

Az ESA (European Space Agency) szondáját 2013. december 19-én juttatták a világűrbe. A Föld L2-es Lagrange pontja körül állt pályára, tőlünk másfél millió km-re. Ebben a környezetben nagyobb észlelési pontosság érhető el a földfelszíni távcsövekhez képest. Itt nem jelentkezik a légkör zavaró hatása, a hőmérséklet nem változik, azonban károsító hatású sugárzás érheti a szondát (pl.: nagyenergiájú galaktikus sugárzás). A napelemeknek köszönhetően állandó a szonda műszereinek energiaellátása, ráadásul árnyékolást is biztosítanak a detektorok számára.

Az üzembe helyezés során kiderült, hogy mégsem érhető el a várt pontosság, illetve a szonda tengely körüli forgása sem teszi lehetővé exobolygók keresését asztrometriai módszerrel. Ezért egy elméletben létező, a Gaiahoz hasonló érzékenységgű űrtávcsövet tétéleztem fel a munkám során. A korábban megkapott imbolygási értékek és a csillagok fényessége alapján kiszámítottam, hogy az ismert exobolygóval rendelkező csillagok közül hány darab lenne kimutatható a távcsővel. A dolgozathoz mellékeltem online táblázatokban az egy rendszerben keringő bolygók száma szerint csoportosítottam a csillagokat. Minden táblázaton a csillagok mellett feltüntettem, hogy az elméleti Gaia az asztrometriai műszere segítségével észlelhetné-e az adott központi csillag imbolygását. Ehhez két feltételnek kell teljesülnie: a V-sávbeli fényesség legyen alacsonyabb 10 magnitúdónál, illetve a csillag imbolygása nem lehet kisebb 7 mikro-ívmásodpercnél. A hiányzó fényességadatok miatt további bővítésre szorult a táblázatom. A számítás eredményeit a 4. fejezetben összegzem. A dolgozatban szereplő 1. táblázatban szürkével besatírozott bolygókat észlelhetné az elméleti Gaia az asztrometriai műszerével.

Két további számítást is elvégeztem az asztrometriai módszer használhatóságával kapcsolatban. A nagyobb átmérőjű magyarországi távcsövek esetén megvizsgáltam, hogy képesek lennének-e kimutatni egy csillagnak a bolygói hatására létrejövő imbolygását. A legnagyobb

átmérővel (1 méter) és határfényességgel (~17,61 mag) rendelkező piszkéstetői RCC távcsővel 0,116 ívmásodperces felbontás érhető el, ami az általam legnagyobb imbolygásúnak számított 55 *Cnc* esetén is messze elmarad az elégségestől. Azonban fotometriai méréseknél nagyon hasznosak lehetnek a hazai műszerek.

Vizsgáltam az exoholdak kimutathatóságát is az anyabolygó pályaháborgásaiból. A Jupiter imbolygását számítottam ki 68 jelentősebb tömegű holdjának hatására. A Földről nézve (~4,2 CsE távolság) 0,41 milli-ívmásodpercesnek adódik a Jupiter kitérülése. Sok parsec távolságból ez több nagyságrenddel lecsökken, így még a Gaia műszereivel sem lenne kimutatható. Exoholdak felfedezésére tehát az asztrometriai módszer jelenleg egyáltalán nem alkalmas.

3.3. A lakható zóna határai

A megerősített exobolygók listáját tovább elemeztem azzal a céllal, hogy megállapítsam, mely Naprendszeren kívüli planéták lehetnek alkalmasak az élet fenntartására. Azok a bolygók (vagy holdjaik) a potenciálisan lakhatóak, amelyek az IHZ-ben keringenek. A lakható zóna külső határán túli környezeteket azért is érdemes vizsgálni, mert itt könnyebben elképzelhető, hogy egyáltalán kialakul élet, mint a zóna belső határánál közelebb a központi csillaghoz. Az ott keringő bolygók nem tekinthetők kedvezőnek az élet számára a magas hőmérséklet miatt.

Az internetes adatbázis segítségével meghatároztam, hol húzódnak az exobolygóval rendelkező csillagok folyékony vizes lakható zónájának határai, vagyis az a csillag körüli határvonal, amelyben egy bolygó felszínén folyékony víz lehet jelen, amennyiben megfelelő nagyságú készlettel rendelkezik belőle. A központi csillag egységnyi idő alatt kisugárzott összes energiája, azaz luminozitás alapján számítható ki a tartomány mérete és távolsága a csillagtól. A Naprendszer esetén a belső határának a Vénusz pályáját vettem, a külsőnek pedig a Marsét. Tehát az IHZ belső gyűrűjének sugara nagyjából 0,7 CsE, míg a külsőé 1,6 CsE. Az exoplanets.org adatbázisában nem álltak rendelkezésemre a csillagok luminozitás értékei, így az alábbi képlet alapján számoltam ki ezeket:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4,$$

ahol R a csillag sugara, T_{eff} a fotoszféra effektív hőmérséklete és σ a Stefan-Boltzmann-állandó ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$). A táblázataimat kibővítettem a csillagok sugaraival, amelyeket napsugár egységben adtam meg, ezen kívül a csillagok effektív hőmérsékletével Kelvin-skálán.

A luminozítás értékek ismeretében egy aránypár segítségével számoltam ki, hogy egy adott csillagtól milyen távol húzódik a folyékony vizes zóna belső, illetve külső határa:

$$r_* = \sqrt{\frac{L_*}{L_\odot}} r_\odot,$$

amelyben r_* a távoli csillag körüli lakható gyűrű egyik határának sugara, L_* a csillag luminozitása, $r_\odot$ és $L_\odot$ pedig a Napra vonatkozó ugyanezen tulajdonságok ($L_\odot=3,827 \cdot 10^{26}$). A Vénusz pályájának fél nagytengelyét ($\sim 0,7$ CsE) az $r_\odot$ -ba helyettesítve az IHZ belső határát képező kör sugarát kaphatjuk meg, a Mars-pálya fél nagytengelyét ($\sim 1,66$ CsE) beírva pedig a külső határt. Feltéve, hogy a csillag sugárzási energiája egyenletesen oszlik el egy gömbfelület mentén.

Tekintsük a tőlünk 1,25 pc-re található α Cen B csillagot! Ismerjük a csillag, valamint a Napunk luminozitását, és a 0,7, illetve 1,6 CsE-nek választott naprendszerbeli távolságokat. Ezekre az értékekre aránypárt felírva meghatározhatom az α Cen B körüli lakható zóna méretét, ebből pedig a körülötte elhelyezkedő bolygópálya fél nagytengelyének ismeretében megállapítható, hogy az exobolygó az IHZ-hez képest hol kering. A csillaghoz közelebbi kör sugara 0,5197 CsE, a távolabbíé 1.1879 CsE. A lakható zóna szélessége 0,6682 CsE. Az α Cen B b nevű bolygó pályájának fél nagytengelye 0,0419 CsE, ezért a zóna belső határánál közelebb kering a csillaghoz. Kedvező geológiai adottságok mellett sem valószínű, hogy kialakulhat rajta élet a túl magas beérkező energiaáram miatt. A többi exobolygó esetén is ugyanilyen számításokat végeztem. Az eredmények a mellékelt táblázatban szerepelnek. Ebből kiválasztottam néhány exobolygót és tömeg szerint növekvő sorrendben beillesztettem a dolgozatomba (2. táblázat). A számításokhoz felhasznált fontosabb adatokat is feltüntettem mellettük. A válogatás fő szempontja a változatos tömegskála bemutatása volt. Szürke háttérrel jelöltem a potenciálisan lakható exobolygókat. Egy jupitertömegnél masszívabb bolygóknál bejelöltem egy határvonalat. Itt ugyanis az élet keresése már áttevődhet egy bolygó körüli lehetséges holdrendszerre. Egy gázóriás kevésbé valószínű, hogy a biogén elemek jelenlétéhez szükséges szilárd kőzetburokkal rendelkezik.

Az explanets.org webhelyről származó adatok alapján készült mellékelt táblázatot kibővítettem a következő oszlopokkal: a központi csillag luminozitása Wattban kifejezve, az IHZ belső és külső határa, illetve szélessége CsE-ben megadva. További oszlopok jelzik, hogy a határokhöz képest hol kering egy adott bolygó. Ezek alapján megmondható, hogy melyik exobolygó lehet potenciálisan lakható.

bolygó neve	bolygótömeg (M_{Jup})	fél nagytengely (CsE)	excentricitás	csillagtömeg (M_{Nap})	baricentrum- csillagközpont legnagyobb távolság (CsE)	legnagyobb imbolygás
egybolygós rendszerek						
11 Com b	16,1284	1,17872	0,231	2,04	0,0108678	0,00012226
7 CMa b	2,43233	1,80264	0,14	1,34	0,003554321	0,00017996
alpha Cen B b	0,00354639	0,0418506	0	0,934	$1,51676 \cdot 10^{-7}$	$1,2087 \cdot 10^{-7}$
BD +14 4559 b	1,51929	0,775866	0,29	0,86	0,00168486	$3,4843 \cdot 10^{-5}$
CoRoT-16 b	0,535943	0,0617874	0,33	1,098	$3,82686 \cdot 10^{-5}$	$4,5558 \cdot 10^{-8}$
epsilon CrB b	6,04937	1,23696	0,11	1,44	0,005483593	$8,0773 \cdot 10^{-5}$
HIP 12961 b	0,354314	0,25497	0,166	0,67	0,000149989	$6,517 \cdot 10^{-6}$
iota Dra b	9,31534	1,31029	0,7124	1,14	0,017364776	0,00055967
kappa CrB b	1,9747	2,71619	0,125	1,58	0,003640959	0,00011939
KELT-2 A b	1,52019	0,0549707	0	1,308	$6,09139 \cdot 10^{-5}$	$4,7404 \cdot 10^{-7}$
Kepler-14 b	8,40643	0,0806879	0,0350051	1,512	0,000440848	$4,4985 \cdot 10^{-7}$
NGC 2423 3 b	6,63106	1,6555	0,21	1,18	0,010687327	$1,3952 \cdot 10^{-5}$
OGLE-TR-113 b	1,25508	0,0228946	0	0,779	$3,51541 \cdot 10^{-5}$	$5,859 \cdot 10^{-8}$
omega Ser b	1,70083	1,07698	0,106	2,17	0,000890463	$1,1042 \cdot 10^{-5}$
Pr 211 b	1,84394	0,0320419	0	0,952	$5,91293 \cdot 10^{-5}$	$3,4782 \cdot 10^{-7}$
Qatar-1 b	1,08272	0,0234308	0	0,85	$2,84534 \cdot 10^{-5}$	$1,6259 \cdot 10^{-7}$
TrES-1 b	0,752484	0,0392516	0	0,878	$3,20835 \cdot 10^{-5}$	$2,1079 \cdot 10^{-7}$
WASP-1 b	0,827536	0,0385203	0	1,2	$2,53388 \cdot 10^{-5}$	$6,208 \cdot 10^{-8}$
WTS-1 b	3,98653	0,0466301	0,05	1,2	0,000154764	$4,8364 \cdot 10^{-8}$
XO-1 b	0,918265	0,049283	0	1,027	$4,20244 \cdot 10^{-5}$	$2,4458 \cdot 10^{-7}$
kétbolygós rendszerek						
47 UMa b	2,54589	2,10149	0,032	1,063	0,016861781	0,00119904
47 UMa c	0,545774	3,57197	0,098	-	-	-
BD +20 2457 b	11,8883	1,04992	0,15	1,06	0,048695745	0,00024348
BD +20 2457 c	6,90191	1,45701	0,18	-	-	-
BD -08 2823 b	0,045941	0,0558236	0,15	0,74	0,000420701	$9,8991 \cdot 10^{-6}$
BD -08 2823 c	0,328101	0,679166	0,19	-	-	-
GJ 667 C b	0,0171709	0,0504235	0,09	0,33	$1,97064 \cdot 10^{-5}$	$2,7234 \cdot 10^{-6}$
GJ 667 C c	0,0134408	0,125092	0,34	-	-	-
HAT-P-13 b	0,8514	0,0426946	0,0133	1,22	0,024318857	0,00012038
HAT-P-13 c	14,2696	1,22574	0,6616	-	-	-
HD 108874 b	1,2902	1,03527	0,1276	0,95	0,01076149	0,00017186
HD 108874 c	1,02837	2,72021	0,273039	-	-	-
HD 11964 b	0,608106	3,1288	0,041	1,08	0,002149668	$6,5436 \cdot 10^{-5}$
HD 11964 c	0,0770689	0,226601	0,301733	-	-	-
HD 125612 b	3,06805	1,3728	0,45899	1,1	0,005598509	0,00010329
HD 125612 c	0,0580667	0,0522124	0,27499	-	-	-

bolygó neve	bolygótömeg (M_{Jup})	fél nagy tengely (CsE)	excentricitás	csillagtömeg (M_{Nap})	baricentrum- csillagközpont legnagyobb távolság (CsE)	legnagyobb imbolygás
hárombolygós rendszerek						
61 Vir b	0,016075	0,05006	0,12	0,942	0,000115763	$1,35316 \cdot 10^{-5}$
61 Vir c	0,0333747	0,216926	0,14	-	-	-
61 Vir d	0,0715929	0,474527	0,35	-	-	-
HD 181433 b	0,0237331	0,0800943	0,396	0,78	0,010015089	0,000374264
HD 181433 c	0,640416	1,75604	0,28	-	-	-
HD 181433 d	0,535482	3,02208	0,48	-	-	-
HIP 14810 b	3,87441	0,0692271	0,142483	0,99	0,015966407	0,000298731
HIP 14810 c	1,27518	0,545404	0,153155	-	-	-
HIP 14810 d	0,5806	1,88623	0,165251	-	-	-
upsilon And b	0,669277	0,0593858	0,013	1,31	0,02078473	0,001540568
upsilon And c	1,91855	0,830445	0,223848	-	-	-
upsilon And d	4,11582	2,52452	0,267395	-	-	-
négybolygós rendszerek						
GJ 876 b	1,9469	0,208098	0,0324	0,32	0,005842371	0,001246062
GJ 876 c	0,612168	0,129574	0,25591	-	-	-
GJ 876 d	0,0184193	0,0208066	0,207	-	-	-
GJ 876 e	0,039229	0,333345	0,055	-	-	-
mu Ara b	1,74552	1,5273	0,128	1,147	0,030392738	0,001959419
mu Ara c	1,88907	5,34057	0,0985	-	-	-
mu Ara d	0,0345873	0,0927843	0,172	-	-	-
mu Ara e	0,543322	0,93961	0,0666	-	-	-
öt bolygós rendszer						
55 Cnc b	0,801471	0,113377	0,004	0,905	0,034541607	0,002798908
55 Cnc c	0,164558	0,237305	0,07	-	-	-
55 Cnc d	3,54451	5,47467	0,02	-	-	-
55 Cnc e	0,0261924	0,0154393	0	-	-	-
55 Cnc f	0,172877	0,773567	0,32	-	-	-
hatbolygós rendszer						
HD 10180 c	0,0415054	0,0641175	0,077	1,06	0,002930658	$7,51127 \cdot 10^{-5}$
HD 10180 d	0,0376549	0,128581	0,143	-	-	-
HD 10180 e	0,0797893	0,269917	0,065	-	-	-
HD 10180 f	0,0743252	0,49279	0,133	-	-	-
HD 10180 g	0,0673813	1,42271	0	-	-	-
HD 10180 h	0,206033	3,42452	0,151	-	-	-

1. táblázat: A bolygók száma szerint hat csoportra osztott bolygórendszerek. A szürkével besatírozott bolygók központi csillagának imbolygása kimutatható a Gaiával.

bolygó neve	bolygótömeg (M_{Jup})	fél nagy tengely (CsE)	csillag luminozitása (W)	IHZ belső határa (CsE)	IHZ külső határa (CsE)	látná-e a Gaia az imbolygást
alpha Cen B b	0,003546	0,041851	$2,11 \cdot 10^{26}$	0,519692	1,187867	nem
HD 85512 b	0,011395	0,260405	$1,32 \cdot 10^{26}$	0,411869	0,941414	nem
HD 7924 b	0,029119	0,056641	$1,44 \cdot 10^{26}$	0,429818	0,982441	nem
HD 10180 d	0,037655	0,128581	$5,17 \cdot 10^{26}$	0,813624	1,859713	igen
HD 10180 c	0,041505	0,064118	$5,17 \cdot 10^{26}$	0,813624	1,859713	igen
HD 125595 b	0,041676	0,080944	$2,14 \cdot 10^{26}$	0,522905	1,195212	nem
HD 4308 b	0,047738	0,119192	$2,45 \cdot 10^{26}$	0,560445	1,281018	nem
HD 10180 g	0,067381	1,42271	$5,17 \cdot 10^{26}$	0,813624	1,859713	igen
HD 47186 b	0,071203	0,049841	$4,57 \cdot 10^{26}$	0,765283	1,749218	igen
HD 11964 c	0,077069	0,226601	$8,89 \cdot 10^{26}$	1,067109	2,439106	igen
HD 10180 e	0,079789	0,269917	$5,17 \cdot 10^{26}$	0,813624	1,859713	igen
HAT-P-11 b	0,082507	0,052544	$1,01 \cdot 10^{26}$	0,359981	0,822813	nem
HAT-P-18 b	0,197162	0,05595	$1,03 \cdot 10^{26}$	0,362969	0,829643	nem
HD 10180 h	0,206033	3,42452	$5,17 \cdot 10^{26}$	0,813624	1,859713	igen
HD 6434 b	0,397195	0,142061	$2,57 \cdot 10^{26}$	0,57417	1,312389	nem
WASP-42 b	0,496749	0,054734	$1,82 \cdot 10^{26}$	0,482823	1,103596	nem
HD 31253 b	0,501427	1,26054	$1,18 \cdot 10^{27}$	1,228334	2,80762	igen
WASP-56 b	0,605178	0,056145	$4,19 \cdot 10^{26}$	0,73256	1,674423	nem
HD 224693 b	0,714594	0,192441	$6,27 \cdot 10^{26}$	0,895972	2,047936	nem
HD 154345 b	0,956901	4,21377	$3,08 \cdot 10^{26}$	0,628114	1,435689	igen
> 1 jupitertömeg						
HD 60532 b	1,0348	0,759258	$2,63 \cdot 10^{27}$	1,834416	4,192951	igen
HD 114783 b	1,10505	1,15987	$1,68 \cdot 10^{26}$	0,464078	1,06075	igen
HD 290327 b	2,54762	3,43052	$3,26 \cdot 10^{26}$	0,645848	1,476224	igen
HAT-P-34 b	3,32973	0,067747	$8,50 \cdot 10^{26}$	1,043513	2,385173	nem
HD 104985 b	4,9174	0,678014	$9,36 \cdot 10^{27}$	3,461323	7,911595	igen
HD 154672 b	5,00638	0,598618	$6,35 \cdot 10^{26}$	0,901928	2,06155	igen
epsilon CrB b	6,04937	1,23696	$1,13 \cdot 10^{29}$	12,03648	27,51196	igen
4 UMa b	7,13242	0,876999	$1,57 \cdot 10^{29}$	14,17185	32,39281	igen
HD 89744 b	8,18778	0,902604	$2,13 \cdot 10^{27}$	1,651787	3,775514	igen
30 Ari B b	9,87792	0,99475	$5,68 \cdot 10^{26}$	0,8528	1,949256	igen
gamma Leo A b	10,3722	1,29554	$9,97 \cdot 10^{28}$	11,29994	25,82844	igen
HD 114762 b	11,6351	0,362932	$3,19 \cdot 10^{26}$	0,639528	1,461778	igen
HD 38529 c	12,2603	3,6002	$1,46 \cdot 10^{27}$	1,368958	3,129047	igen

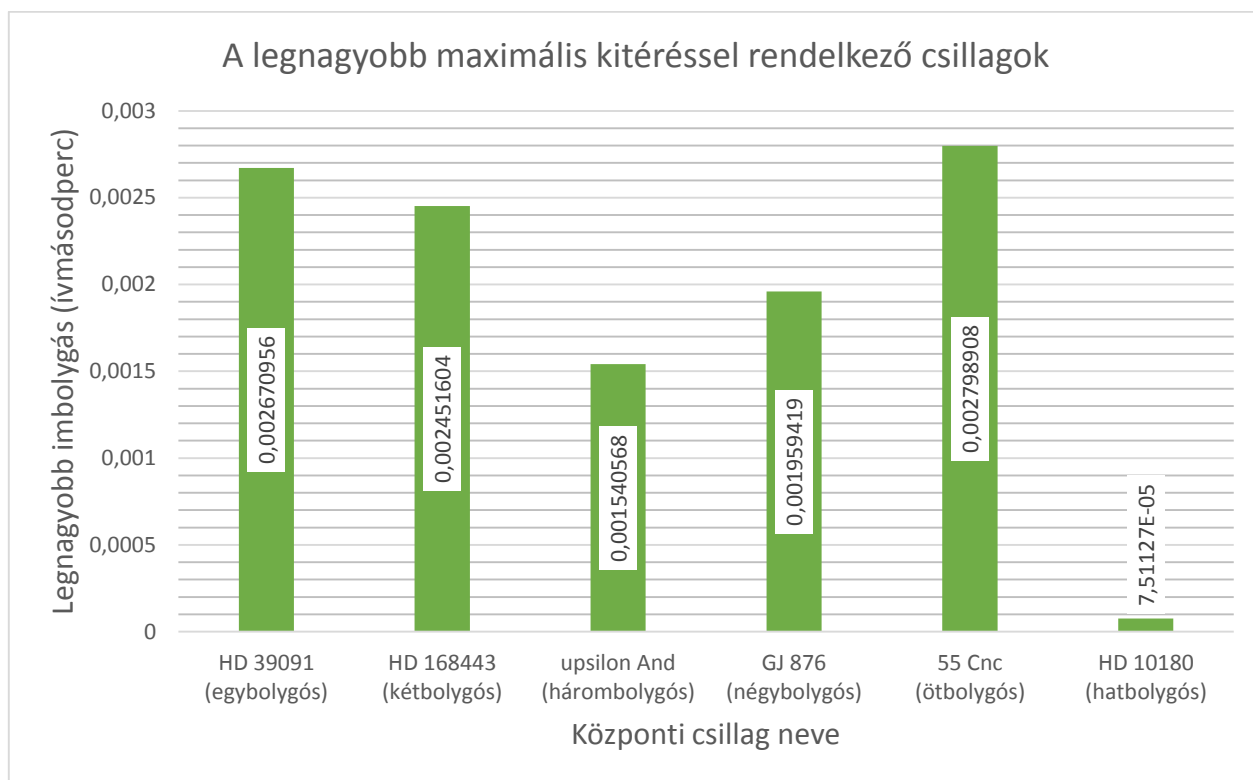
2. táblázat: Exobolygók tömeg szerinti csoportosítása. A szürkével jelzettek potenciálisan lakhatóak az elhelyezkedésük alapján.

4. Diskusszió

A számításaim első felében arra kerestem a választ, hogy mennyire lenne hatékony a Gaia űrtávcső, ha exobolygók asztrometriai módszerrel való kutatására használnánk. Ehhez megvizsgáltam, hogy az eddig felfedezett exobolygók közül hányat lenne képes kimutatni. Az asztrometriai módszer a csillagok bolygók hatására történő imbolygásán alapszik. Ezért első lépésként kiszámoltam, mekkora lehet a bolygóval rendelkező központi csillagok imbolygása. Az eredményekhez ismernem kellett az egy rendszerben keringő bolygók számát, tömegüket, pályájuk fél nagytengelyét, excentricitását, a központi csillag tömegét és tőlünk mért távolságát. Az 1509 megerősített bolygóból 642-nél elegendő adat állt rendelkezésemre. Amennyiben ezek csillagainak maximális kitérése nagyobb 7 mikro-ívmásodpercnél és fényességük kisebb 10 magnitúdónál, a Gaia észlelheti az imbolygást az elméleti érzékenységének köszönhetően.

Az már bonyolultabb kérdés, hogy a rendszerben keringő bolygók számának meghatározására is alkalmas-e az űrszonda. Több bolygó esetén a csillag nem kör vagy ellipszis pályán mozog a baricentrum körül, hanem hurkokat ír le. A csillagpálya pontos alakjának ismeretében következtetni lehet a bolygók számára, pályájára és tömegére. A Gaiának ezeket a hurkokat kellene detektálnia. Itt feltételeztem, hogy a csillag hurokpályákon való mozgásából az elméleti Gaiával meghatározható, hogy hány bolygó kering az adott rendszerben. Így, ha sikerül kimérni az imbolygást, az összes egy rendszeren belül keringő bolygó észlelhető asztrometriai módszerrel. Ezek alapján 327 bolygót lenne képes kimutatni az elméleti Gaia (részletesebben: 3. táblázat).

Az egy rendszerben található bolygók száma szerint hét kategóriát alakítottam ki. Minden csoportból kiválasztottam a legnagyobb maximális kitéréssel rendelkező csillagokat. Ennek kiszámításához a bolygópályák excentricitása különösen fontos volt, ezek nélkül csak a közepes kitérés határozható meg. Feltettem még, hogy a bolygók egy síkban keringenek. A *HD 39091* (egy bolygós), a *HD 168443* (két bolygós), az *ν And* (három bolygós), a *GJ 876* (négy bolygós), az *55 Cnc* (öt bolygós) és a *HD 10180* (hat bolygós) maximális kitérése a legnagyobb a csoportjukon belül. A hét bolygós rendszer esetén nem ismertem a bolygók tömegét, ezért nem kaptam eredményt. A 7. ábrán látható az imbolygás értékek összehasonlítása.



7. ábra: A saját csoportjukon belül legnagyobb maximális kitérést mutató csillagok. A függőleges tengelyen az imbolygás mértéke. Az összehasonlításból látható, hogy az 55 Cnc imbolygása a legnagyobb, ~0,0028 ívmásodperc.

Fontos megjegyezni, hogy kevés esetben ismerjük a Naprendszeren kívüli bolygók valódi tömegét. Az egyik leghatékonyabb felfedezési módszer, a radiális sebesség mérés segítségével csupán $m \cdot \sin(i)$ értéket kaphatunk, ahol m a bolygó tömege és i a pályahajlás. Az exoplanets.org adatbázisból felhasznált minden bolygótömeg ezekről a mennyiségekről függ. A pályahajlást jelenleg fedési exobolygók esetében lehet megállapítani. Azonban nem minden bolygónál áll fenn az a lehetőség, hogy a központi csillagának korongja előtt halad el a Földről nézve. Az asztrometriai módszer alkalmas lehet az m meghatározására. Így kiegészíthetné az eddigi nagyon eredményes módszereket.

A továbbiakban azt vizsgáltam, hány exobolygó lehet potenciálisan lakható, vagyis hány bolygó kering az irradiációs lakható zónában, illetve ennek külső határán kívül. Attól, hogy egy bolygópálya a megfelelő zónában található, még nem biztos, hogy a bolygótest alkalmas az élet számára ideális környezet fenntartásához. Így számításaim során csupán azt kaptam eredményül, hány exobolygón adott a lehetőség, hogy lakható környezetet találjunk az elhelyezkedése alapján. Ehhez a csillagok sugarát és felszíni hőmérsékletét felhasználva kiszámítottam a luminozitásukat.

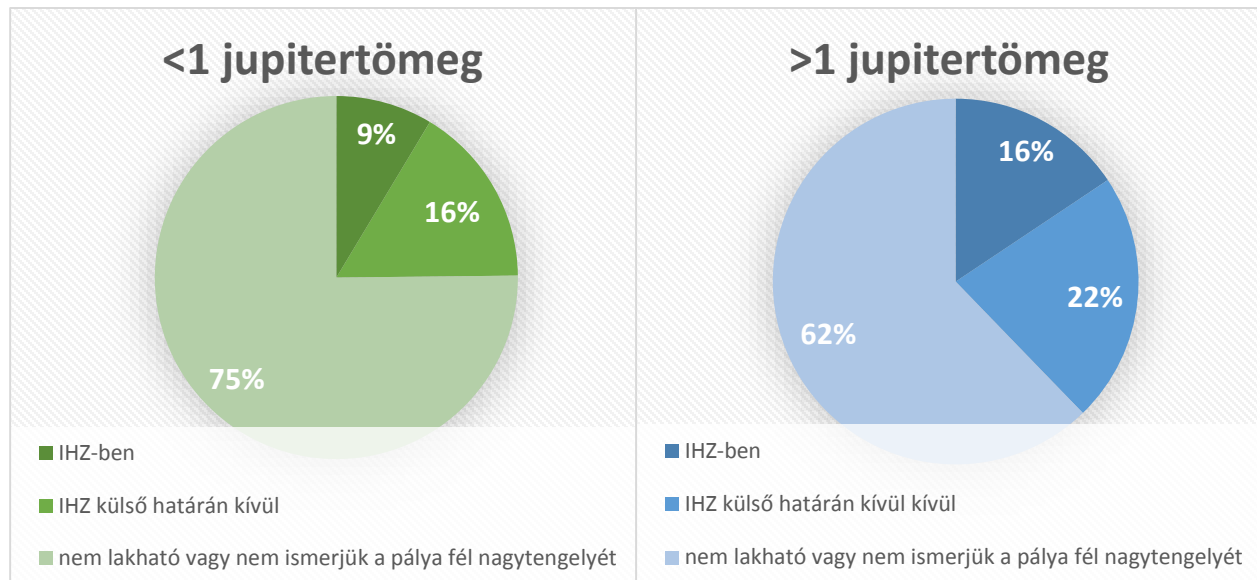
A vizsgált F, G és K csillagoknál az értékek legtöbbször egy nagyságrendbe esnek a Napéval, de legfeljebb három nagyságrenddel térnek el. A luminozitások alapján a Naprendszer lakható zónájának analógiájából számítottam ki az IHZ-k méretét. Ahol a bolygópályák fél nagytengelye ismert volt, meg tudtam határozni a bolygók elhelyezkedését az IHZ-hez képest. Az 1509 megerősítettből 102 exobolygó kering az IHZ-ben, 145 pedig a külső határon kívül (részletesebb felbontás a 3. táblázatban).

A legtöbb exobolygó egyik vagy egyetlen felfedezett tulajdonsága a pályája fél nagytengelye. Ez a termékeny Kepler misszió tranzit módszerének köszönhető, ugyanis ezzel a paraméterrel erősítették meg a jelölteket. A megerősített bolygók legtöbbször igen közel kering csillagához. Az átvonulás észlelésének nagyobb a valószínűsége, ha egy bolygó adott pályahajlás mellett minél közelebb kering a csillagához, mintha távolabb keringene. Ez is magyarázza, miért találtunk kevés olyan exobolygót, amely a lakható zóna külső határán kívül kering. Ráadásul a bolygójelöltséghez legalább háromszor át kell vonulniuk a csillag korongja előtt. A három periódus közel keringő bolygók esetén rövidebb időtartamú, mint távolabbi bolygóknál. A Kepler űrtávcső nagyjából négy éves működése alatt legfeljebb 486 napos ($4/3$ év) periódusidejű exobolygók megerősítésére volt alkalmas.

A csillagukhoz túlságosan közel keringő bolygók a magas hőmérséklet miatt lakhatatlanok. Az élet kialakulása és fejlődése számára legideálisabb az IHZ. Azonban elképzelhető primitívebb életformák felbukkanása a zóna külső határán kívüli bolygótesteken, ha a geológiai viszonyok megfelelnek a 2.2. alfejezetben leírt *hármastípusú környezeteknek*. Az itt szereplő eredmények alapján másfélszer több bolygó tartozhat közéjük, mint az *egyes típusú környezetekhez*, amelyek leginkább a földre hasonlítanak.

A potenciálisan lakható bolygók nagy része a Jupiternél is nagyobb tömegű. Ezek valószínűleg gázóriások, amelyeknek nincs szilárd felszínük. Illetve a 10-20 földtömegnél masszívabbak, ha rendelkeznek is szilárd szilikátburokkal, olyan sűrű légkör veheti őket körül, hogy a felszínen uralkodó nyomásviszonyok kedvezőtlenek lehetnek az élet számára. Mégis érdemes ilyen égitesteknél is vizsgálni a lakhatóságot, mégpedig egy körülöttük elhelyezkedő lehetséges holdrendszerben. A feltételek az élet szempontjából itt tovább szigorodnak (lásd: 2.2.: Exoholdak lakhatósága), ezeket a továbbiakban nem vettem figyelembe. 629 bolygót vizsgáltam meg. A 13 jupitertömegnél masszívabbak nem szerepelnek a listán, ezek akár barna törpék is lehetnek (13 db). Két csoportra osztottam az exobolygókat aszerint, hogy tömegük kisebb vagy

nagyobb 1 jupitertömegnél (M_{Jup}). Az ennél nagyobb bolygók körül akár Földhöz hasonló méretű hold is elképzelhető. Az 1 M_{Jup} alatti bolygók (290 db) közül 25 kering az IHZ-ben, 47 rajta kívül. Az 1 M_{Jup} felettiek (339 db) közül 53 található a lakható zónában és 75 a külső határán kívül. Ezek az adatok százalékos formában a 8. ábrán szerepelnek. Látható, hogy a nagytömegű gázóriások több mint harmada körül lehet potenciálisan lakható egy hipotetikus hold. Mint korábban említettem, ez csupán elméleti lehetőség, eddig egyetlen exoholdat sem sikerült felfedezni.



8. ábra: Exobolygók százalékos csoportosítása lakhatóságuk szerint. Az IHZ-ben és annak határán kívül keringők (potenciálisan lakhatók) aránya a lakhatatlanokhoz (illetve ismeretlen fél nagytengellyel rendelkezőkhöz) képest. Balra: 1 jupitertömegnél kisebb tömegűek, jobbra: 1 jupitertömegnél masszívabbak.

bolygók száma egy rendszerben	összes megerősített	elegendő adat asztrometriai méréshez	észlelné a Gaia	IHZ-ben kering	IHZ külső határán túl	potenciálisan lakható és észlelné a Gaia
1	524	483	215	56	90	118
2	532	90	76	28	31	43
3	255	43	21	8	12	8
4	124	11	4	4	9	3
5	55	8	5	4	2	2
6	12	7	6	1	1	2
7	7	0	0	1	0	0
összesen	1509	642	327	102	145	168 (247-ből)

3. táblázat: Az eredmények egy rendszerben keringő exobolygók száma szerinti felbontásban.

5. Összefoglalás

Az élet kialakulásához planetáris testekre van szükség, amelyeken megtalálhatók az élet építőkövei. A testek formálódásuk során gyűjtik össze vagy későbbi meteorbombázások során halmozzák fel a felszínükön, illetve ahhoz közel a biogén elemeket. A bonyolult molekulák összekapcsolódásához és a létformák életfolyamatainak működéséhez szükség van oldószerre, amely minden földi élőlény esetében folyékony víz. Ám elméletben más is elképzelhető. A bolygótestnek egy olyan csillag körüli övezetben kell keringenie, ahol a beérkező energia biztosítja, hogy a felszíni vízkészlet folyékony legyen. Azonban speciális esetben az égitest felszíne alatt is előfordulhat vízóceán, amelyben megtalálhatóak az építőkövek, ha az óceánfenék kapcsolatban áll egy kőzetburokkal. Az ilyen környezetek kedvezőek lehetnek az alacsonyabb rendű életformák kifejlődéséhez. Bolygók mellett holdakon is kialakulhat az élet, ha megfelelő geológiai adottságokkal rendelkeznek, akár a lakható zóna külső határán kívül is.

Az exobolygók felfedezésének eddigi két legsikeresebb módszere az átvonulási fotometria és a radiális sebesség mérés. Ezek mellett még számos alternatív módszert alkalmaznak, kisebb-nagyobb sikerrel. Új módszerek is születnek, amelyekkel új típusú égitesteket fedezünk fel. Az alternatív módszereket a régebbiekkel felfedezett bolygójelöltek megerősítésére is használják. Egyre pontosabb műszerek segítik a kutatást. Exoholdak kimutatására és fizikai tulajdonságainak meghatározására egyelőre csak elméleti módszerek léteznek, de a műszerek fejlődésével akár megfigyelhetőek is lehetnek. A Kepler űrtávcsőnek köszönhetően a megerősített exobolygók száma 2014 első negyedében megduplázódott. Egy a 2013 decemberében felbocsátott Gaiahoz hasonló űrtávcső érzékeny műszerei révén exobolygók felfedezésére is alkalmas lenne asztrometriai módszerrel, ha az általános térképezési feladat helyett adott célpontok mérését végezhetné. Ám a csillagtérképezés során is több ezer bolygó detektálása várható. Néhány éven belül tervezik a TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) és a CHEOPS (Characterising Exoplanets Satellite) Föld körüli pályára állítását, amelyek elődeiknél precízebb égboltfelmérésre lesznek képesek. 2018-ban kerülhet földkövető pályára a James Webb űrteleszkóp, amely a korábbiaknál nagyobb objektív átmérővel és jobb felbontással rendelkezni. Várhatóan közvetlen képalkotással is fog exobolygókat kimutatni.

A 2014. október 14-ig különböző eljárásokkal felfedezett exobolygóknál megvizsgáltam, hogy melyek lennének kimutathatók asztrometriai módszerrel, ha a Gaia hosszabb, célzott

megfigyelést végezne a bolygórendszereken. Kiszámítottam a központi csillagok legnagyobb imbolygási amplitúdóját. Az imbolygás mértéke és a csillag fényessége alapján megállapítottam, hogy az asztrometriai detektor elméleti érzékenysége elegendő-e a kitérések kimutatásához. Eszerint az exobolygók ~51%-át detektálhatná a Gaia, ha csak az ismert tömegűeket vesszük figyelembe. A csillagok kitéréséből a körülötte keringő bolygók számára is következtetni lehet.

Ezen túl megvizsgáltam, hol jelölhetők ki a csillagok körül az IHZ határai. Kiszámoltam a központi csillagok luminozitását. A Vénusz-, illetve a Mars-pálya fél nagytengelye, a napluminozitás és a csillagluminozitás alapján határoztam meg, milyen távol található a lakható zóna a középponttól az egyes rendszerekben. Meghatároztam, hogy a felfedezett exobolygók a határokhöz képest hol helyezkednek el. Az ismert fél nagytengelyű pályán mozgó bolygókat vettem figyelembe. Közülük 102 kering az IHZ-ben, 145 a külső határon kívül. Tehát 247 exobolygó lehet potenciálisan lakható, ha a geológiai adottságaikat nem vesszük figyelembe. A Gaia 168-at tudna detektálni ezek közül. Legtöbbjük a Jupiternél is nagyobb tömeggel rendelkezik. Körülöttük akár földtömegű exoholdak is jelen lehetnek. Az ilyen esetekben meg kellene vizsgálni, hol húzódik a lakható tartomány egy lehetséges holdrendszerben.

Eddig csupán néhány bolygót fedeztek fel asztrometriai módszer segítségével. Mára azonban a technika fejlődésének köszönhetően készülhetnek nagy pontosságú méréseket végző műszerek. A Gaia vagy egy hasonló érzékenységu űrtávcső eredményesebbé tehetné ezt a módszert. Ilyen úton nem csak új bolygókat fedezhetünk föl, de jelölteket is megerősíthetünk. Ezen kívül ismeretlen fizikai tulajdonságok meghatározására is alkalmas az asztrometria, különös tekintettel a bolygók tömegére nézve.

Munkámat valódi mérésekkel, exobolygó megfigyelésekkel lehetne folytatni. Változatos, új módszerek kipróbálása, megvizsgálása az asztrometria mellett érdekes lenne a pályaelemek és a fizikai tulajdonságok felderítésének szempontjából. Az elméletben létező exoholdak kutatására irányuló módszerek gyakorlati alkalmazása ismert holdrendszerekre szintén jó lehetőség a téma folytatásához. Ezek a kutatások a naprendszerbeli vizsgálatokkal összekapcsolva hozzásegíthetnek a csillagok körüli lakható környezetek feltérképezéséhez, a benne keringő bolygók megismeréséhez. Így jelentős eredményeket érhetnénk el a Földön kívüli élet kutatásában.

Forrásjegyzék

I. Felhasznált irodalom

- Cserepes László; Petrovay Kristóf: *Kozmikus fizika*; ELTE TTK jegyzet; 2002
- Dole, S. H.: *Habitable planets for man*; New York, Blaisdell Pub. Co.; 1964
- Dobos V.; Orgoványi J.; Nagy I.: *Empirical formulae of temperature and luminosity as functions of mass for calculating the habitable zone*; AN 334, No. 9, 1004-1007; 2013
- Gánti Tibor: *Az élet általános elmélete*; Műszaki Könyvkiadó; 2009
- Heller, R.: *Exomoon habitability constrained by energy flux and orbital stability*; A&A 545, L8; 2012
- Heller, R.; Leconte, J.; Barnes, R.: *Tidal evolution of potentially habitable planets*; A&A [arXiv:1101.2156v2]; 2011
- Heller, R.; Williams, D.; Kipping, D.; Limbach, M. A.; Turner, E.; Greenberg, R.; Sasaki, T.; Blomont, É.; Grasset, O.; Lewis, K.; Barnes, R.; Zuluaga, J. I.: *Formation, habitability, and detection of extrasolar moons*; Astrobiology, doi:10.1089/ast.2014.1147; 2014
- Illés E.: *Jégholdak az óriásbolygók körül*; Természet Világa 120 No. 7, 299-306; 1989
- Jordi, C.; Gebran, M.; Carrasco, J. M.; de Bruijne, J.; Voss, H.; Fabricius, C.; Knude, J.; Vallenari, A.; Kohley, R.; Mora, A.: *Gaia broad band photometry*; A&A [arXiv:1008.0815v2]; 2010
- Kasting, J. F.; Calting, D.: *Evolution of a habitable planet*; A&A 41:429-63; 2003
- Lammer, H.; Bredehöft, J. H.; Coustenis, A.; Khodachenko, M. L.; Kaltenegger, L.; Grasset, O.; Prieur, D.; Raulin, F.; Ehrenfreund, P.; Yamauchi, M.; Wahlund, J.-E.; Grießmeier, J.-M.; Stangl, G.; Cockell, C. S.; Kulikov, Yu. N.; Grenfell, J. L.; Rauer, H.: *What makes a planet habitable?*; A&A 17:181-249; 2009
- Lennart Lindegren: *Gaia: Astrometric performance and current status of the project*; IAU, doi:10.1017/S1743921309990548; 2010
- Mikko Tuomi: *Evidence for 9 planets in the HD 10180 system*; A&A [arXiv:1204.1254v1]; 2012
- Nagy I.; Pál A.: *Stability of exomoons*; Padeu 20, 113; 2011
- Stanley L. Miller: *A production of amino acids under possible primitive Earth conditions*; Science, Vol. 117; 1953

II. Internetes hivatkozások

- [1] http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Liftoff_for_ESA_s_billion-star_surveyor
- [2] <http://www.matud.iif.hu/08jun/03.html>
- [3] <http://solarsystem.nasa.gov/missions/profile.cfm?Sort=Alpha&Letter=G&Alias=Galileo>
- [4] http://www.konkoly.hu/~kovari/CSILLAGASZAT/tananyag/CSILLAGASZAT/11_02.html
- [5] <http://kepler.nasa.gov/news/nasakeplernews/index.cfm?FuseAction=ShowNews&NewsID=324>
- [6] <http://ogle.astrouw.edu.pl/>
- [7] <http://www.spitzer.caltech.edu/mission/32-The-Mission>
- [8] http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/COROT/COROT_spacecraft
- [9] <http://sci.esa.int/plato/42280-mission-operations/>
- [10] <http://hatnet.org/operations.html>
- [11] <http://tess.gsfc.nasa.gov/overview.html>
- [12] <http://cheops.unibe.ch/index.php/spacecraft>
- [13] <http://jwst.nasa.gov/about.html>

III. Ábrák

- 1. ábra: <http://exoplanet.eu/diagrams/>
- 2., 3. ábra: Lammer, H.: *What makes a planet habitable?*; A&A 17:181-249; 2009
- 4. ábra: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Europa>
- 5. ábra: saját készítésű, a következő forrás alapján:
http://www.nasa.gov/images/content/656345main_ToV_transit_diag_4x3_946-710.jpg
- 6. ábra: <http://www.hao.ucar.edu/research/stare/search.html>
- 7., 8. ábra: saját számítások alapján, adatbázis: <http://exoplanets.org/>

IV. Táblázatok

- 1., 2., 3. táblázat: saját számítások alapján, adatbázis: <http://exoplanets.org/>

V. Mellékletek

Dropbox link 8 darab pdf-hez (táblázatok 1-7, bolygószám szerinti csoportosítás; eredmények):
<https://www.dropbox.com/sh/fvs7pols9099fv9/AAAJYoIwg1ZE-KiqUdG1P2Wpa>

Köszönetnyilvánítás

Megköszönöm témavezetőmnek, Nagy Imrének az érdekes témát ezen a nem túl régi kutatási területen, és azt, hogy munkám során hozzá fordulhattam kérdéseimmel. Tanácsaival és tudományos cikkek ajánlásával nyújtott útmutatást a dolgozat megírásához. A Csillagászati Tanszék többi tanárának is köszönetet mondok, akiknek előadásai segítettek az összefüggések megértésében.

Külön megköszönöm a segítséget Marschalkó Gábornak a Gaiával kapcsolatos cikkekért és az útmutatásért ebben a témában. Szaktársaimnak is köszönöm, hogy ötleteikkel, tanácsaikkal járultak hozzá munkám jobbá tételéhez. Rajtuk kívül hálával tartozom szüleimnek és barátaimnak türelmükért és biztatásukért.

Függelék

I. Egyéni feladat

Munkám során először az exobolygó kutatás hátterével, történetével és a legfrissebb eredményeivel ismerkedtem meg. A központi cikk, amely köré dolgozatom első két fejezete épül, Lammer és munkatársainak *What makes a planet habitable* című tanulmánya, amelyet a témavezetőm ajánlott a figyelmembe számos bolygókeletkezéssel, exobolygó és exohold kutatással, illetve az élet keletkezésével foglalkozó irodalom mellett. Ez az elméleti anyag szolgált a későbbi számításaim alapjául. A források listáját kiegészítettem a Marschalkó Gábor által rendelkezésemre bocsátott Gaia űrszondás cikkekkel.

Két kérdésre kerestem a választ: egy Gaiahoz hasonló érzékenységű űrtávcsővel hány eddig felfedezett exobolygó lenne kimutatható asztrometriai módszer alkalmazásával, illetve hány bolygó lehet potenciálisan lakható. Az első kérdés megválaszolásához szükségem volt a számítások végzésének időpontjában megerősített exobolygók listájára, amely az exoplanets.org adatbázisából letölthető. Tanulmányoztam a kutatási módszereket és eszközöket. Ezek után égi mechanikai alapelvek és a rendelkezésemre álló pályaelemek, illetve fizikai tulajdonságok alapján a dolgozatban ismertetett lépéseken keresztül jutottam el a válaszig. A második kérdés esetén a Naprendszer lakható zónájának tulajdonságait használtam kiindulási pontként a számításokhoz.

Mindkét kérdés megválaszolásához a megerősített exobolygók számát korlátoznom kellett, mivel nem minden esetben állt rendelkezésre a számításokhoz szükséges elegendő információ. Igyekeztem a lehető legtöbb szempontot figyelembe venni a számolásnál, azonban, ha több bolygó tulajdonságait ismernénk, pontosabb eredményeket kaphatnánk. Az eredmények táblázatokban szerepelnek, amelyeket egy internetes megosztó oldalon (lásd: Forrásjegyzék: V. Mellékletek) tettem közzé. A belőlük levont következtetések a diszkusszióban olvashatók.