

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi és Informatikai Kar

Kísérleti Fizikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

Exobolygók, szuperföldek

Készítette: Maróti Julianna

fizika BSc szakos hallgató

Témavezető: Dr. Szatmáry Károly

habil. egyetemi docens

SZEGED

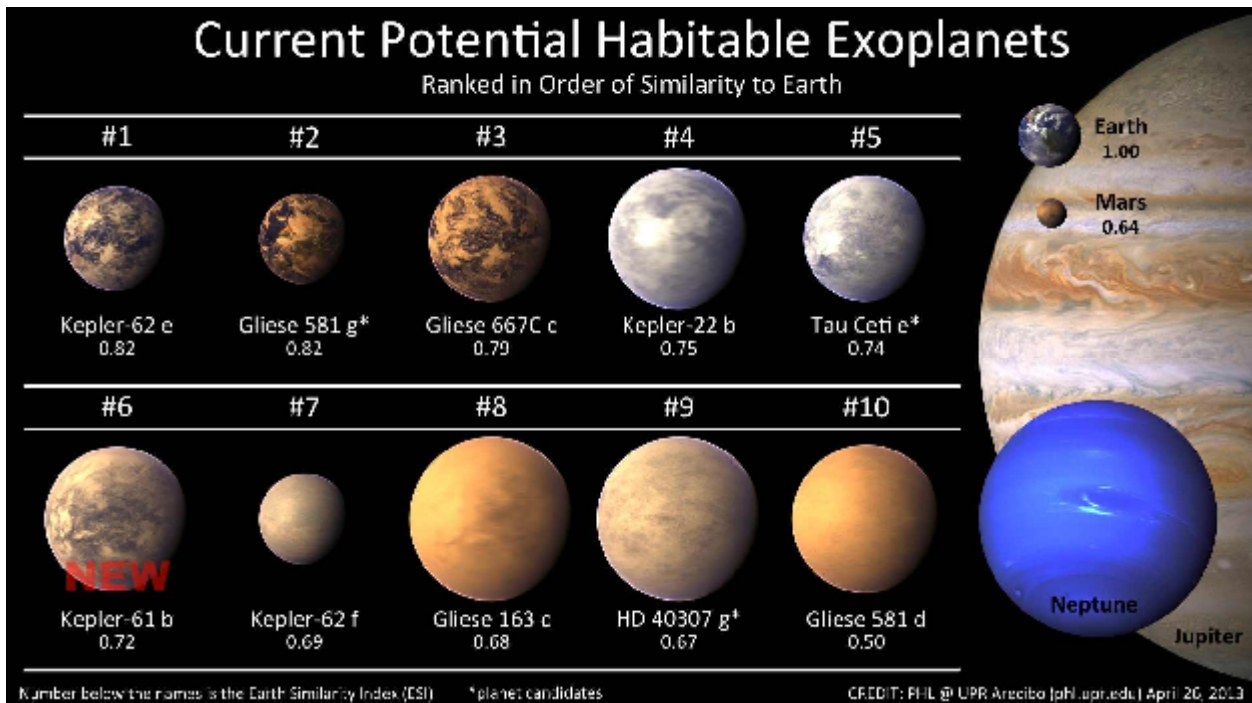
2013

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalmi összefoglaló	3
Bevezetés	6
1. Az exobolygókról általában	
1.1. Az exobolygó kutatás története	7
1.2. Az exobolygók típusai	10
1.3. Az exobolygók felfedezésének módszerei	12
2. Az élet lehetősége más bolygókon	
2.1. Exobolygók osztályozása lakhatóság szempontjából	14
3. Szuperföldek	21
4. Paraméter vizsgálatok	26
5. Kitekintés	33
6. Köszönetnyilvánítás	35
7. Nyilatkozat	36
8. Hivatkozások	37

Tartalmi összefoglaló

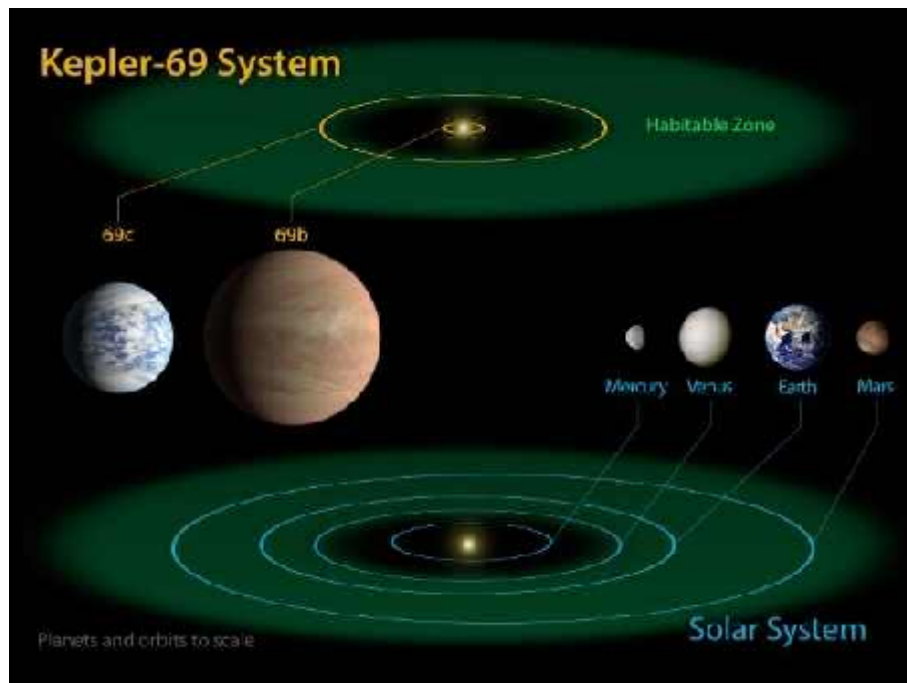
Az exobolygó kutatás a csillagászat egyik legfontosabb és leggyorsabban fejlődő ága. Ma már olyan eszközök és módszerek állnak rendelkezésünkre, amelyekkel akár más csillagok körül keringő, Föld méretű vagy kisebb égitestek is kimutathatóak. Az űrtávcsövek itt is nagy segítségünkre vannak, mivel esetükben a megfigyelést nem befolyásolják a földi zavaró tényezők, mint például a légkör. A 2009-ben felbocsátott Kepler űrteleszkóp hatalmas lendületet adott az exobolygó kutatásnak, olyan mennyiségű és minőségű észlelési adatokat szolgáltatva, amelyre korábban nem volt példa. A Discovery-program keretében épített űrtávcső tranzit módszerrel kutat exobolygók után, a Cygnus és a Lyra csillagképek határán. A 2012-es év végéig mintegy 105 exobolygót azonosítottak a Kepler észlelései alapján, 2013. április 22-ére ez a szám már 122-re növekedett [10]. Közülük a Kepler-62 rendszer két bolygója, a Kepler-62e és Kepler 62f, valamint a Kepler-69 rendszerében keringő Kepler-69c hasonlít leginkább a Földre, néhány másik bolygó mellett, amelyek az 1. ábrán láthatók.



1. ábra: A Földhöz leginkább hasonló bolygók [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>]



2. ábra: A Kepler-62 rendszere [Forrás: <http://hitek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130422-kepler62.html>]



3. ábra: A Kepler-69 rendszere [Forrás: <http://hitek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130422-kepler62.html>]

A program még számos új felfedezést tartogat számunkra, olyan érdekességeket például, mint a tőlünk mindössze 4,3 fényévre lévő Alfa Centauri rendszerében 2012-ben felfedezett bolygó, amely létezésének lehetősége sokak fantáziáját megmozgatta már a múltban is. Az ember mindig is az élet értelmét, lényegét kereste. Általam is kedvelt téma, hogy léteznek-e más csillagok körül keringő bolygók, a Földhöz hasonló bolygók, lehet-e élet a Földön kívül, ha nem, miért, ha igen, miért, és milyen formákban. Ezért választottam ezt a témát szakdolgozatom alapjául.

Dolgozatom első részében az exobolygókat fogom általánosan bemutatni, először történeti szempontból, majd a típusaikát, és röviden azokat a módszereket, melyekkel felfedezhetőek. Ezután az élet lehetőségeiről lesz szó más égitesteken, utána bemutatom a szuperföldek egyre bővülő táborát, az aktuális kutatási és megfigyelési eredményekkel, összefüggéseket keresek a csillag és a bolygó paraméterek között, végül szeretnék egyfajta kitekintést adni a témában, a jövőbeli várakozásokat illetően.

Bevezetés

A más csillagok körül keringő bolygók tanulmányozása a csillagászat fiatalnak mondható területe. Az első olyan exobolygót, melynek létét megerősítették, 1990-ben Aleksander Wolszczan lengyel csillagász fedezte fel, az areciboi rádiótávcső adatainak elemzésével, a PSR 1257+12 jelű pulzár körül, a pulzárról érkező rádiójelek anomáliáiból következtetve. 1992-ben Dale Frail kanadai csillagással újabb bolygót találtak a rendszerben.

A történelem során azonban számos tudóst és filozófust foglalkoztatott ez a téma. Ahogyan sok más tudományágban, itt is mondhatjuk a szinte szállóigévé vált mondást, hogy „már az ókori görögök is...”, ugyanis már az i.e 5. századból is ismeretesek olyan elképzelések, melyek távoli világokról szólnak, így például Démokritosz írásaiban:

„Vannak olyan világok ahol nincs Nap és Hold, más világokban nagyobbak az égitestek, mint nálunk, máshol pedig több is van belőlük (...)”

De megemlíthetjük még Epikurost is, aki szerint végtelenül sok világ létezhet, amelyek hasonlítanak a miénkre, de különbözhetnek is ettől.

Látható, hogy bár a korszak nagy gondolkodója, Arisztotelész a geocentrikus világgép mellett érvelt, és hitt az állandó égi szférákban, már a kortársai között is akadtak olyanok, akik ezt az elvet megkérdőjelezték, és mertek merész elképzeléseket megfogalmazni. Ugyan az elkövetkező, körülbelül 2000 évben az arisztotelészi világgép helyességében hittek az emberek, a reneszánsz korszak beköszöntésével az akkori tudósok, Nikolausz Kopernikusz, Giordano Bruno, és Galileo Galilei munkássága teljes mértékben átalakította az addigi csillagászati gondolkodásmódot, elhozva ezzel a változást, és a fejlődés lehetőségét [2].

1. Az exobolygókról általában

Exobolygónak azokat a bolygókat nevezzük, amelyek nem a Nap, hanem valamely más csillag körül keringenek. Elég nehéz biztosan kimondani egy objektumról, hogy óriásbolygó, vagy törpecsillag. A magjukban hidrogénfúzióval energiát termelő csillagok (vörös törpék) alsó tömeghatára 75-80 Jupiter-tömeg. Ezen határ alatt találjuk a barna törpéket, amelyekben még folyhat deutérium fúzió, de a 13 Jupiter-tömegnél kisebb égitestekben már ez sem lehetséges. Így óriásbolygónak a 13 Jupiter-tömeg alatti égitesteket tekintjük.

Lehetséges továbbá, hogy a ma bolygóként ismert égitestek egy része igazából barna törpe, mivel tömegüket illetően csak alsó határt tudunk meghatározni, ha nem ismerjük a pályájuk térbeli helyzetét [Szatmáry, 2003] [1].

1.1. Az exobolygókutatás története

Giordano Bruno, Christian Huygens és mások is felvetették már, hogy más csillagok körül is lehetnek bolygók, de a korabeli technikával reménytelen volt ezek felfedezése.

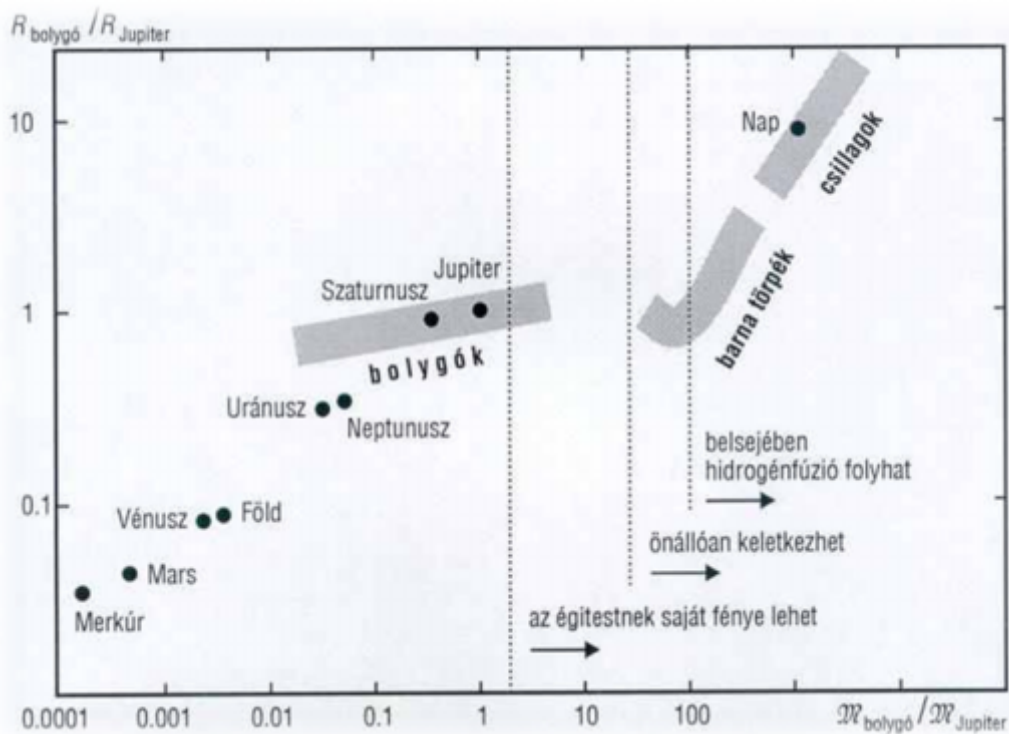


4. ábra: Christian Huygens [Forrás: <http://faculty.etsu.edu/gardnerr/einstein/quanta.htm>]

1885-ben W.S. Jacob kapitány, aki a Kelet-indiai Társaság Madrasi Obszervatóriumában dolgozott, a 70 Ophiuchi kettőscsillag mozgásának zavaraiából következtetett arra, hogy lehet ott egy bolygószerű test a rendszerben. Később Thomas J.J. See a Chicagói Egyetem munkatársa egy nem látható test jelenlétét jelentette be, mely a rendszerben az egyik csillag körül 36 éves periódussal kering.

A feltételezett pályaadatokról kiderült, hogy ezek alapján a pálya nagyon instabil lenne, így létezése eléggé valószínűtlen. Az 1950-60-as években Peter van de Kamp végzett megfigyeléseket a Barnard-nyílcsillagról, melynek alapján bolygó jelenlétére következtetett, de a későbbi észlelések nem erősítették meg elméletét.

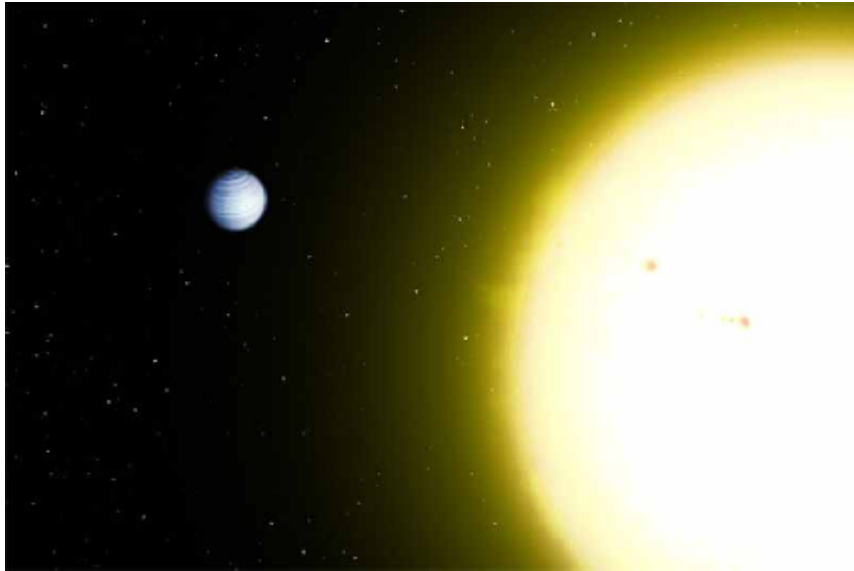
Az első olyan észlelést (γ Cephei), melyet ugyan jóval később, de sikerült megerősíteni, 1988-ban publikálta Bruce Campbell, G.A.H. Walker és S. Yang. A feltételezett bolygót radiális sebességméréssel mutatták ki. Felfedezésükben nem lehettek biztosak, többek között az égitest tömegének ismerete nélkül nem tudták eldönteni, hogy bolygóról vagy barna törpéről van szó.



5. ábra: Bolygók, csillagok, és barna törpék összehasonlítása [Szatmáry, 2003]

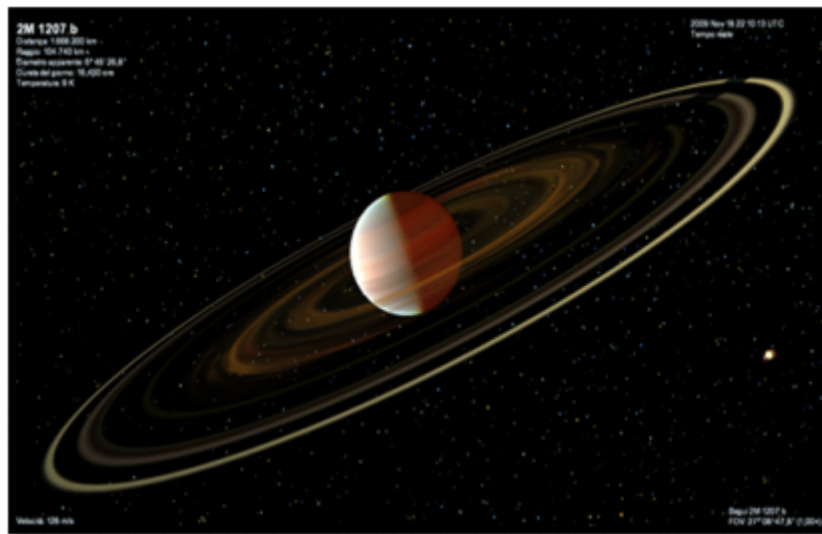
Megnyugtató eredményeket csak 2003-ban sikerült elérni, a jóval korszerűbb eszközökkel.

Az első „normális” csillag körül keringő bolygót az 51 Pegasi körül találták 1995-ben a Genfi Egyetem csillagásza. Az 51 Pegasi b névre keresztelt Jupiter-típusú óriásbolygó körülbelül 7,5 millió km távolságban kering a csillaga körül 4 nap 4 óra keringési időtartammal.

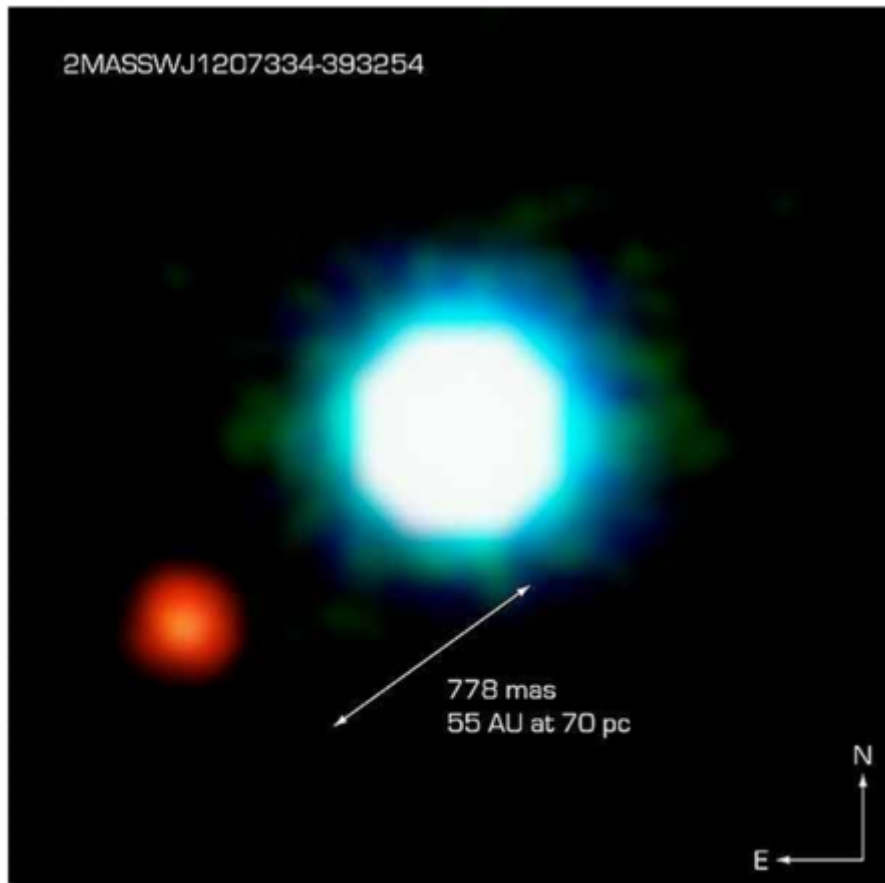


6. ábra: Az 51 Pegasi és bolygója egy elképzelt variációban [Forrás: http://hu.wikipedia.org/wiki/Fájl:51_Pegasi_b_v3.jpg]

A legelső közvetlen észlelés exobolygóról 2005-ben történt az ESO VLT távcsövével, a 2M1207 jelű barna törpe bolygójáról.



7. ábra: Fantáziarajz a barna törpéről és bolygójáról [Forrás: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planet_2M_1207_B.png]



8. ábra: A 2M1207 barna törpe és bolygója infravörös felvétele [Forrás: http://hu.wikipedia.org/wiki/Fájl:2M1207b_-_First_image_of_an_exoplanet.jpg]

2008-ban már több csillag körül is sikerült bolygót vagy bolygókat lefényképezni. Azóta, számos felfedezési módszerrel, majdnem kilencszáz exobolygót azonosítottak, az űrtávcsöves megfigyelések pedig napról napra tovább bővítik számukat [13].

1.2. Az exobolygók típusai

Az exobolygók osztályozása több szempont szerint történhet, például a pálya adatai alapján, az ellipszis lapultsága, vagy a méret és a keringési idő alapján.

A legtöbb eddig felfedezett exobolygó a Naphoz leginkább hasonló, G,K, illetve M színképtípusú fősorozati csillag körül kering, melynek oka, hogy a keresőprogramok a sikeresség érdekében elsősorban ilyen csillagok körül kerestek planétákat. A bolygók eloszlásának statisztikai elemzése azt mutatja, hogy a kisebb tömegű csillagok körül a bolygók kialakulásának valószínűségei kisebbek, a Spitzer űrtávcső megfigyelései alapján pedig feltehető, hogy az O színképosztályú csillagok erős csillagszele a körülöttük létrejövő protoplanetáris korongot elpárologtatja, így csökkentve a bolygók kialakulásának esélyét.

Az exobolygók többségének tömege a Jupiterének többszöröse. Ennek oka a megfigyelések kiválasztási effektusa: a nagy tömegű és méretű bolygókat sokkal könnyebb felfedezni, mint a kisebbeket. Számos exobolygó kering a csillagához közel, ez is a fent említett effektusnak a következménye, mivel a keresési technikák jó része a bolygó által a csillagra kifejtet hatást keresi, amely a távolsággal csökken [13]. Az ilyen forró exobolygók másodlagos átvonulásának megfigyelése során lehetővé válik a bolygó saját luminozitásának meghatározása, amely lehetővé teszi a hőmérséklet és az albedó kiszámítását. Ezek alapján két nagy csoportról beszélhetünk, az első a pL csoport, melyet a 1000-1500 K hőmérsékletű forró Jupiterek alkotnak, ezeknél jelentős a radiális konvekció, és felsőlégréteket sűrű felhők alkotják. A másik a pM csoport, melyek felső légkörében megfigyelhető, hogy hőmérsékleti inverzió alakul ki, mely megállítja a konvekciót. Ide a 2000 K-nél magasabb hőmérsékletű bolygók tartoznak, melyeknél nincs felhőképződés, a légkör abszolút fekete testnek mondható. Az elmúlt években kezdtek el felfedezni az úgynevezett forró Neptunuszokat, melyek szintén közel keringenek a csillagukhoz, viszont tömegük kisebb a forró Jupiterek tömegénél. A keringési periódusuktól függetlenül, a bolygókeletkezési elméletekkel összhangban elmondható, hogy forró Neptunuszokból több van, mint forró Jupiterekből [Szabó, Simon, Szalai, 2011] [19].



9. ábra: Fantáziarajz egy forró Jupiterről [Forrás: ESA]

1.3. Az exobolygók felfedezési módszerei

Az exobolygók észlelése még a mai technikákkal sem egyszerű feladat. Ez történhet közvetlen megfigyeléssel, vagy közvetett méréssel, ami a bolygó jelenlétére utal.

Közvetlenül akkor észlelhetünk exobolygót, ha az éppen látszik a csillaga mellett, illetve az infravörös többletsugárzás révén, amikor a bolygó hőmérsékleti sugárzása hozzáadódik a csillag sugárzásához.

Ezek mellett, számos egyéb technikát fejlesztettek ki az exobolygók közvetett módon történő detektálására.

Egy mozgó testről érkező fény ha a test távolodik, a vörös tartomány felé, ha közeledik, a kék tartomány felé tolódik el a sugárzás hullámhosszával és a mozgás sebességével egyenes arányban. Így spektroszkópiával kimutatható egy bolygó, ha annak hatására a csillag színképvonalai eltolódnak a Doppler-effektus alapján:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

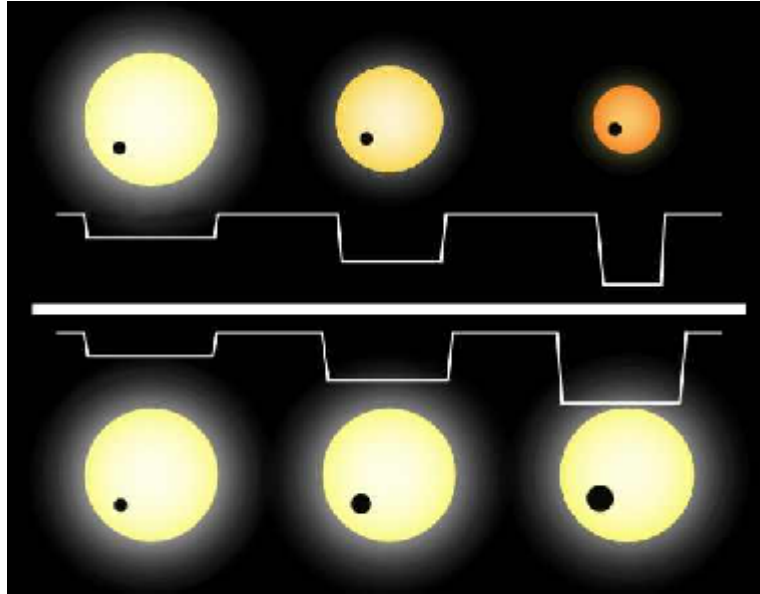
A második az asztrometriai módszer: hogyha azt figyeljük meg, hogy a keringő bolygó hatására a csillag sajátmozgása az égbolton megváltozik, akkor a bolygó kellően nagy tömeg esetén kimutatható.

Amennyiben az exobolygó pályasíkja a látóirányunkba esik, megfigyelhető, amikor a bolygó elhalad a csillaga előtt, és annak fényességét kis mértékben lecsökkenti. Kellően pontos fotometriával ez a fényességcsökkenés földi távcsövekkel is kimutatható.

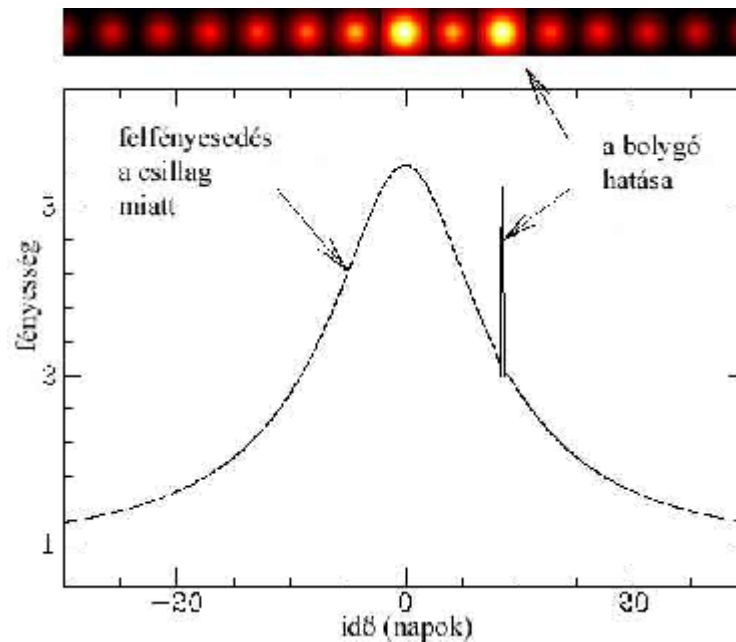
Hogyha pulzárokat figyelünk meg, és azt látjuk, hogy az általa kibocsátott impulzusok közötti időtartam periodikusan változik, akkor bolygó jelenlétére következtethetünk. Ezt a pulzár hozzánk képest történő mozgása, illetve a bolygóval való keringés okozza a közös tömegközéppont körül. Ez is egyfajta Doppler-hatás, mivel az impulzusok forrása időnként közeledik, majd távolodik tőlünk. Hasonló jelenség figyelhető meg fehér törpék pulzációs módusainak megváltozása révén is.

Gravitációs lencse hatás alapján is találhatunk exobolygókat. Ha a lencséző csillag elhalad egy háttércsillag előtt, felerősíti annak fényét, mivel kis mértékben meggömbíti a téridőt. Ha ennek a csillagnak bolygója van, arra a háttércsillag felfényesedését megelőző vagy követő, kisebb mértékű felfénylésből lehet következtetni.

Vannak olyan csillagok, melyek körül porkorong figyelhető meg az infravörös tartományban. Hogyha ebben a korongban már található bolygó, akkor annak perturbáló hatása miatt a korong aszimmetrikussá válik és sűrűségének eloszlása egyenetlen lesz [Szatmáry, 2006] [18].



10. ábra: Különböző bolygók által különböző csillagoknál okozott fényességcsökkenés [Szatmáry, 2003]



11. ábra: Háttércsillag felfényesedése bolygós csillag hatására [Szatmáry, 2006]

2. Az élet lehetősége más bolygókon

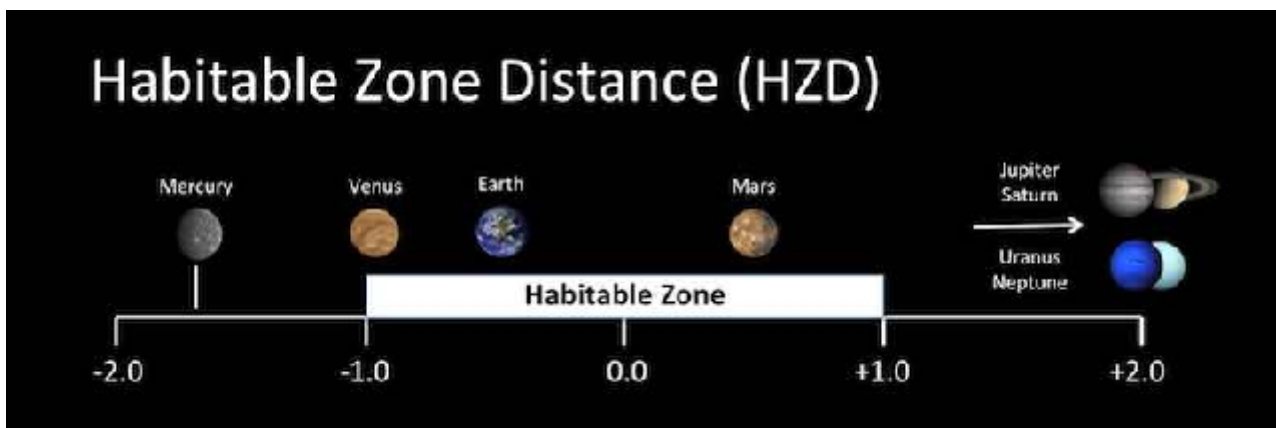
2.1. Exobolygók osztályozása lakhatóság szempontjából

Öt lakhatósági mérték, és kettő osztályozási rendszer alapján hasonlítjuk össze az élet lehetőségét az exobolygókon [14].

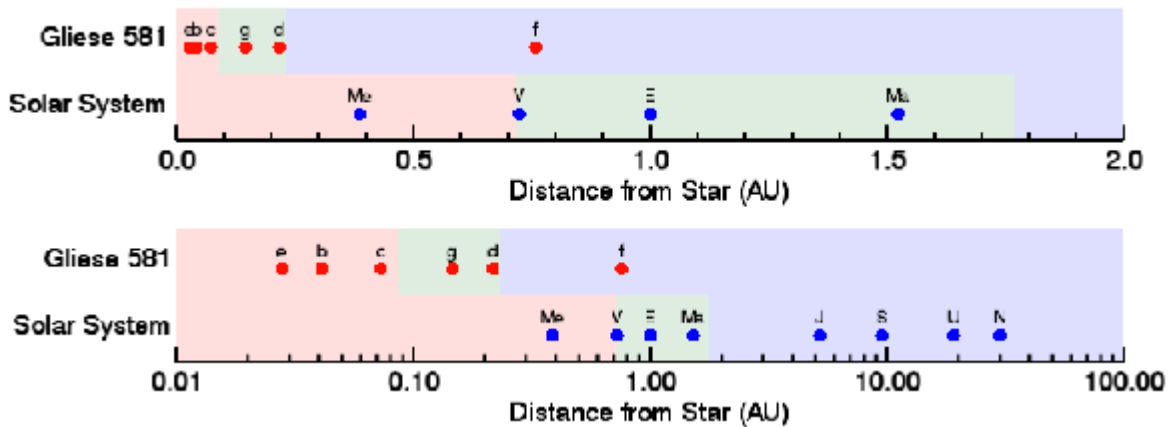
Az első az *életzóna távolság (HZD)*, ami megadja, hogy milyen messze van az exobolygó a csillaga életzónájának középpontjától. Életzóna egységekben adjuk meg a távolságot (HZU), az életzóna közepén ez 0, -1-ig megy a csillag felé közeledve, +1-ig a csillagtól távolodva. Függ a csillag fényességétől, hőmérsékletétől, és a bolygó távolságától, értéke -1 a Vénusznál, a Marsnál +1 körül. Képlettel kifejezve a HZD a következő:

$$\text{HZD} = \frac{2r - r_o - r_i}{r_o - r_i}$$

ahol r_o a külső, r_i a belső sugár csillagászati egységben.



12. ábra: Életzóna távolság [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods>]



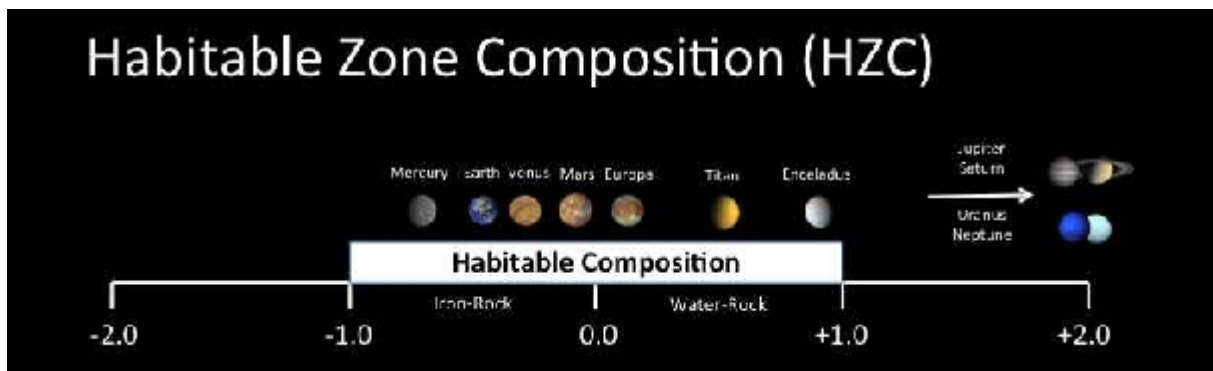
13. ábra: A Gliese 581 és a Naprendszer [Forrás:

<http://phl.upr.edu/library/notes/habitablezonedistancechzdahabitabilitymetricforexoplanets>]

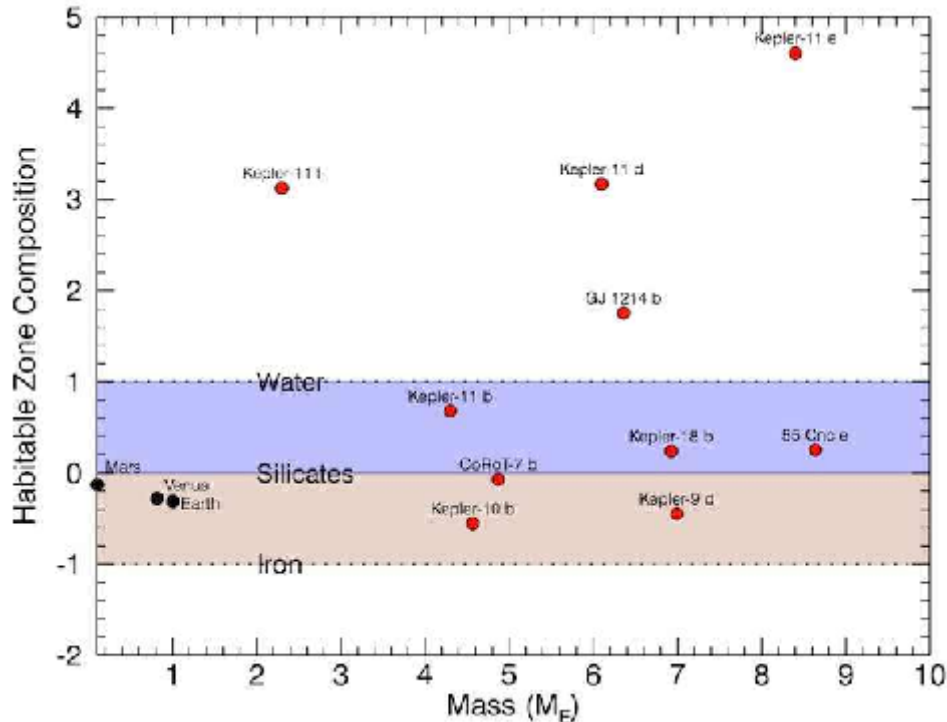
A fenti ábrán a Gliese 581 vörös törpecsillag rendszere és a Naprendszer összehasonlítása látható. A csillagtól való távolság csillagászati egységekben pirossal van jelölve a Gliese 581, kékkel a Nap esetében. A zöld rész a lakható zóna nagyságát mutatja. A piros rész a forró zóna, a kék a hideg.

A második az *életzóna összetétel (HZC)*. Azt méri, hogy mennyire kompatibilis az étellel az exobolygó tömegösszetétele. A szárazföldes-óceános bolygók HZC értékei -1 és +1 között vannak, 0 értéket a tisztán kőzet bolygó kap. A -1-es értékhez közelebb vannak a magasabb vas tartalmú, +1-hez közelebb a magasabb víztartalmú bolygók. A +1 feletti értékek az óriásbolygókra vonatkoznak. Az életzóna összetétel függ a bolygó tömegétől és sugarától, értéke -1 a Merkúr esetében, a Föld, Vénusz, Mars, Europa, Titán felé növekszik, az Enceladusnál +1. Képlettel kifejezve:

$$HZC = \frac{2r - r_o(m) - r_i(m)}{r_o(m) - r_i(m)}$$



14. ábra: Életzóna összetétel [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods>]



15. ábra: Életzóna összetétel a tömeg függvényében [Forrás:

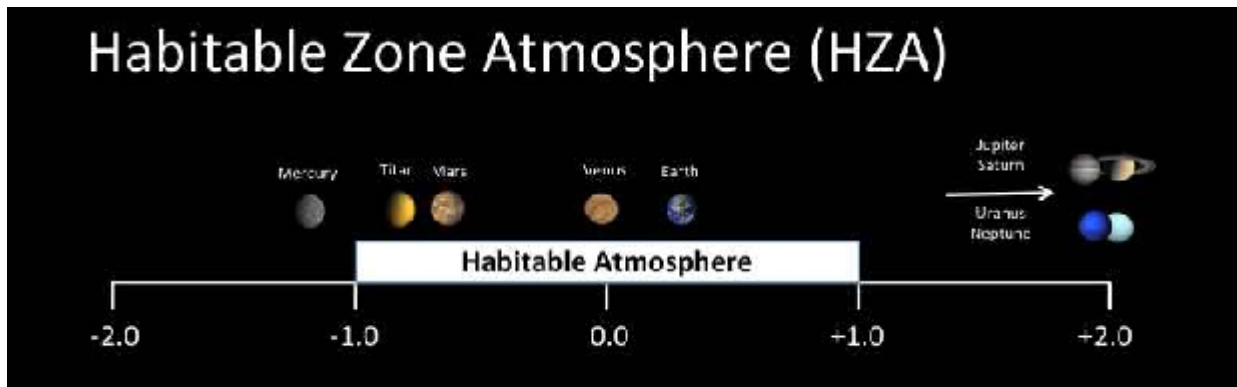
<http://phl.upr.edu/library/notes/habitablezonecompositionhzcabitabilitymetricforexoplanets>]

A 15. ábra exobolygók, illetve a Föld, Vénusz, és a Mars adatait tartalmazza összehasonlításképp, a zóna összetételt a tömeg függvényében. A -1 és +1 közötti HZC értékek az olyan bolygókra vonatkoznak, amelyek összetétele lakhatóság szempontjából megfelelő. Egyik pirossal jelölt exobolygó sincsen azonban a csillaga lakhatósági zónájában, hatnak közülük megfelelő összetétele van, de nem megfelelő pályajellemzőkkel ahhoz, hogy folyékony víz lehessen a felszínükön.

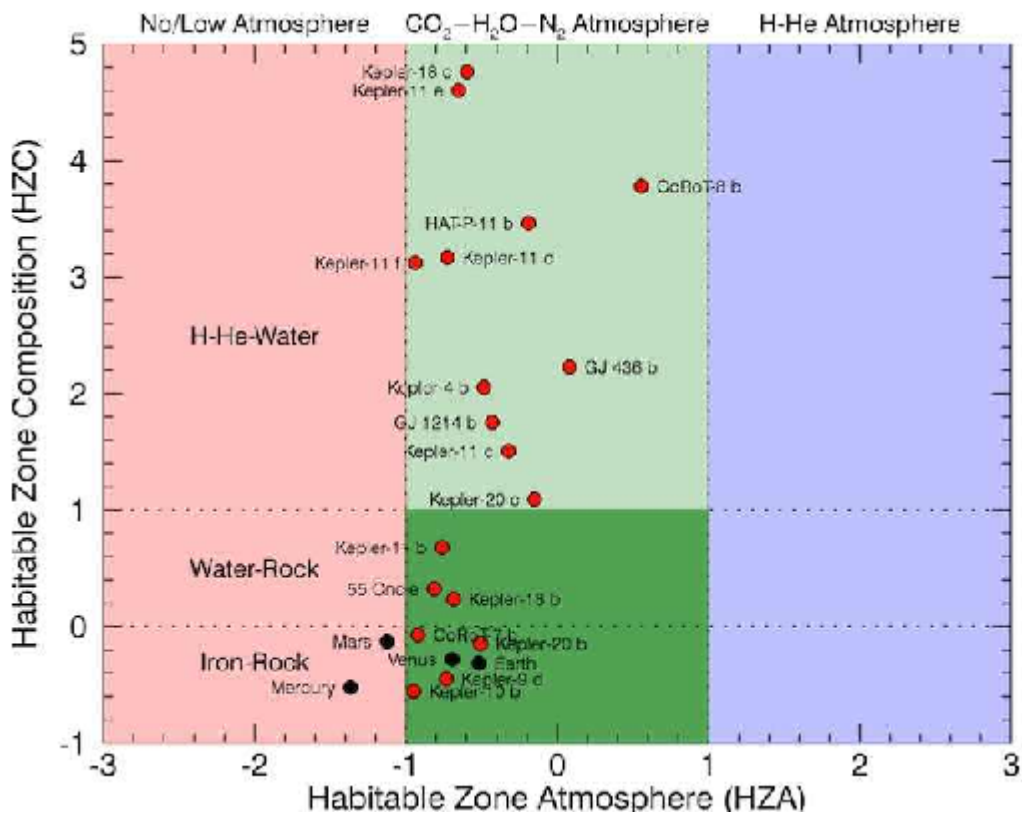
A harmadik az *életzóna atmosféra (HZA)*, ami azt jellemzi, hogy mekkora lehetőség van arra, hogy az exobolygó élhető légkörrel rendelkezik. A -1 és +1 közötti értékeknél fennáll a lehetősége, hogy a légkörben megtalálhatók az élet alapvető kellékei, mint a szén-dioxid, oxigén, nitrogén, vízgőz, ammónia, és metán. A -1 alatti értékű bolygóknál vékony légkör található, vagy nincs is, +1 felett sűrű légkör lehetséges, főleg hidrogénből és héliumból. A HZA függ a bolygó tömegétől, sugarától, távolságától és a csillag fényességétől. A Titán értéke -1, a Mars, Vénusz felé növekszik, a Földé +1.

$$HZA = \frac{2\sqrt{M/r} - v_{eH} - v_{eN}}{v_{eH} - v_{eN}}$$

$v_{eN} = \sqrt{zT_{eq}/M_{wN}}$; $v_{eH} = \sqrt{zT_{eq}/M_{wH}}$; $r = m \frac{M_{wN}}{zT_{eq}}$; ahol m és r a bolygó tömege és sugara Föld egységeiben; $z = 2 \times 10^{-2}$ mol/gK; M_w a hidrogén, illetve nitrogén moláris tömege; T_{eq} az egyensúlyi hőmérséklet 0,3-as albedóval számolva.



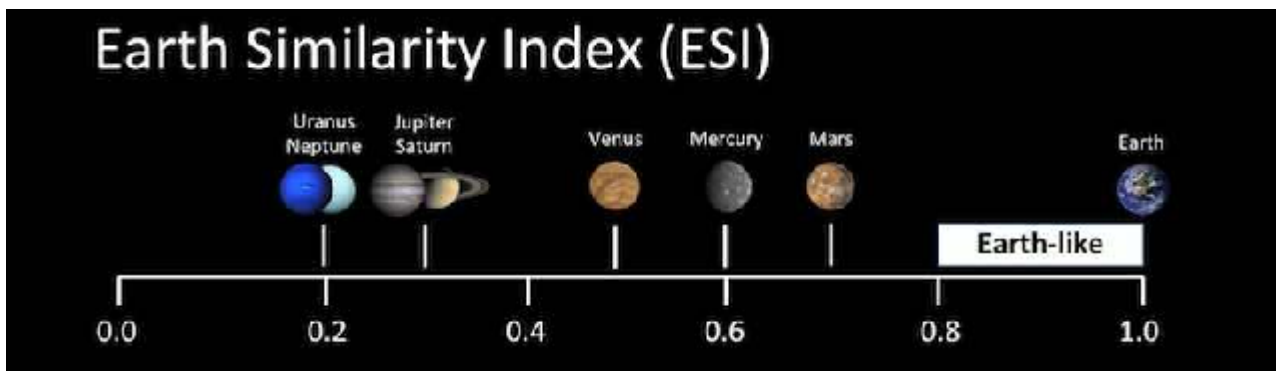
16. ábra: Életzőna atmoszféra [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods>]



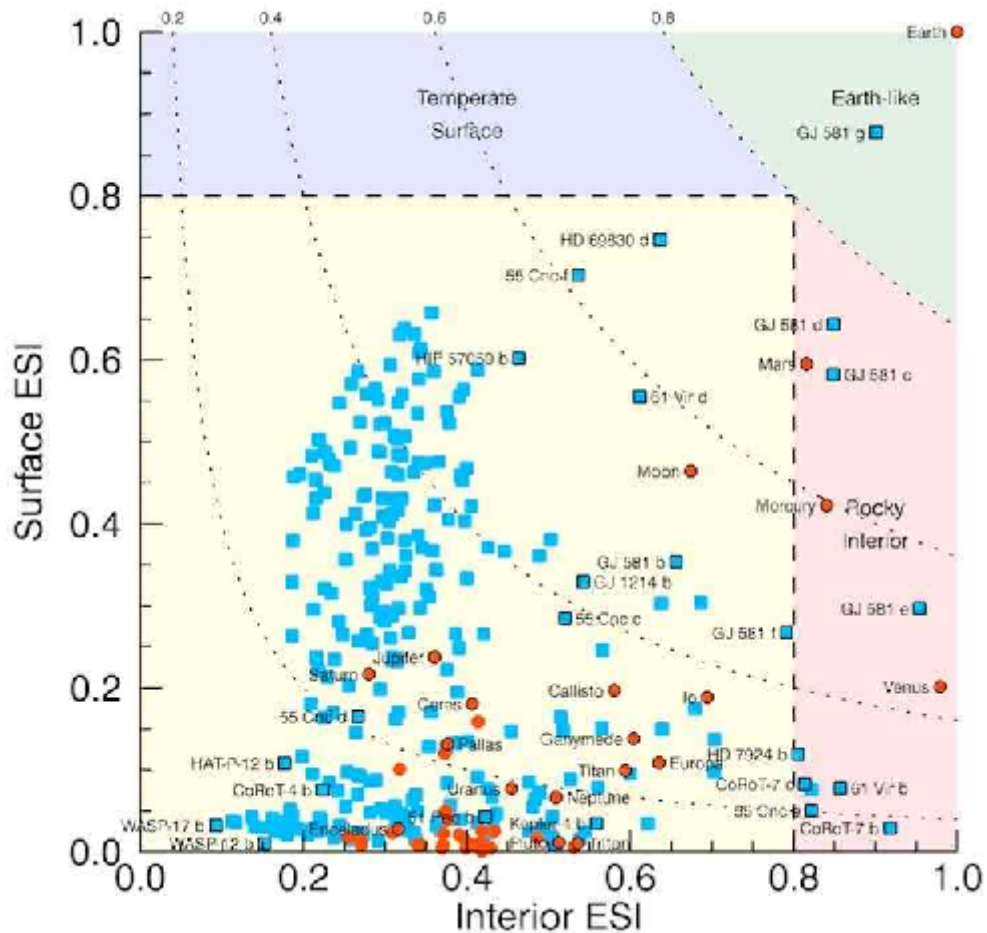
17. ábra: Életzőna összetétel az atmoszféra függvényében [Forrás: <http://phl.upr.edu/library/notes/habitablezoneatmospherehzaahabitabilitymetricforexoplanets>]

A 17. ábrán az összetétel van ábrázolva az atmoszféra függvényében. A sötétzöld területen található bolygók légköre megfelelő lenne az élet szempontjából, de az ott található hét exobolygó egyike sem elégíti ki a HZD által támasztott kritériumot a folyékony víz jelenlétét illetően.

A Földhöz való hasonlóság szempontjából beszélhetünk az *ESI index*ről. Itt 0-tól 1-ig van a számozás, ahol 1 a Föld. A 0,8 és 1 közötti értékeknél olyan földszerű bolygók vannak, melyek képesek az élet hordozására, és lehet olyan légkörük, mely lehetővé teszi szárazföldi életformák létezését. Az index értéke függ a sugártól, szökési sebességtől, és felszíni hőmérséklettől. Az Uránusz-Neptunusznál ez 0,2; a Jupiter-Szturnusznál 0,3; a Vénusznál 0,5; a Merkúrnál 0,6; a Marsnál 0,7.



18. ábra: Földhöz való hasonlóság indexe [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods>]

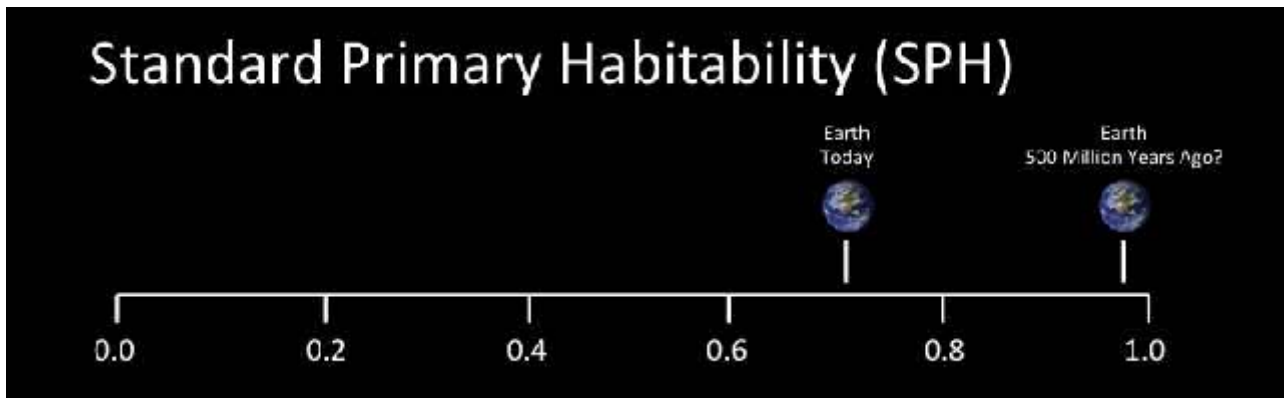


19. ábra: Felszíni Földhöz való hasonlóság a belső hasonlóság függvényében [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/earth-similarity-index-esi>]

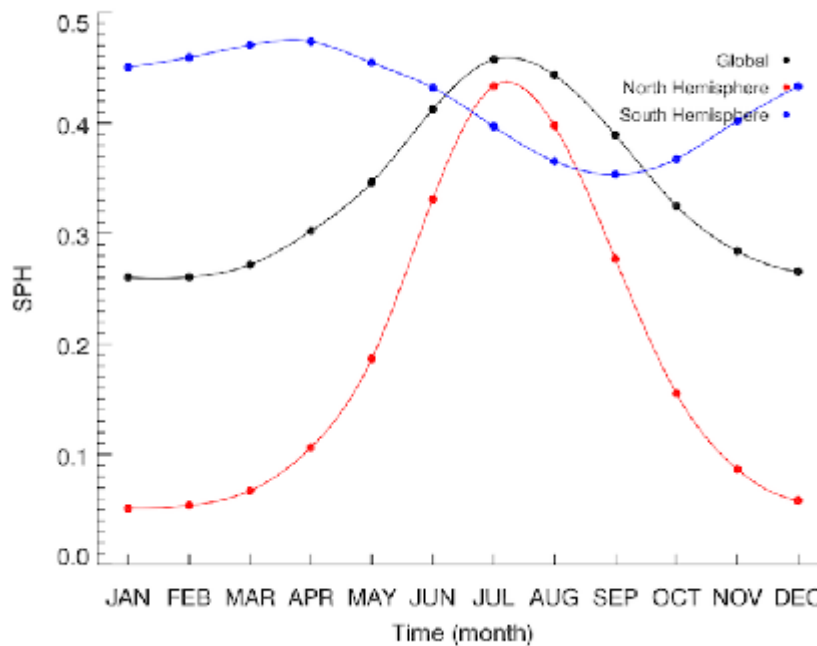
A 19. ábrán 47 db, 100 km-nél nagyobb sugarú Naprendszerbeli égitest van feltüntetve narancssárgával, valamint 258 ismert exobolygó késsel.

Az ESI index megkülönbözteti a szilárd belsejű és mérsékelt felszínű bolygókat, csak a mindkettőbe beletartozó bolygók lehetnek földszerűek, ezt mutatja a halványzöld rész.

A *standard elsődleges lakhatóság indexe (SPH)* 0-tól 1-ig méri a hőmérséklet, víz, és klímaviszonyok megfelelőségét a szárazföldi elsődleges termelőkre (növényekre) nézve. 1 értéke körül vannak a kb. 25 celsius fok felszíni hőmérsékletű bolygók, -10 celsius fok alatt és 50 celsius fok felett pedig nem lakható egy bolygó. Értéke függ a felszíni hőmérséklettől, relatív páratartalomtól. A Földnél értéke ma: 0,7; 500 millió éve: közel 1 volt.



20. ábra: A standard elsődleges lakhatóság indexe [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods>]

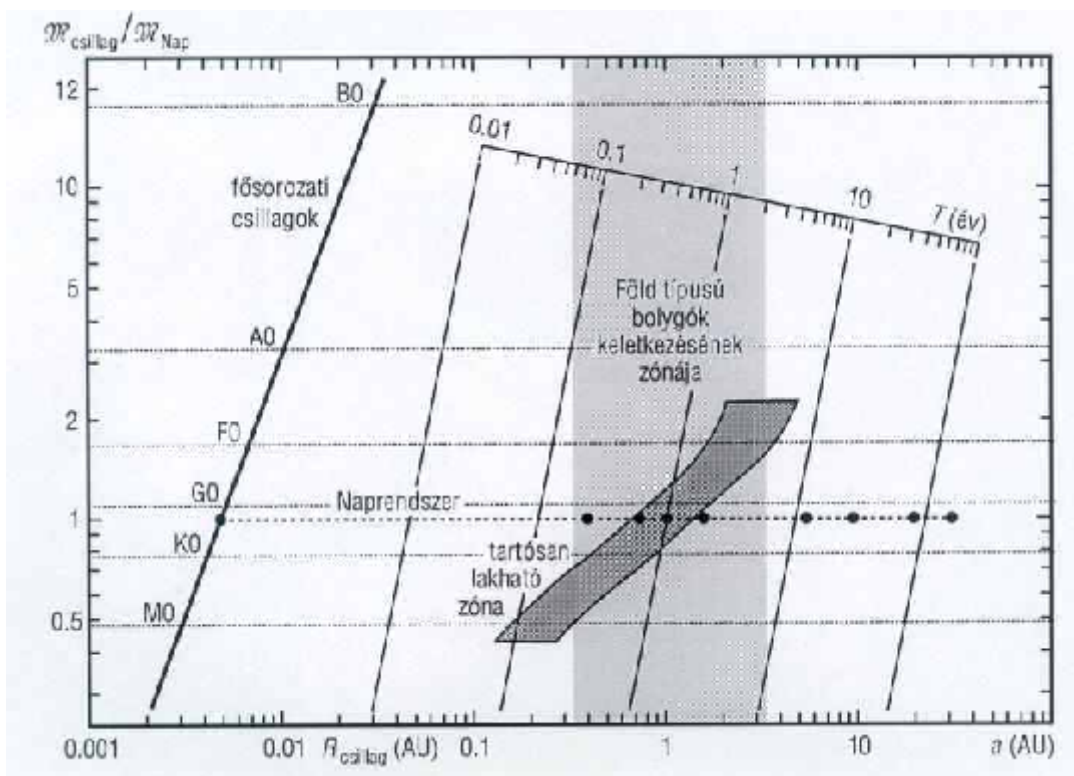


21. ábra: Lakhatósági viszonyok a Földön [Forrás: <http://phl.upr.edu/projects/global-terrestrial-habitability>]

A 21. ábra havi lebontásban mutatja a lakhatósági viszonyokat a teljes Földre (feketével), az északi féltekén (pirossal), és a déli féltekén (kékkel). Látható, hogy az északi féltekén van a legnagyobb szezonális variáció a lakhatóságban, valamint hogy a teljes bolygóra nézve a július-augusztusi időszak a legkedvezőbb [15].

3. Szuperföldek

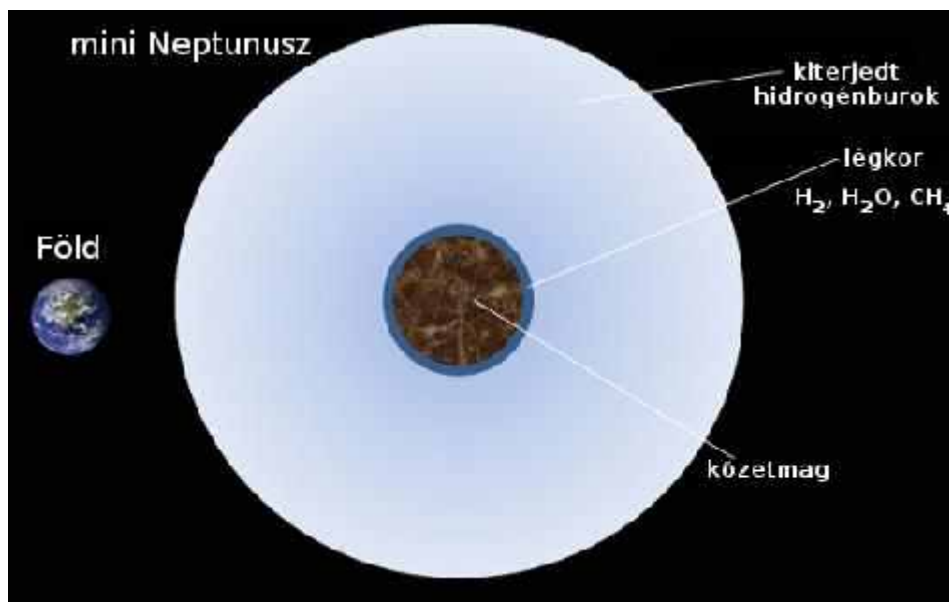
Az exobolygók terén talán a legizgalmasabb a szuperföldek és a még kisebb exobolygók témája, hiszen az élet kialakulása, civilizáció létrejötte az ilyen égitesteken a valószínű. Elméleti vizsgálatok alapján nagyjából megmondható, hogy egy adott csillagtípus esetén hol van az éleztóna, ahol a víz folyékony állapotban létezhet (földi légnyomás mellett). Vörös törpéknél ez közel helyezkedik el és keskenyebb, míg forróbb csillagoknál távolabb van és szélesebb.



22. ábra: Éleztónák elhelyezkedése (ferde sáv) [Szatmáry, 2003]

A szuperföldek olyan exobolygók, melyek tömege párszor nagyobb a Földnél, viszont kisebb, mint a Naprendszer óriásbolygói. A feltételezések szerint az ilyen bolygók felépítése többé-kevésbé hasonló a Földéhez. A szuperföldek az elképzelések szerint eltérő fejlődési utat járnak be, mint a naprendszerbeli kőzetbolygók. A róluk kapott mérési adatok azt mutatják, hogy szilárd kőzetmagjuk van, amit egy metánból, vízből és hidrogénből álló légkör vesz körül, ezen kívül pedig egy hidrogénben gazdag réteg található, melyet valószínűleg abból a por-és gázyagból fogtak be, amiből kialakultak.

Jelenlegi modellek szerint a csillagok ultraibolya sugárzása melegíti fel a bolygó gázburkát, ennek eredményeként az akár több bolygósugárnyi mértékben is kitágulhat, és külső rétegeiből gyorsan szökik a gáz. Viszont a párolgás ellenére, a kiterjedt atmoszféra nagy része a központi csillag élettartama alatt megmarad a bolygó körül, így ezek a bolygók valószínűleg nem fognak a Földhöz hasonlóvá válni. Az életrónában keringő szuperföldek még hatékonyabban tudják megtartani felfúvódott légkörüket, így hiába keringenek jó helyen, az általunk ismert élet feltételei nem alakulhatnak ki rajtuk.



23. ábra: A szuperföldek modellje [Forrás: <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130207-szuperfold-mini-neptunusz.html>]

Az ESA által 2017-re tervezett CHEOPS és TESS szatelliták mérései lesznek várhatóan azok, amelyek végső információt közölhetnek erről az elméletéről [8] [16].

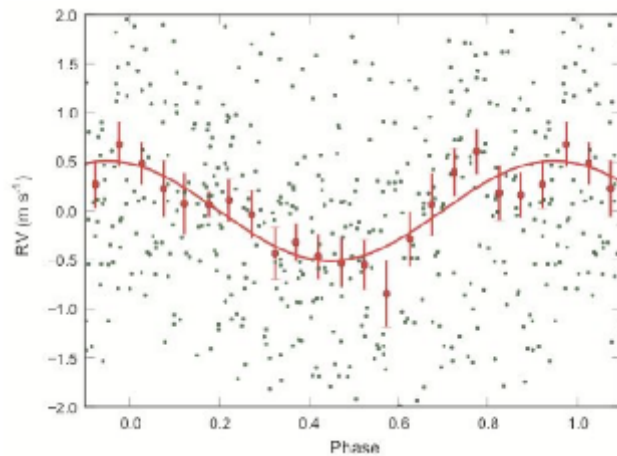
Szuperföldeket detektálni nem könnyű feladat. Az első közvetlen jelet, mely szuperföldről érkezett, az 55 Cancri legbelső bolygójáról észlelték az infravörös tartományban a Spitzer űrteleszkóppal a tavalyi év során. A csillagához legközelebb eső 55 Cancri e a Földnél mintegy kétszer nagyobb átmérőjű és nyolcszor nagyobb tömegű planéta, de kisebb, mint a Neptunusz, ezáltal a szuperföld kategóriába került. A mérések azt mutatták, hogy a bolygó kötött keringésű, és nem rendelkezik számottevő légkörrrel, tehát valószínűleg egy olyan égitest, amelynek kőzetmagját egy erősen párolgó víz-vízgőzburok veszi körül. Bár az 55 Cancri e nem lakható, ezek a mérések fontos lépést jelentenek a Föld-méretű exobolygók saját infravörös sugárzásának kimutatásában, amelyeket várhatóan a Hubble űrteleszkóp utódjaként felbocsátandó James Webb űrtávcső végez majd el [6].

A 2009-ben felbocsátott Kepler űrtávcső hatalmas lendületet adott az exobolygó kutatásnak, azon belül is a szuperföldek és kisebb bolygók felfedezésének. Idén februári eredmények szerint jóval több lakható bolygó létezik a Tejútrendszerben, mint azt korábban gondoltuk, akár már 10 fényéves távolságban is. A kutatók hatvannégy olyan vörös törpét találtak, melyek körül bolygók is vannak, ezek közül a legtöbb nem bizonyult lakhatónak. Három jelölt azonban igen, ezek 0,9, 1,4 és 1,7 földsugarúak, és 20, 38, és 56 nap alatt kerülik meg csillagukat. A megfigyelések azt mutatják, hogy a vörös törpék szerepe közel sem elhanyagolható: körülöttük gyakran találhatók bolygók, 60 százalékuknak pedig van a Neptunusznál kisebb kísérője. A Naphoz közel eső csillagok mintegy háromnegyede vörös törpe, így a közeli bolygókereső projektek nagy sikereket érhetnek el [9].

A Naprendszerhez legközelebb eső csillagrendszer, az Alfa Centauri kettőscsillag rendszere sokak fantáziáját megmozgatta már az élet lehetőségének szempontjából. Nemrég egy svájci kutatócsapatnak sikerült kimutatnia az Alfa Centauri B csillag 3,2 nap periódusú imbolygását látóirányban, melyet egy egyébként nem látható bolygótest gravitációs hatása okoz. Az effektus maga nagyon kicsi, a bolygó által a csillagnál előidézett sebességváltozás mindössze 51 cm/s, ami igen csak megkérdőjelezhetővé teszi a felfedezést, ahogyan az a 25. ábrán is látható. Eddig ez az eddigi legpontosabb bolygóészlelés a Doppler-effektus felhasználásával. Mint kiderült, a bolygó tömege körülbelül egy földtömeg, távolsága a csillagától mindössze 6 millió kilométer. Ez alapján a bolygó felszínén pokoli hőség uralkodhat. A felfedezés fontos lépés a más csillagok körül keringő földszerű bolygók felfedezése terén, mivel demonstrálja a műszertechnika egyre növekvő érzékenységét az egész kis tömegű exobolygókra [7].

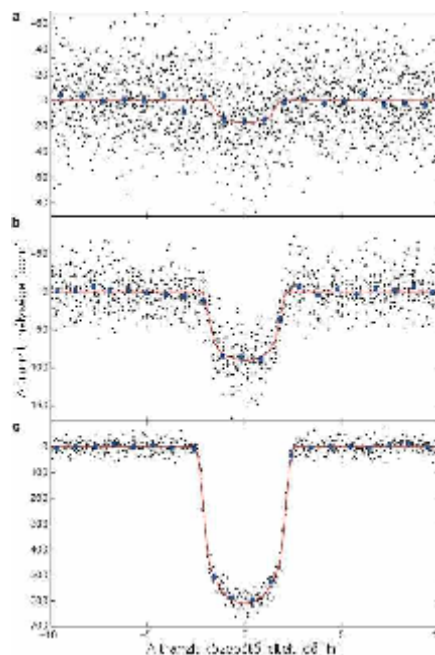


24. ábra: Így nézhet ki az Alpha Centauri rendszere [Forrás: <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20121017-alfa-cen-b-bolygo.html>]



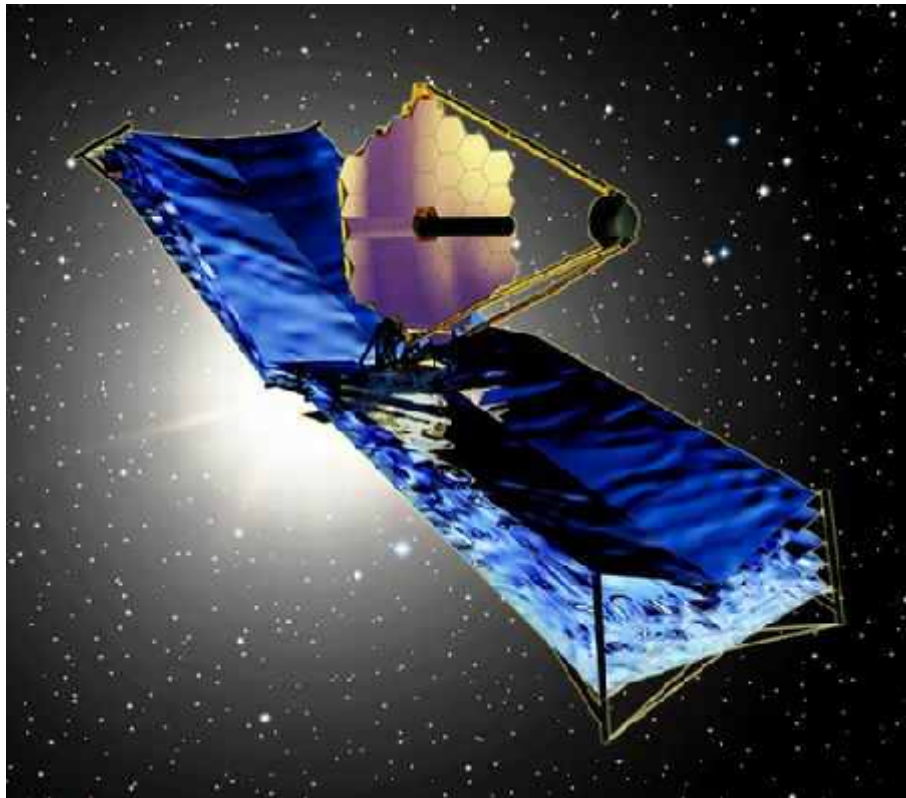
25. ábra: Az Alpha Centauri B radiális sebesség görbéje [Dumusque és mtsai, 2012] [17]

A Kepler egészen elképesztő eredményeket is szolgáltat számunkra, habár ezeket mindig fenntartással kell kezelni. 2013. februári eredmények alapján a Merkúrnál is kisebb exobolygóra bukkantak az űrteleszkóp kutatómunkája során. A bolygórendszer központi csillaga a Kepler-37, tőlünk mintegy 210 fényévnnyire. A rendszer Kepler-37b jelzéssel ellátott legbelső bolygója elméletileg alig nagyobb, mint a Hold, de kisebb, mint a Merkúr, így jelenleg a legkisebb ismert exobolygónak mondható. A Kepler-37 mindhárom bolygója közelebb kering csillagához, mint a Merkúr a Nap körül, így ezek nagyon forró, halott világok lehetnek [10].



26. ábra: A Kepler-37 fénygörbéje és annak modellje a bolygók tranzitjának környezetében [Forrás: <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130222-kepler-37b.html>]

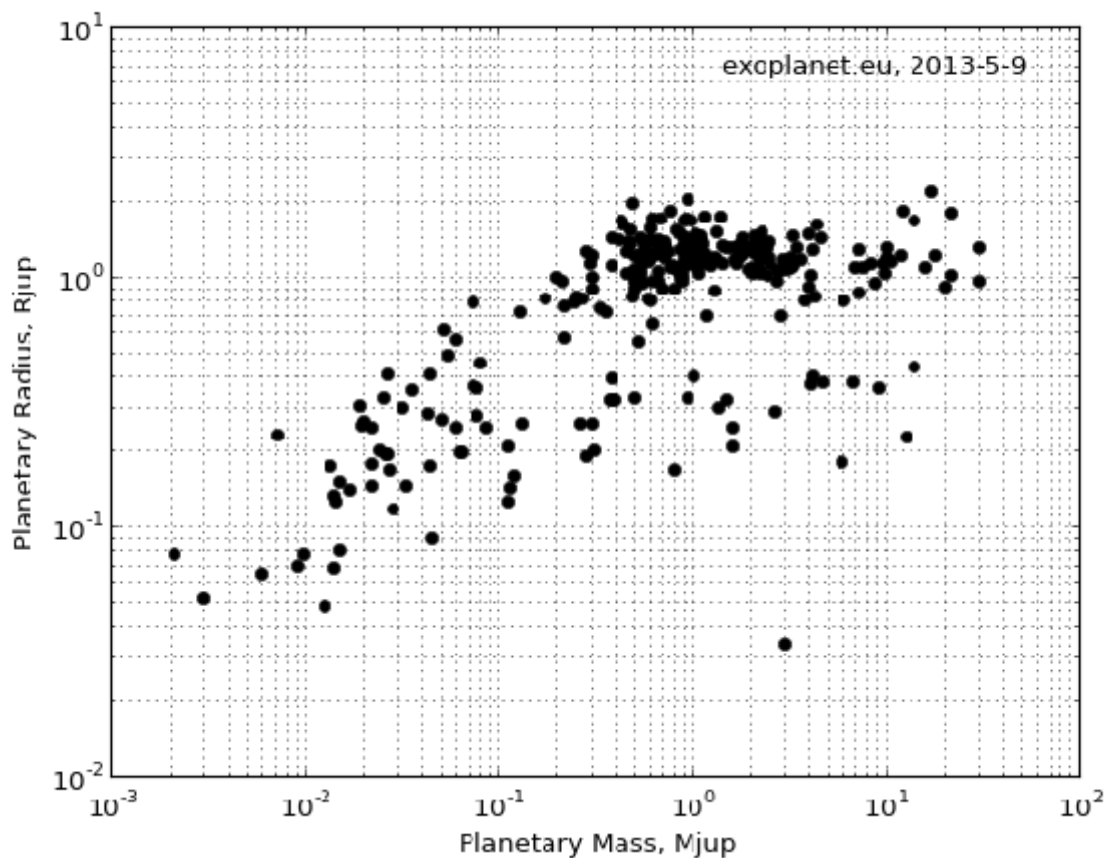
Az elkövetkező években remélhetőleg felbocsátásra kerülő James Webb űrtávcsőre is fontos szerep jut a földszerű exobolygók keresésében. Az egyik lehetséges projekt lesz a fehér törpecsillagok körül keringő, akár Földhöz hasonló bolygók kimutatása. Egy elmélet szerint ugyanis könnyebben találhatunk oxigént olyan bolygó légkörében, amely fehér törpe körül kering, mint ha a Naphoz hasonló csillagok bolygói között keresgélünk. Mielőtt a fehér törpe állapot beállna, a csillag vörös óriássá fúvódik fel, felemészti a belső bolygókat, így ha egy fehér törpe életrajzában bolygó kering, az azután került oda, miután a csillag ledobta külső gázhéjait. A fehér törpék felszíne bővelkedik nehéz elemekben, így jelentős hányaduknak lehet kőzetbolygója. A valószínűleg legjobb módszer az ilyen rendszerek kimutatására a tranzit módszer. Mivel egy fehér törpe megközelítőleg Föld méretű, egy hasonló nagyságú égitest jelentős részt takar ki belőle a fedés során. Nem mellesleg, ezen esetekben remek lehetőség nyílik a bolygó légkörének vizsgálatára is. Az életre utaló nyomok közül a vízgőz mellett az oxigén a legfontosabb, mivel ez növényzet jelenlétére utalhat. A várakozások szerint a James Webb űrtávcső már néhány órás megfigyelésekből ki tudja majd mutatni a fehér törpék életrajzában keringő bolygók légkörében lévő vízgőzt és oxigént [11].



27. ábra: A James Webb űrtávcső [Forrás: ESA]

4. Paraméter vizsgálatok

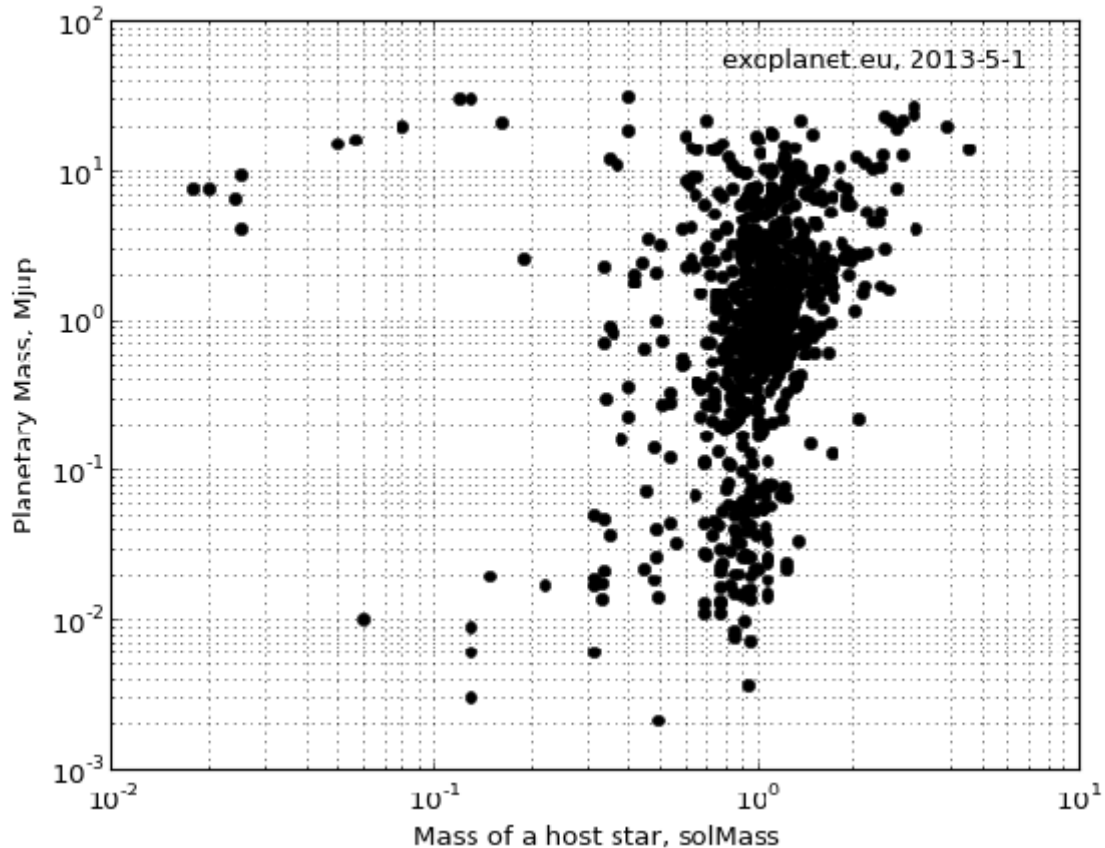
A következőkben néhány diagramot és hisztogramot szeretnék bemutatni, melyek alátámasztják a fentebb írtakat. Ebben az exoplanet.eu internetes katalógus volt segítségemre. Ezen az oldalon naprakész információkat találhatunk az exobolygók számáról, a legújabb felfedezésekről, és lehetőségünk van diagramon, illetve hisztogramon ábrázolni és elemezni az exobolygókat, tetszőlegesen változtatva a kívánt paramétereket. Ezt a katalógust felhasználva, saját munkámként készítettem a diagramokat. 2013. május 9-ei eredmények alapján 885 exobolygót ismerünk; ez a szám már kellően nagy ahhoz, hogy statisztikákat kezdjünk gyártani belőle. A különböző paramétereket ábrázolva egymás függvényében, megláthatunk összefüggéseket, csoportosulásokat, melyeknek asztrofizikai, égi mechanikai okai lehetnek. Vigyázni kell azonban a messzemenő következtetések levonásával. A 20 évnél nagyobb pályaperiódusú bolygókat nem tudjuk kimutatni, mivel még nem telt el ennyi idő azóta, hogy az exobolygók intenzív kutatása beindult. Emellett, bizonyos méret alatt sem tudjuk detektálni őket. A diagramokon látható hiányokat pedig kiválasztási effektusok, illetve mintavételi hiányosságok is okozhatják [5].



28. ábra: Sugár a tömeg függvényében

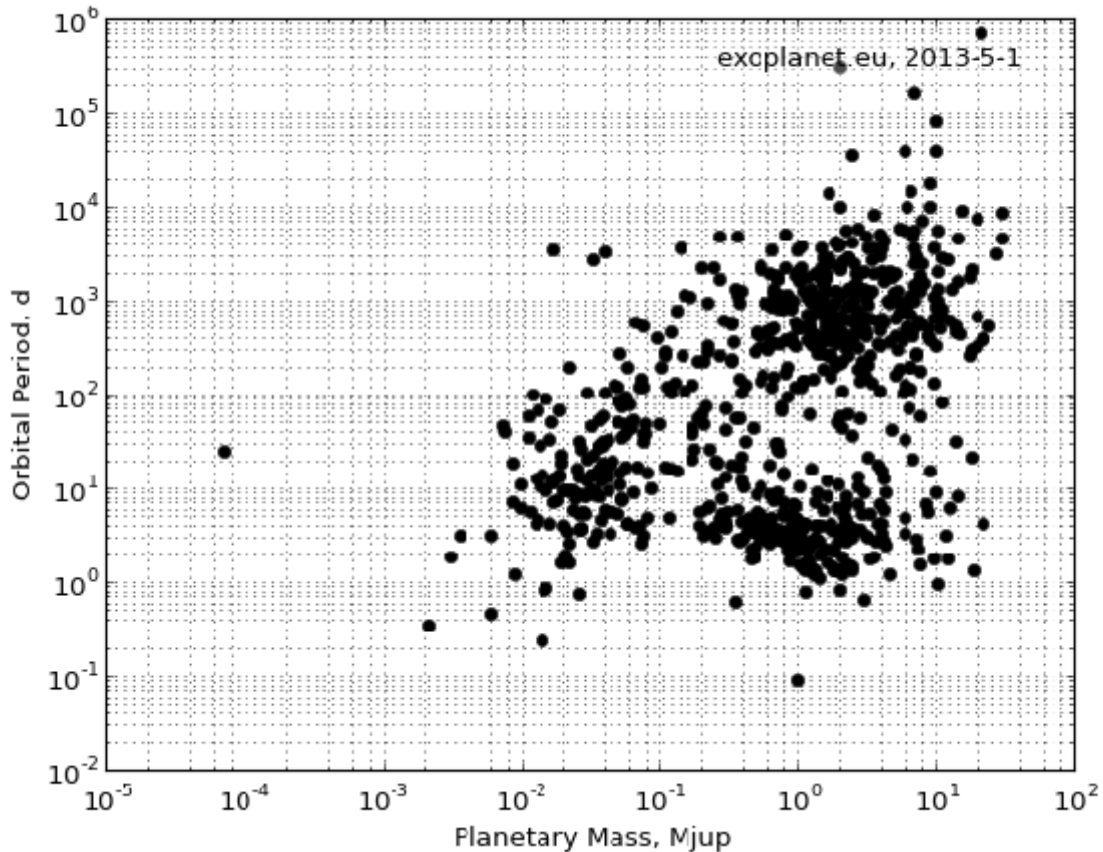
A 28. ábrán jól látszik, hogy a felfedezett bolygók közül sok 1-1,5 Jupiter-sugárnál, és 0,5-10 Jupiter-tömegnél található.

Ez nem meglepő eredmény, hiszen az eddig megfigyelt exobolygók jelentős része Jupiter típusú. Néhány tized Jupiter-sugárnál, és két-három nagyságrenddel kisebb tömegnél találjuk a forró Neptunuszokat, melyekből a legújabb eredmények szerint több van, mint forró Jupiteremből. Ezen a diagramon csak mintegy 200 db bolygót láthatunk, mivel a sugár csak a tranzitos észlelések során mérhető illetve becsülhető.



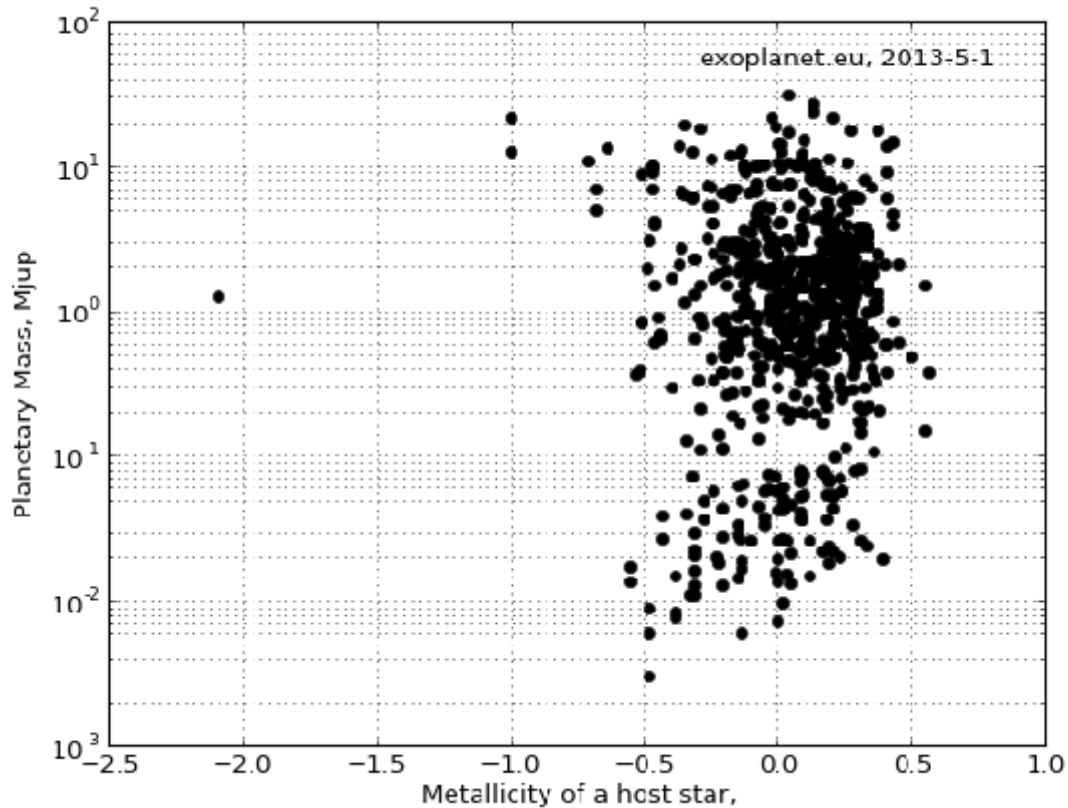
29. ábra: A bolygótömeg a csillagtömeg függvényében

Mint ahogyan a 29. ábrán látható, leginkább a Naphoz hasonló tömeggel rendelkező csillagok körül kerestek és találtak eddig exobolygókat. Ezek közül is kitűnnek a Jupiter-típusúak, hozzávetőleg 0,5-10 Jupiter-tömeg között, illetve láthatjuk még a forró Neptunuszok csoportját is 10^{-1} - 10^{-3} Jupiter-tömegnél. Bár nem sok, de vannak eredmények a Napnál kisebb tömegű csillagoknál is. Mint ahogy azt korábban már leírtam, a vörös törpék kutatása például hozhat eredményeket, ugyanis a Naphoz közel eső csillagok háromnegyede vörös törpe, és mintegy 60 százalékuknak van bolygója a jelenlegi elképzelések szerint.



30. ábra: A keringési periódus a bolygótömeg függvényében

A 30. ábrán három csoportosulást vehetünk észre. Az egyik a forró Jupiterok, 1-10 napos periódussal és körülbelül 0,5-5 Jupiter-tömegnél. A másik csoport e felett, a Jupiter-szerű exobolygók. Balra pedig, 10⁻²-10⁻¹ Jupiter-tömegnél és 1-100 nap körüli periódussal a forró Neptunuszok. Ez a csoportosulás nagyobb mintavételezésnél össze is mosódhat, könnyen lehet, hogy a mintavétel hiányosságai, vagy a kiválasztási effektusok is szerepet játszanak létrejöttükben.



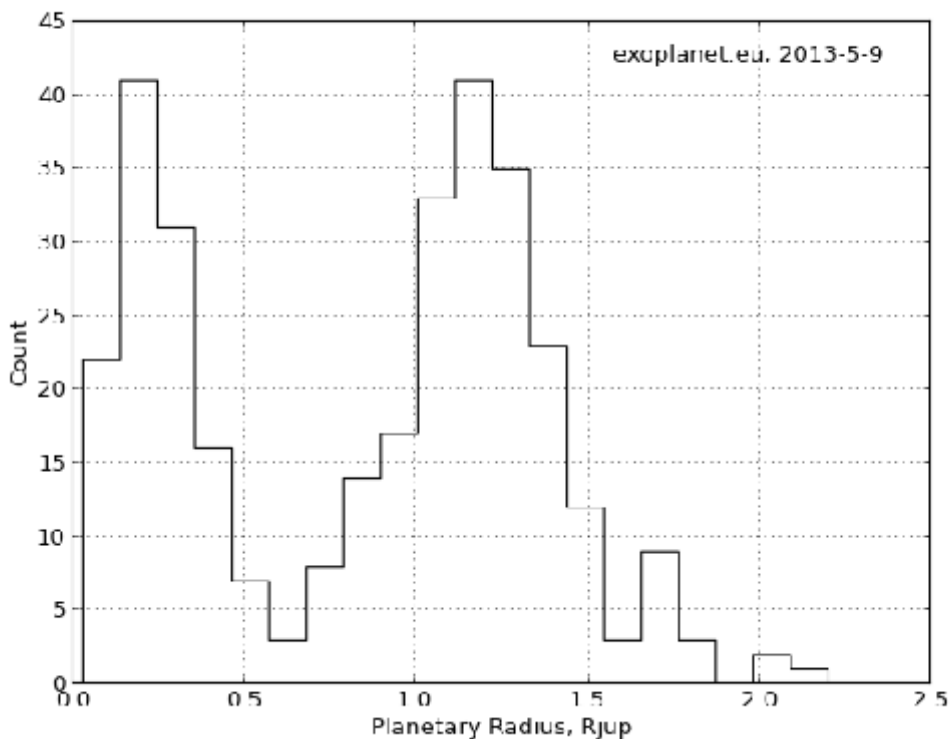
31. ábra: Bolygótömeg a csillag fémességének függvényében

A csillagok fémessége általánosan a héliumnál nehezebb elemek részaránya a hidrogén vagy héliumarányhoz képest. Leggyakrabban a vasatomok hidrogénre vonatkoztatott részarányát értik fémesség alatt:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log (N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}) - \log (N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\text{Nap}}$$

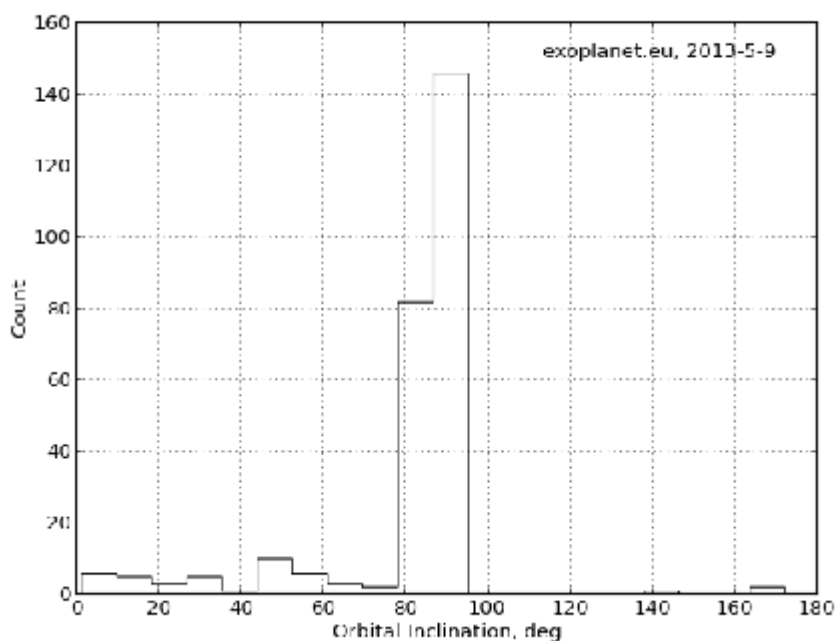
A Napnál idősebb csillagok fémtartalma kisebb, mint a Napé (a $[\text{Fe}/\text{H}]$ negatív), a Napnál fiatalabb csillagok fémtartalma pedig nagyobb (a $[\text{Fe}/\text{H}]$ pozitív). Ezek alapján elmondható, hogy bolygókat általában fémekben gazdag, fiatalabb csillagok körül találunk, ahogyan az ábrán is látható (-0,5 és 0,5 között). Ez azzal magyarázható, hogy az öregebb csillagok körül nem volt olyan mértékben nehezebb elemeket is tartalmazó anyagkorong megtalálható, mint a később született, fiatalabb csillagok körül.

A vasnál nehezebb elemek nem keletkezhetnek normál csillagok magjában fúziós folyamatok során, viszont különösen a nagy tömegű csillagok életútjának végén, amikor szupernóvaként felrobbannak, hatalmas mennyiségű nehéz elemet szórnak szét a csillagközi térbe, növelve ezáltal bolygók kialakulásának lehetőségét az ezután születő csillagoknál. A 31. ábrán is az látható, hogy a csillagok, melyek körül bolygókat találtak, viszonylag nagy fémességűek.



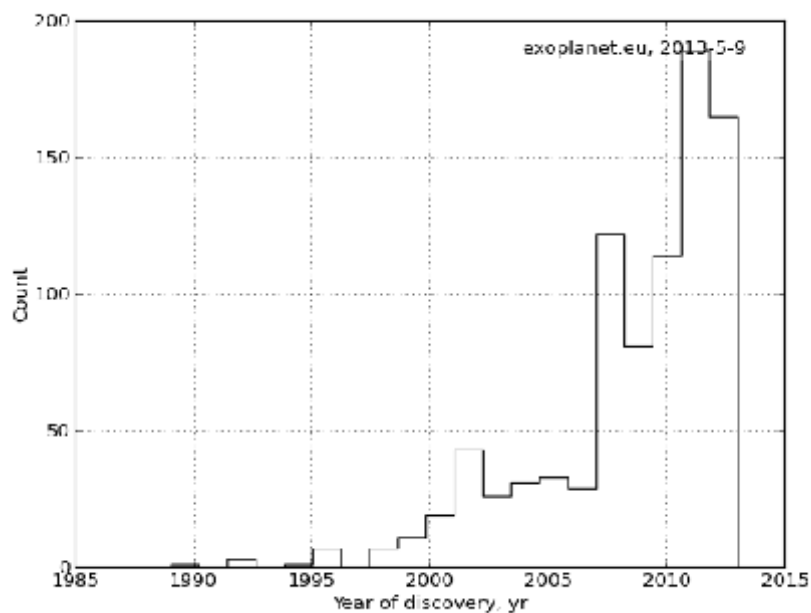
32. ábra: A bolygósugár szám szerinti eloszlása

A 32. ábrán két kiemelkedő csúcsot vehetünk észre. Az egyik 1-1,3 Jupiter-sugárnál található, ezek a Jupiter-szerű exobolygók. A másik 0,2-0,3 Jupiter-sugárnál van, ezek a Neptunuszok. A sugár adatokat a fedési exobolygók szolgáltatták.



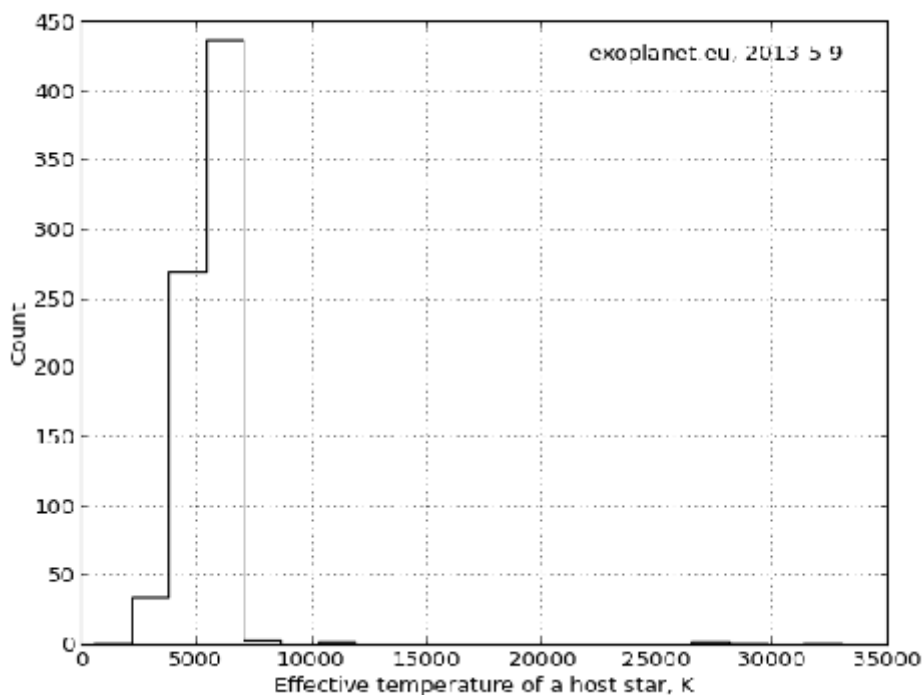
33. ábra: A pálya inklinációjának eloszlása

A 33. ábrán a darabszámot látjuk a pálya inklinációjának függvényében. Egy kiemelkedő csúcs van, 85-90 foknál, ami nem meglepő, hiszen ilyen inklinációnál van legnagyobb esély tranzitos módszerrel felfedezni exobolygókat.



34. ábra: Exobolygók száma a felfedezés éve szerint

A 34. ábra a darabszámot mutatja a felfedezés évével összefüggésben. Látható, hogy a 90-es években és 2000 környékén évente alig pár tucat exobolygók fedeztek fel, nyilvánvalóan a korabeli technikai adottságok miatt. 2010 után azonban megugrott a felfedezések száma, a 2009-ben felbocsájtott Kepler űrtávcsőnek köszönhetően, és ez a szám 10 éven belül a CHEOPS, a TESS, és a JWST munkája során tovább fog majd növekedni.



35. ábra: A bolygós csillagok effektív hőmérsékletének eloszlása

A 35. ábra a darabszámot mutatja a csillag hőmérsékletének függvényében. A kiemelkedő csúcs 4000 és 6000 K körül található. A mi Napunk effektív hőmérséklete is ebbe a tartományba esik. Kérdés, hogy kiválasztási effektus eredménye, vagy valóban az ilyen hőmérsékletű csillagok esetén legjellemzőbb a bolygók kialakulása.

5. Kitekintés

Szakedolgozatom utolsó fejezetében a jövőben indítandó programokat és az ezekhez kapcsolódó várakozásokat mutatom be röviden, valamint zárszóként saját gondolataimat szeretném megosztani.

Jelenlegi álláspont szerint 2017-ben kerülhet felbocsátásra a Kepler űrtávcső utódja, a TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), mellyel közeli fényes csillagok körül remélnek felfedezni bolygókat. A TESS négy kisebb távcsövével nagyobb égterületet vizsgál majd át, mint a Kepler. A teleszkópok mindegyike 23x23 fokos égterületet lát, és egy területet 27 napig figyel majd. Ekkor az észlelendő sávot eltolva folytatja a megfigyelést, melynek köszönhetően tizenhárom ilyen beállítással az égbolt közel fele lefedhető. A sávokat úgy választják meg, hogy az ekliptika pólusa körüli égterület állandóan észlelhető lesz.

A misszió két év alatt várhatóan az egész égboltot átvizsgálja, kivéve a galaxisunk síkja körüli területeket. A TESS a Kepler mintáihoz viszonyítva átlagosan tízszer közelebbi bolygókat fedezhet fel. Az űrtávcső körülbelül két hét keringési idejű pályán, a Hold keringési síkjára csaknem merőlegesen fog keringeni, a Holddal 2:1 arányú rezonanciában. Így most először, több olyan szabad szemmel is látható fényes csillagot is megfigyelhetünk, melyeknek fedési exobolygók lehetnek. Eddig erre egyetlen példa van, az 55 Cancri [16].

Szintén 2017-ben indítandó projekt a CHEOPS (Characterising Exoplanet Satellite). Az ESA által indítandó űrtávcső olyan, közeli fényes csillagokat figyel majd, melyeknek már ismertek bolygói; célja az újabb exobolygók felfedezése tranzit módszerrel. A mérésektől azt remélik, többet megtudhatnak az exobolygók tulajdonságairól, kialakulásáról, a bolygórendszerek fejlődéséről. Optimális esetben együttműködhet majd a James Webb és a TESS űrtávcsövekkel, valamint a nagyobb földi távcsövekkel, mint például az E-ELT (European Extremely Large Telescope) [20].

Végül pedig, saját gondolataimat szeretném röviden kifejteni a témában. Az exobolygó kutatás nem titkolt célja, hogy életet találjunk a Földön kívül. Kérdés, hogy egyáltalán mekkora a valószínűsége annak, hogy máshol is jött létre élet az évmilliárdok során. De ami még fontosabb, hogy az értelmes életre mennyi a lehetőség, és hogy miért nem találkoztunk még velük. Többek között a Fermi-paradoxon magyarázatai adnak példákat arra, hogy miért nem léptek még kapcsolatba velünk idegenek. Lehetséges, hogy mi vagyunk az első, ilyen szinten értelmes lények, de az is, hogy az Univerzum mostanra vált az élet számára alkalmas helyé. Nem biztos, hogy a többi bolygórendszer így néz ki mint a miénk, ahol a Jupiter és a többi külső óriásbolygó megvédi a belső bolygókat a kozmikus becsapódásoktól. Nem hagyhatjuk továbbá figyelmen kívül azt a tényt sem, hogy az Univerzumban számos olyan jelenség van, ami nem kedvez az élet kialakulásának, így például a szupernóva- és hipernóva robbanások, gamma kitörések, ütközések, becsapódások.

Azt sem szabad elfelejtenünk, hogy a Föld, mint bolygó, illetve a Holddal alkotott kettőse mennyire jól kitalált, speciális rendszer, egyáltalán nem biztos, hogy ez gyakori jelenség.

Számos ok található arra, hogy miért nem látogattak még meg minket más bolygókról érkező idegenek. Például, hogy számukra is lehetetlen még a csillagközi repülés lehetősége, vagy volna rá lehetőségük, csak nem érdekli őket. Emellett, lehetséges, hogy volt vagy van jelenleg is ilyen "gyarmatosítási hullám", csak a roppant nagy távolságok miatt hozzánk nem érkeztek el, vagy ha mégis, akkor etikai okokból nem avatkoztak be a fejlődésünkbe. Nem zárhatjuk ki azt sem, hogy egész egyszerűen nem érdekeli őket, mert a bolygónk és élőlényei számukra túl primitívek, vagy nem is ilyen szén, víz, és oxigén alapú élőlények, így mi nem vagyunk hasznosak számukra. De az is lehet, hogy egyedül vagyunk a Világegyetemben [3].

A SETI programban jelenleg is kutatók vizsgálják a földön kívüli értelmes élet lehetőségeit. Az idegenekkel való kapcsolatfelvétel céljából több üzenetet is útnak indítottak már, különböző formákban. Az Arecibo-rádiótávcső 1974-ben egy nullákból és egyesekből álló számsorozatot küldött ki a tőlünk 25000 fényévnnyire lévő Messier 13 csillaghalmaz felé. Az üzenet rólunk és bolygónkról közöl információkat, 1679 darab karakter formájában, mely a 73-as és a 23-as prímszámok szorzata. Itt rögtön jön az a feltétel, hogy a fogadó félnek is ismernie kell a prímszámokat, valamint rá kell jönnie, hogy az üzenet 73 sorból, és 23 oszlopból áll. Ha mindent sikerülne is azonnal megfejteniük, és rögtön válaszolnak, a fény véges terjedési sebessége miatt így is 50000 évbe telne, mire válaszüzenetet kapnánk, ami nagyjából ötszöröse a mai emberi civilizáció teljes létezési idejének. Emellett, a külső bolygók felé indított Voyager-1 és Voyager-2, illetve a Pioneer-10 és Pioneer-11 űrszondákon is helyeztek el üzeneteket. Ezek a szondák ugyan százezer évekig még csillagok közelébe sem érnek, de kezdeményezésként mindenképp megemlítendő, mint szimbolikus tett az emberiség részéről.

Véleményem szerint, eléggé valószínűtlen, hogy egyedül lennénk a Világegyetemben. A jövő nemzedékeire vár a feladat, hogy mindezt bebizonyítsák, és hogy a földi emberi civilizáció eljuthasson olyan szintekre, amelyeket manapság csak a science fiction világában ismerünk. A Csillagok Háborúja filmekben például rengeteg lakott és magasan fejlett civilizációval rendelkező bolygót láthatunk, és a cselekmény egy egész galaxisra kiterjed. A Star Trek filmekben, valamint a Csillagkapu sorozatokban is számos fejlett kultúrával és megannyi furcsa életformával találkozunk a szereplők. Szintén klasszikusak még Isaac Asimov, Arthur C. Clarke és Stanislaw Lem regényei, valamint Frank Herbert Dűne című könyve, melyből több filmfeldolgozás is készült. De hogy ne csak bolygókat említsünk, az Avatar című film az Alfa Centauri rendszerében, a Pandora nevű holdon játszódik, remek példaként és tanulságként szolgálva arra, hogy az ember milyen veszélyes is lehet más civilizációkra nézve.

Dolgozatomat a valaha "élt" legismertebb idegen egy olyan gondolatával zárnám, mely helytől és időtől függetlenül, örök klasszikusként szolgál a ma élő embereknek, és a jövő nemzedékeinek is:

"Soha nem szabad lebecsülni az Erőt, nagy hatalma van, kitartást ad. Az Erőnek nem számít a méret, összetartja a galaxist. Az életből árad, ezért nagy. Összeköt és megvilágosít minket. Az Erő bennünk áramlik, érezni kell. Higgy benne, akkor menni fog. Uralkodni kell magadon, tedd, vagy ne tedd, de soha ne próbáld! Megismerésre, védekezésre használd, sose támadásra. Tudni fogod, csak légy nyugodt, oszlasd el a kételyeidet." /Yoda/

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Szatmáry Károlynak a szakdolgozatomhoz nyújtott segítségéért és türelméért, Szalai Tamásnak segítségéért, valamint csoporttársaimnak és barátaimnak az építő jellegű kritikáikért.

7. Nyilatkozat

Alulírott, Maróti Julianna Fizika BSc szakos hallgató, kijelentem, hogy a szakdolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

.....

Maróti Julianna

Szeged, 2013. 05. 17.

8. Hivatkozások

- [1] <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/exo/exo2003evk.html>
- [2] http://astro.u-szeged.hu/szakdolg/hajaorsolya_szd/HajaOrsolya_szd.pdf
- [3] http://astro.u-szeged.hu/szakdolg/nagyandrea_szdBSc/NagyAndrea_szd.pdf
- [4] en.wikipedia.org/wiki/Rossiter–McLaughlin_effect
- [5] <http://exoplanet.eu/diagrams> (2013. 05. 09.)
- [6] <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20120509-szuperfold-spitzer.html>
- [7] <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20121017-alfa-cen-b-bolygo.html>
- [8] <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130207-szuperfold-mini-neptunusz.html>
- [9] <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130219-lakhato-bolygok-a-szomszedban.html>
- [10] <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130222-kepler-37b.html>
- [11] http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130303_elet_halott_csillagoknal.html
- [12] <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20130422-kepler62.html>
- [13] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Exobolygó> (2013. 05. 03.)
- [14] <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog> (2013. 05. 03.)
- [15] <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods> (2013. 05. 03.)
- [16] http://www.csillagaszat.hu/urteleszkopok/20130426_tess.html
- [17] <http://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1241/eso1241a.pdf>
- [18] <http://www.matud.iif.hu/06aug/08.html>
- [19] <http://wwwold.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz110708/szabom110708.html>
- [20] [http://www.urvilag.hu/nyomtat/urcsillagaszat_europaban/
20121021_szuperfoldek_a_celkeresztben](http://www.urvilag.hu/nyomtat/urcsillagaszat_europaban/20121021_szuperfoldek_a_celkeresztben)

