

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi és Informatikai Kar

Kísérleti Fizikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

A Fermi paradoxon, Föld-típusú exobolygók keresése és felhasználásuk a fizika tanításában

Készítette: Iffiú Mihály Attila
Fizikus BSc levelező hallgató

Témavezető: Dr. Székely Péter
egyetemi adjunktus

SZEGED
2014

Tartalomjegyzék

Tartalmi összefoglaló	3
1. Bevezető – A földönkívüli világok	4
2. A Fermi paradoxon: „Where is everybody?”	4
3. A Drake-egyenlet	5
4. A civilizációk „technológiai nyomai” – a SETI és a Dyson-gömbök	6
4.1. A SETI	6
4.2. A Dyson gömbök és szupercivilizációk	8
5. A Drake-egyenlet pontosítása – a „Ritka Föld”-hipotézis	9
5.1 Galaktikus lakható zóna	9
5.2 A központi csillag tulajdonságai	10
5.3 Nagyon keskeny lakható zóna	10
5.4 A bolygórendszer struktúrája, felépítése	11
5.5 Kellő mennyiségű víz egy bolygón	12
5.6 Egy nagy hold jelenléte és a ferde forgástengely	12
5.7. Lemeztektonika – a vulkánok és a szén körforgása	13
5.8. A „Ritka Föld”-egyenlet	14
5.9. A „Ritka Föld”-hipotézis és az újabb eredmények	15
6. Az exobolygó kutatás – távoli csillagok körüli bolygók keresése	16
6.1. Az exobolygó kutatás jelentősége	16
6.2. Az exobolygók – túl távoliak ahhoz, hogy látszódnak	16
6.3. Exobolygók észlelésének legfontosabb technikái	17
6.4. Az exobolygó kutatás eredményei	20
6.4.1. Az exobolygó kutatás elméleti jelentőségű eredményei	20
6.4.2. Exobolygó típusok	22
6.4.3. Az exobolygók nagy változatossága	24
6.4.4. Földszerű bolygók sűrűsége a Galaxisban	25
6.4.5. Megerősített földszerű exobolygók	26
6.5. Nagy pontosságú eszközök az exobolygó kutatásban	22
6.5.1. Spektrográfok	22
6.5.2. Űrtávcsövek	23
6.5.3. A megvalósítás előtt álló űrtávcsövek	31
6.5.4. A jövő űrtávcsövei	33
6.6. A hosszútávú cél – bioszignatúra kimutatása exobolygókon	27
7. Az exobolygók témakörének alkalmazása a fizika oktatásában	36
7.1. Motiváció és exobolygók a fizikatanításban	39
7.2. Alkalmazás a fizika hagyományos területein	37
7.2.1. Mechanika	37
7.2.2. Hőtan	41
7.2.3. Elektromosság	43
7.2.4. Optika	43
7.3 A számolás fontossága a fizikában – Arisztarkhosz	45
7.4 Kitekintés	46
Irodalomjegyzék	48

Tartalmi összefoglaló

A Fermi-paradoxon egy ellentmondás, ami a galaxisunk technikai civilizációinak igen magas becsült száma és a hiányukat mutató tapasztalati tények között van. Legújabb csillagászati tudásunk szerint (9) a földszerű bolygók száma a Galaxisban igen nagy, becsülhető ($\sim 10^9$) – és evolúciobiológiai tudásunk szerint az élet kialakulása sem egy különlegesen valószínűtlen folyamat. Fermi szavaival, a galaxisunkban „nagy zsúfoltságnak kellene lennie”. Ennek ellenére, mind a mai napig nem észleltük idegen civilizációk nyomait.

Frank Drake 1961-ben pontosította Fermi becsléseit és felállította a nevezetes Drake-egyenletet a Galaxis kommunikációképes civilizációinak N számáról:

$$N_D = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L \quad (\text{az összetevőket l. a 4. fejezetben})$$

Ahelyett, hogy spekulatív becsléseket tennénk az f_c -re (technikai civilizáció valószínűsége) vagy L -re (civilizáció élettartama), célszerűbb lenne egyből a civilizációk technológiai nyomait keresni. A SETI Institute kutatásainak célja az ilyen nyomokat rádiójelek formájában észlelni. Sokak csalódására a SETI 1960-tól máig nem tudott olyan jelet fogni, ami földönkívüli eredetre utalna.

Az elmúlt 50 évben a Drake-egyenletet többször kellett pontosítani – a legátfogóbb munka a „Ritka Föld”-hipotézis. Szerzői felállították a „Ritka Föld”-egyenletet:

$$N_{RE} = N^* \times n_e \times f_g \times f_p \times f_{pm} \times f_i \times f_c \times f_l \times f_m \times f_j \times f_{me} \quad (\text{az összetevőket l. az 5. fejezetben})$$

Eszerint a komplex életet hordozni képes bolygók száma jóval kisebb, mint az eddigi becslések, így civilizáció is jóval kevesebb van – ez egy válasz lehet a Fermi-paradoxonra.

Nem ismerünk több életet hordozó bolygót, melyek alapján statisztikát lehetne készíteni. Ezért mindkét egyenlet több paramétere igen tág határok közt mozog – így az optimista és pesszimista becslések értéke közt akár 6-os (!) nagyságrendi különbség is lehet.

A legprecízebb tudományos választ a fejlett civilizációk számát illetően valószínűleg majd az exobolygó kutatás fogja megadni. Az exobolygók észlelését sokáig lehetetlennek tartották, mert sokkal halványabbak anyacsillaguknál, mígnem 1995-ben az 51 Pegasi körül Jupiter típusú bolygó fedeztek fel. A megfigyelések pontossága azóta sokat nőtt, a COROT és a Kepler űrtávcsöveknek, valamint a nagyon precíz spektrográfoknak köszönhetően. Ma a spektrográfia közelít ahhoz a pontossághoz, hogy a Föld méretű exobolygókat is kimutassa.

Jelenleg (2014.04.30.), 1786 bizonyított exobolygót és 3845 Kepler „exobolygó-jelöltet” tartanak nyilván (12). 2013 novemberében egy régi sejtést sikerült igazolni: a Kepler adataiból statisztikai elemzéssel kimutatták, hogy a Föld típusú bolygók nem ritkák, a kevés észlelés a műszerek jelenlegi elégtelen érzékenységevel magyarázható. A Naphoz hasonló csillagok $22 \pm 8\%$ -ának van Föld nagyságú bolygója lakható zónában (9).

Az exobolygó kutatás középtávú célja a földszerű bolygók katalogizálása a galaktikus környezetünkben. Ehhez a mainál jelentősen nagyobb teljesítményű űrteleszkópok kellene. Ezek már épülnek is: a James Webb űrtávcső és a TESS. Utóbbtól az eddigi nagy hiányosság pótlását, az észlelt földtípusú exobolygók számának sokszorozódását várják. A következő lépések már jóval drágább műszereket igényelnek, mert a lakható zónában keringő exobolygók légkörében az élet kémiai jeleit (pl. oxigén) kell majd keresni.

A földönkívüli élet izgalmas világa jelentős motivációs lehetőség a fizika oktatásában. A természettudományok tanításának színesebbé tételét az exobolygók távoli világainak segítségével már Dr. Szatmáry Károly is megfogalmazta 2006-os cikkében (14).

A diákok fizika tanulási motivációja igen alacsony. De a földön kívüli világok és azok lakói mindenkit lenyűgöznek, kicsit és nagyot, tanult és tanulatlan embert egyaránt. Az exobolygó kutatás sok csillagászati ismeretet igényel, a csillagászathoz pedig sok fizikai téma kapcsolható, a körmozgástól az entrópia törvényén át a távcsövek optikájáig, a fúzióig és a kvantumjelenségekig. A csillagászaton keresztül szemléletesen mutatható meg, hogy miért nem elégséges a jelenségek egyszerű leírása és miért annyira fontos a fizikában a számolás.

A Fermi-paradoxon és Föld-típusú exobolygók keresése

1. Bevezető – A földönkívüli világok

Az ókori görögök kitűnő filozófusok voltak. Pusztán filozófiai megfontolásból már Démokritosz úgy gondolkozott hogy: „...számtalan, különböző nagyságú világ létezik. Némelyikükben nincs sem Nap, sem Hold...”. Azonban az embereket igazán csak a modern természettudományok megszületése óta nyugózi le a földönkívüli világok gondolata.

A XV. században lassan kezdett megfogalmazódni, hogy a világegyetem végtelen (Nicolaus Cusanus) és a Föld is csak egy bolygó a többi bolygó között (Kopernikusz).

Giordano Bruno már kijelentette: "...nem a Föld a világ közepe, de még csak nem is a Nap, mert ezekhez hasonló számtalan test létezik az Univerzumban..." (1) – előrevetítve a távoli csillagok körüli bolygók gondolatát, és magára zúdítva a katolikus egyház haragját.

Az 1700-as évek végére az „élet idegen bolygókon” gondolata már annyira általánossá vált, hogy maga Gauss vetette fel: úgy lehetne üzeni a Marsra, hogy a szibériai erdőkbe hatalmas rajzolatokat vágunk, melyek Püthagorasz tételét ábrázolják (2).

Az 1900-as években már általánosan elfogadottá válik a földönkívüli értelmes élet lehetősége. Ekkor jelenik meg a sci-fi irodalmi műfaja. A legtöbb alkotásban az űrutazáson kívül a földönkívüli világok lakói, az „idegenek” is szerepelnek. Ebben a környezetben született meg a Fermi-paradoxon.

2. A Fermi paradoxon: „Where is everybody?”

A Fermi-paradoxon az az ellentmondás, ami a Galaxis technikai civilizációinak igen *magas becsült száma* és a hiányukat mutató *tapasztalati tények* között húzódik. Enrico Fermi fogalmazta meg először a következő gondolatmenetből kiindulva:

A galaxisunk kb. 100 milliárd csillaga közül valószínűleg igen soknak van bolygórendszere és számos bolygón fejlődhetett ki élet, mely nagy valószínűséggel a fejlett technikai civilizációk szintjére is eljutott a Galaxis keletkezése óta eltelt több milliárd évben. De – ha lehetséges a csillagközi utazás – miért nem találkoztunk eddig ezekkel a civilizációkkal?

1950-ben, Los Alamosban Enrico Fermi Teller Edével és két másik fizikussal beszélgetett az UFÓ-król, de mint kiemelkedő tudósok egyúttal számításokat is végeztek a földönkívüli civilizációkkal kapcsolatban (2). Fermi az ún. „Fermi-problémák” kitalálója volt: általa reális mennyiségi becslést lehet tenni olyan dolgokról is, melyekről alig vannak adataink. Ez alapján Fermi meglepően pontosan becsülte meg a Trinity atombomba-teszt robbanóerejét, pusztán pár levegőbe dobott papírfecni eséséből.

Fermi ugyanígy próbálta megbecsülni a galaxisunkban létező fejlett civilizációk számát is. Az eredmény igen nagy szám lehetett, mert kijelentette hogy „meglehetősen nagy zsúfoltságnak kell itt lennie”. A beszélgetés tovább folytatódott más témákról, mikor Fermi váratlanul megkérdezte: „Where is Everybody?” „De akkor hol vannak?” (mármint az idegenek). Mert feltételezve, hogy a csillagközi utazás egy fejlett civilizáció számára lehetséges, legalább egynek közülük már el kellett volna jutnia a Földre.

Magának Ferminek a válasza a paradoxonra az volt hogy: A) vagy a csillagközi utazás lehetetlen, vagy B) olyan nagy anyagi ráfordítást igényel, hogy az nem éri meg senkinek.

Nyilvánvaló, hogy a paradoxon megválaszolásához nagyon sokoldalú elméleti tudás szükséges: a galaxisok felépítése, a csillagok kialakulása, planetológia, geológia, evolúcióbiológia, de még szociológia, technikafilozófia is.

A Fermi-paradoxonra számtalan magyarázat született – Stephen Webb fizikus könyvében (3) 50 lehetséges megoldást tárgyal. Ezek közt van pár vicces, (S1. Már itt vannak és magyaroknak nevezik magukat, S.15 Otthon ülnek, és neteznek) néhány összeesküvés-

elméleten alapuló (S5. Állatkert-hipotézis – A Föld szándékosan el van különítve). Jó pár megoldás az idegen civilizációk viselkedésével próbálja magyarázni a paradoxont (S.23. Úgy döntöttek, hogy nem lépnek velünk kapcsolatba, S.27 A civilizációk sorsa egy katasztrófa, S.49 A tudomány nem szükségszerű).

Tudományosság szempontjából a legszínvonalasabbak a 32-44 megoldások (pl. S.35. Megfelelő kőzetbolygók ritkák, S.39. A Galaxis egy veszélyes hely, S.42. A Hold egyedi).

Enrico Fermi 1950-es első becslése óta a paradoxonra nincs olyan egyértelműen elfogadott, tudományos magyarázat, mint pl. az Olbers-paradoxonra.

3. A Drake-egyenlet

A rádiócsillagász Frank Drake 1961-ben általa próbálta pontosítani Fermi becsléseit, hogy konkretizálja a számításba veendő paramétereket – ezzel felállította a nevezetes Drake-egyenletet a Galaxis technikai civilizációinak N számáról. Legismertebb formája:

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L \quad \text{ahol:}$$

N – az egymással kommunikálni képes civilizációk száma

R^* – a csillagok keletkezésének gyorsasága (db/év) a Tejútrendszerben

f_p – a bolygórendszerrel rendelkező csillagok aránya

n_e – a lakható bolygók átlagos száma egy bolygórendszerben

f_l – az élet kialakulásának valószínűsége

f_i – az értelmes lények kialakulásának valószínűsége

f_c – egy technikai civilizáció kialakulásának valószínűsége

L – a technikai civilizációk várható élettartama

A Drake-egyenletbe behelyesített számokkal próbáljunk egy számítást végezni, hogy – bizonyos határok között – hány kommunikációképes civilizáció létezhet a galaxisban:

R^* értékeben legújabbban a galaxisban 400×10^9 csillaggal számolnak (a nem túl jól látható vörös törpékkel együtt). Mivel a galaxisunk kb. 12×10^9 éves. $\rightarrow R^* = 33$ csillag/év

f_p a bolygórendszerrel rendelkező csillagok aránya. Legutóbbi kutatások azt igazolták, hogy még a gömbhalmazok nagyon idős csillagai körül is keletkeztek bolygók (8). Az, hogy minden második csillag rendelkezik bolygóval, egy elfogadhatónak tűnő becslés. $\rightarrow f_p = 0,5$

n_e a lakható bolygók száma. Röviddel ezelőttig az volt a feltételezés, hogy csillagonként 2 bolygó lesz lakható. A Kepler legfrissebb adatainak elemzése szerint a Naphoz hasonló csillagok kb. 22%-ának van egy Földhöz hasonló bolygója (9) $\rightarrow n_e = 0,22$

f_l az élet kialakulásának valószínűsége. Ez egy nagyon sokat vitatott kérdés. Eldöntéséhez igazából statisztikai adatokra lenne szükség, de csak egy bolygót ismerünk, ahol az élet kialakult – a saját Földünket. Az optimista becslés szerint, ahol a kedvező feltételek megvannak, ott meg is jelenik az élet, tehát $f_l = 1$. A pesszimista feltételezés szerint ez egyáltalán nem biztos. Ezért f_l értéke igen tág határok közt mozoghat, 1 és akár 10^{-6} között is (24). Az élet kialakulásának valószínűsége egy olyan becslés, amihez a mai tudásunk kevés, de ami több nagyságrenddel befolyásolja a végeredményt.

f_i értelmes lények kialakulásának valószínűsége. Vajon mekkorának kellene becsülni ezt a számot? Optimista becslés szerint $f_i = 1$, mert az intelligencia előbb-utóbb kialakul. Az indoklás az, hogy az evolúció már négyszer kifejlesztette a repülni tudás komplex képességét a bogarak, a dinoszauruszok, a madarak majd, a denevérek esetében is. Viszont a dinoszauruszokból 170 millió év alatt sem fejlődött ki intelligens faj, de az emlősökből sem majd 60 millió éven keresztül. Az is lehetséges, hogy az f_i értéke igen csekély.

Az f_c -vel és L -lel, a civilizációk tulajdonságaira utaló számokkal ugyanez a probléma. Hogyan lehetne megbecsülni a technikai civilizációk kialakulásának f_c esélyét? Mekkora lehet a civilizációk L élettartama, mi lenne egy reális szám?

Habár az egyenlet elején található 3 szám eléggé egzaktul meghatározható, az utolsó négyet már csak igen merész becslésekkel tudjuk közelíteni. Az Drake-egyenletre sajnos nem alkalmazható a Fermi-problémák módszere: ezzel jól meg lehet tippelni, hogy hány zongorahangoló lakik Chicagóban (2), de nem becsülhető meg elfogadható pontossággal egy olyan komplex problematika valószínűsége, mint a civilizációk száma a Galaxisban.

Egy esetből – a Földéből – nem lehet valószínűséget számolni, statisztikát alkotni. Ahelyett, hogy spekulatív becsléseket tennénk az f_c -re (technikai civilizáció valószínűsége) vagy L -re (civilizáció élettartama), célravezetőbb lenne egyből a létező civilizációk jelenlétére utaló nyomok után kutatni, „technológiai nyomaikat” keresni.

4. A civilizációk „technológiai nyomai” – a SETI és a Dyson-gömbök

Még ha a csillagközi utazások lehetetlenek is, a távoli civilizációk technológiai nyomait képesek lehetünk észlelni. Két ilyen nyomot kell megemlíteni – a távoli civilizációk rádiójeleit és a csillagászati méretű építményeket, az ún. Dyson-gömböket.

4.1. A SETI – Search for Extraterrestrial Intelligence

A SETI (a Search for Extraterrestrial Intelligence angol szavak rövidítése) azon az elgondoláson alapszik, hogy a távoli civilizációk tevékenységét a legkönnyebben az általuk kibocsátott rádióhullámokon keresztül lehetne észlelni, mivel a rádiótávcsövek hatalmasra építhető felületük miatt sokszorosan érzékenyebbek a hagyományos távcsöveknél. Példa erre az Arecibo Observatórium 305 m átmérőjű rádiótávcsöve, vagy az orosz RATAN 600, 576 m átmérővel. A legnagyobb forgatható rádiótávcsövek a Green-Bank-Observatóriumban és a Németországi Effelsbergben találhatóak, kb. 7850 m²-es reflektorfelülettel.



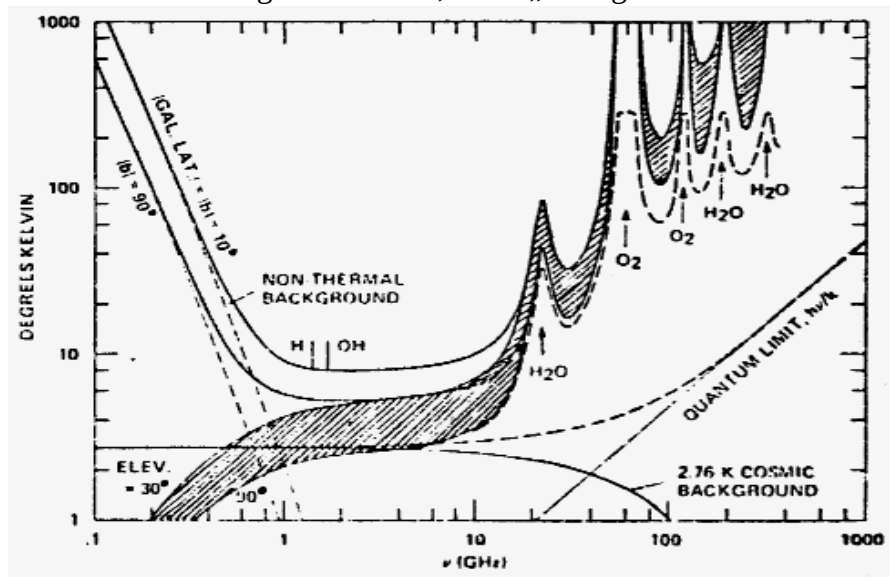
1. ábra. A 305 m átmérőjű areciboi rádiótávcső egy egész völgyet kitölt.
(<http://www.amusingplanet.com/2010/03/arecibo-observatory-of-seti-project.html>)

A rádiótávcsövek hihetetlen érzékenységére jellemző, hogy ha két areciboi méretű rádiótávcsövet egymással szemben állítanánk fel, azok 200 000 fényévről is érzékelni tudnák

egymást jeleit – tehát elvileg a galaxis két széléről is tudnának egymással kommunikálni (4).

Az idegen civilizációk rádióhullámait figyelni tehát jó elgondolásnak tűnik, de két probléma is adódik: 1. nem tudjuk, hogy milyen frekvenciát figyeljünk és 2. nem tudjuk hogy milyen irányban keressünk...?

Az elsőre 1959-ben született egy elvi megoldás: két csillagász, G. Cocconi és Ph. Morrison a Nature-ban megjelent cikkben amellet érveltek, hogy az idegen civilizációkkal a hidrogén 1420 MHz-es rádiósugárzásán a legcélszerűbb kommunikálni. Az úrból jövő sugárzásban van egy ún. „hidrogén-vízablak”, itt kevés a természetes sugárzás és az atmoszféra is jól átereszt ezen a frekvencián. Ha egy távoli civilizáció annyira fejlett, hogy csillagközi kommunikációban gondolkozzon, ezt a „hidrogén-vízablak”-ot ismerniük kell.



2. ábra. Cocconi és Morrison által javasolt H „víz-ablak” 1420 Mhz-en.

(<http://www.xenology.info/Xeno/24.2.2.htm>)

A második probléma – az, hogy milyen irányba figyeljünk, már jóval bonyolultabb. Ehhez tudni kellene azt, hogy mely csillagoknak van bolygórendszerük és azok közt van-e Föld típusú a lakható zónában? Ha igen, van-e rajtuk víz és élet? Az 1960-as években a csillagászat még nagyon távol állt az exobolygók detektálásától. Ezért a SETI kutatói két rádiósugárzást figyelő módszer is használnak: a) teljes-ég felderítés és b) célzott kutatások.

Az első jelentős kísérlet Földön kívüli rádióüzenetek vételére, az OZMA Project, Frank Drake nevéhez fűződik. Ő 1960-ban a Green Bank Observatórium 25 m-es rádió-távcsövével végzett megfigyeléseket az 1420 MHz-es frekvencián. Két közeli, a Naphoz hasonló csillagot céloztak meg: az Epsilon Eridanit és a Tau Cetit (5). Sajnos egyik irányából sem voltak detektálhatóak rádióhullámok.

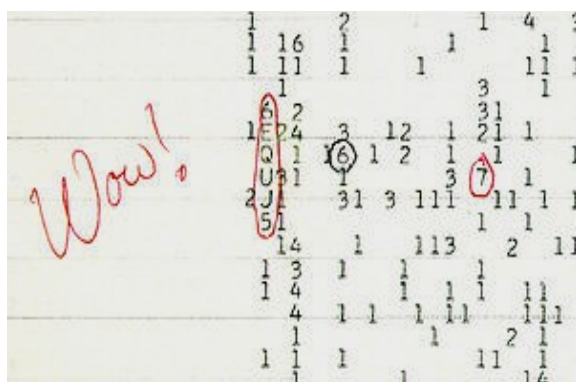
A célzott SETI-kutatások olyan csillagokra irányulnak, melyeknek nagy valószínűséggel vannak földszerű bolygói. 1973–76 között, az OZMA II Project keretében 674 napközeli csillagot vizsgáltak meg. Jelenleg a Naphoz hasonló metallicitású, G és K színképosztályú csillagok jelentik a célpontot. A SETI új megfigyelési listáján kb. 17000 célpont van kijelölve, a Naphoz közeli (≈ 140 parsec) és 3×10^9 évnél nem fiatalabb csillag (6).

A SETI kutatásokat sok kritika érte és éri. A legfontosabbak: A) az egész program kivitelezhetetlen, mert olyan véletlen eseményt próbálnak elcsípni „egy hatalmas kozmikus szénakazalban”, amely talán be sem következik: kis valószínűsége van annak, hogy egy távoli civilizáció pont felénk, hatalmas időintervallumon keresztül jeleket sugározzon, pusztán csak azért, hátha valaki meghallja... B) ha a távoli civilizációk irányítatlan jeleket küldenének szerte a világűrbe, akkor ez olyan hatalmas „energiaszámlát” igényelne, melyet nem érdemes hosszú évszázadokon, évezredekken keresztül vállalni. C) Nem biztos, hogy a

jelküldők számára ismert, hogy a földi atmoszféra rendelkezik egy „hidrogén-vízablakkal”, ezért más frekvencián sugároznak... Jó pár komoly érv létezik tehát, amely az ellen szól, hogy a távoli civilizációk rádiójeleket küldenének a Föld felé.

Úgy tűnik, az a módszer, hogy idegen civilizációk rádiójelei után kutassunk, a nagyobb távcsőérzékenység ellenére sem egyszerűbb, mint az, hogy optikai távcsövekkel keressünk olyan bolygókat, ahol élet lehetséges. Célzott, nekünk szánt üzenet híján csak igen gyenge rádiójelekre számíthatunk és ez jócskán lecsökkenti a rádiótávcsövek érzékenységi előnyét.

Ezt szinte igazolandó, a SETI kutatásai mindmáig nem hoztak kézzelfogható eredményt – egy kivételtől eltekintve, amely azonban csak fél eredmény. Ez a nevezetes „WOW” jel, melyet 1977 augusztusában a Nyilas csillagkép irányából, 72 mp-ig regisztráltak. Ezt az egyszeri, rövid jelet akkor nem tudták egy második megfigyeléssel igazolni – és azóta sem sikerült még egyszer hasonló jelet megfigyelni, sem a Nyilas csillagkép, sem más irányból.



3. ábra. Az 1420,4 MHz-en, a számok mellett a 72 s-os „6EQUJ5” jelsorozat.
(http://www.seti-germany.de/Wow/53_en_Information+about+WoW!-Signal.html)

4.2. A Dyson gömbök és szupercivilizációk

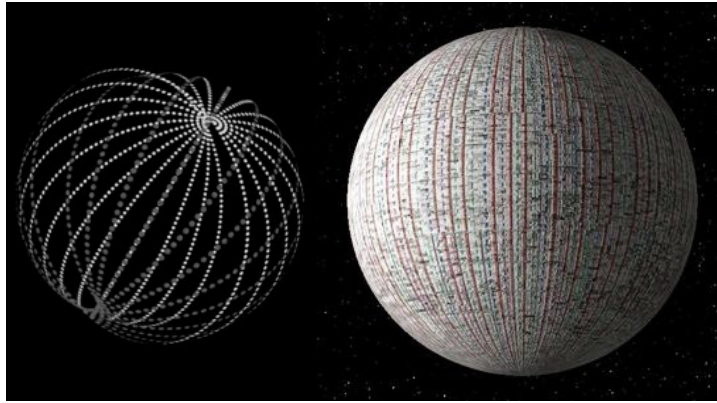
A Dyson-gömbök egy csillag köré épített hatalmas energiatermelő gömbök lennének. Elképzeljük Freeman Dyson angol fizikus, építőik – Nikolaj Kardasov szerint – a „szupercivilizációk” (2). Habár a szupercivilizációk fogalma sci-fiszzerűnek és ezért kevésbé tudományosnak tűnhet, Kardasov megállapítása az energiafogyasztásukról teljesen reális.

Kardasov abból az észrevételből indult ki, hogy az ipari forradalom óta az emberiség energiafogyasztása exponenciálisan nőtt. Ha ez le is csökken, de a növekedés megmarad évi kb. 1%-nál, akkor 3000 éven belül az energiafogyasztás $(1+0,01)^{3000} = 9200\ 000\ 000\ 000$ azaz kb. 9200 Mrd-szorosára nőne – az emberiségnek a Nap egész kisugárzott energiájára szüksége lenne!!! Tehát – Kardasov gondolatmenete szerint – a civilizációk fejlettségének egyik fő jellemzője az energiafogyasztásuk. Eszerint 3 típusba sorolta őket:

- I. típusú civilizáció: az egész bolygója energiáját hasznosítja
- II. típusú civilizáció: a saját csillagjának egész energiáját hasznosítja
- III. típusú civilizáció: a saját galaxisának teljes energiáját hasznosítja?

Kardasov a II. és III. típusokat szupercivilizációknak nevezte el – fejlettségük a mai gondolkodás számára nehezen elképzelhető, energiaigényük hatalmas (5).

Freeman Dyson ezt a gondolatmenetet folytatta, a következőképpen. Belátható, hogy a nagyon fejlett civilizációk az energiaszükségletük fedezésére a napjukat először gyűrű alakban elhelyezett napelemekkel kell körbevegyék. Majd, ahogy ez az energiamennyiség sem lesz elegendő, a napjukat szép lassan körbeépítik, úgy, hogy a csillag egy zárt gömb belsejébe kerül. Így fény már nem jut ki – de a gömb valamennyire fel fog melegedni és infravörösben látható lesz. Dyson szerint az ilyen gömbök infravörös sugárzása szupercivilizációk jele lenne.



4. ábra. Dyson-gyűrűk és Dyson-gömb. (http://en.wikipedia.org/wiki/Dyson_sphere)

Érdekes megemlíteni, hogy bármennyire fantasztikusnak tűnik, de léteztek próbálkozások a Dyson-gömbök vagy más hatalmas építmény kimutatására, amelyek II-es vagy III-as típusú civilizáció jelenlétére utalna. Sajnos ezek a kutatások sem vezettek eredményre. A Fermilab gondozásában viszont mindmáig létezik egy, a Dyson-gömbök keresésére létrehozott program (7).

5. A Drake-egyenlet pontosítása – a „Ritka Föld”-hipotézis

A Drake-egyenlet több mint 50 éve született, de az évek alatt a csillagászati, planetológiai, geológiai ismereteink sokat gyarapodtak. Azóta az egyenlet folyamatos pontosításokkal egészült ki. Egyrészt új faktorok beemelésével, másrészt az igen tág határok közt mozgó paraméterek értékeinek pontosításával. A legsokoldalúbb pontosítás jelenleg az ún. „Ritka Föld”-hipotézis (24). Ennek végkövetkeztetése az, hogy a komplex életet hordozni képes bolygók száma jóval kisebb, mint amekkorának eddig becsültük. Ezért civilizációból is jóval kevesebb van, melyek így túl távoliak – ez lehet a Fermi paradoxon megoldása.

Fermi, majd Drake a Galaxisban létező civilizációk számát úgy becsülte meg, hogy a nem ismert paraméterekre egy „től...-ig” számértéket adott. Hallgatólagosan a kopernikuszi közepszerűség elvéből indultak ki – abból, hogy a Föld nem a világegyetem középpontja és semmilyen más szempontból sincs kitüntetett helyzetben – az élet szempontjából sem. Azt feltételezték, hogy ha az élet megjelenéséhez szükséges feltételek valahol megvannak, az élet ott szükségszerűen ki is fog alakulni és valószínűleg eljut a technikai civilizációk szintjére.

Ezt a hallgatólagos közepszerűség elvét kérdőjelezte meg P. Ward és D. Brownlee. Elfogadták azt, hogy valószínűleg a csillagok keletkezésével együtt egy bolygórendszer is kialakul. De számos más tényezőt is figyelembe vettek – úgymint: galaktikus lakható zóna, nagy hold, vagy lemeztectonika, melyek szükségesek ahhoz, hogy egy bolygó ne csak egy kőszivattyú maradjon. A következő csillagászati, geológiai és planetológiai kritériumokat találták biogenezis szempontjából meghatározónak, melyek miatt a Föld egy ritka bolygó.

5.1. Galaktikus lakható zóna

A galaktikus lakható zóna fogalmának kialakítása szorosan köthető a „Ritka Föld”-hipotézis szerzőihez, D. Brownlee asztronómus és P. Ward planetológus nevéhez (23).

A „Ritka Föld”-hipotézis szerint nem alkalmas az egész Galaxis arra, hogy benne komplex élet mindenütt kialakuljon és fenn is maradjon. A galaxis széleinél csökkent szupernóva-aktivitás van, ezért a csillagok metallicitása alacsony, a központban viszont túl erős a szupernóva-aktivitás, ez elpusztítja az élő szervezeteket.

Egy csillagnak és bolygónak a közepesnél magasabb metallicitásúnak kell lennie ahhoz, hogy a komplexebb élőlények által hasznosított magasabb rendszámú elemek (Co, Se) is jelen legyenek. Figyelembe véve még azt is, hogy elegendő mennyiségű urán is kell ahhoz, hogy egy bolygó magjának a kihűlését több milliárd éven keresztül megakadályozza, csak a magas metallicitású csillagok bolygói lehet hosszasan evolúció, és így komplex élet.

A Galaxis periferiáján kis metallicitású csillagok vannak – ez nem alkalmas hely az élet számára. Ezzel szemben, a Galaxis központjában túl gyakori a szupernóva-aktivitás. Egy szupernóvarobbanás gammasugárzása akár 30 fényév távolságból is elpusztíthatja egy bolygó élővilágát. Itt a neutroncsillagok röntgensugárzása is gyilkos hatású, ezért a centrális zóna sem alkalmas hely. Az élet számára valahol a centrum és a periféria közt van lehetőség.

A galaktikus lakható zóna mérete nehezen becsülhető meg, a galaxis központjától kb. 10 000 és 29 000 fényév közötti sávban helyezkedhet el (23). A mi Napunk pont jó helyen, a központtól 25 000 fényévre van. A szerzők a Galaxis csillagainak kb. 10%-át tartják a galaktikus lakható zónához tartozónak.

5.2. A központi csillag tulajdonságai

Színképosztály. Egy életet hordozni képes bolygó központi csillaga nem tartozhat minden spektrális osztályba. A kék óriások túl rövid idő alatt égetik el az üzemanyagukat, majd szupernóvává válva felrobbannak.

A vörös törpék élettciklusa jelentősen hosszabb mint a Napé. De mivel kisebb az energiakisugárzásuk, a lakható zónájuk a csillaghoz túl közel van. Olyan közel, hogy az árapály-jelenség miatt a vörös törpék lakható zónájában keringő bolygók kötött tengelyforgásúak (tidally locked) lesznek. Egy ilyen exobolygónak a napja felőli oldala túl meleg, a másik oldala meg túl hideg – mint pl. a Merkúr esetében. Tehát vörös törpék körüli bolygón bakteriális élet talán, de komplex élet valószínűleg nem alakulhat ki.

A rövid életű kék óriások mellett a vörös törpék is kizárhatóak az alkalmas csillagok közül. A legesélyesebbek élet hordozására a G és K osztályú törpék bolygói. Ezek a Galaxis csillagainak kb. 9% -át teszik ki.

Kettős csillagok. Még egy nagy számarányt képviselő csillagtípus kiesik az alkalmassági listáról: a kettős csillagok. A Galaxis csillagainak 60-70%-a kettőscsillag. Noha a fantasztikus filmekben láthatóak olyan lakott bolygók, melyeknek két napjuk van, a jelenlegi tudásunk szerint ez igen valószínűtlen. Az ilyen kettős rendszerekben keringő bolygónak a pályája kaotikus. És még ha speciális esetben benn is maradnak a rendszerben (26), hol belekerülnek, hol meg kikerülnek a lakható zónából. Mikrobiális élet talán létezhet az ilyen bolygókon, de komplex élethez sokkal nagyobb pályastabilitás szükséges.

Metallicitás. A csillag metallicitása egy nagyon fontos jellemző. Egy bolygó mágneses terének nagyon fontos szerepe van, az atmoszféra napszélről való védelmét biztosítja – ezáltal lehetővé teszi a komplex élet fejlődését. Csak egy folyékony vasmagban keletkeznek olyan örvények, melyek létrehozzák egy kőzetbolygóbolygó mágneses terét. A folyékony vasmagot évmilliárdokon keresztül olvadtan tartani csak a radioaktív elemek, mint az urán vagy a tórium képesek. Az ilyen magas rendszámú elemek – a legújabb kutatások szerint (25) – akkor keletkeznek, mikor két egymás körül keringő neutroncsillag folyamatosan közeledve összeütközik és a robbanásuk gammafelvillanást (GRB) okoz.

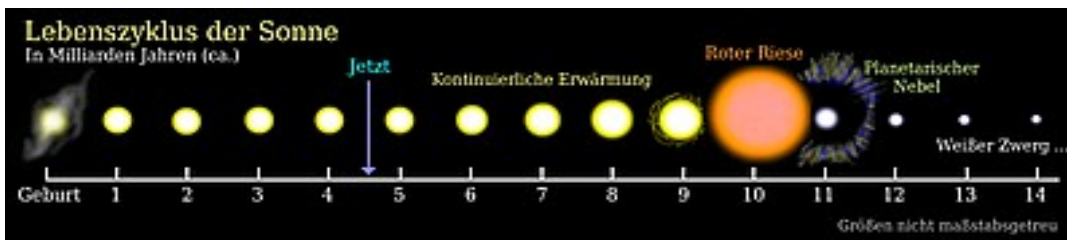
Egy Ward és Brownlee által idézett tanulmány szerint, szűkebb környezetének 174 napja közül a mi Napunk az egyik legmagasabb metallicitású csillag. A kopernikuszi elv, hogy a Naprendszerünk egy nagyon is közepes átlagot képvisel, itt sérülni látszik.

5.3. Nagyon keskeny lakható zóna

A „Ritka Föld” hipotézis szerint a lakható zóna sávjának szélessége jóval keskenyebb,

mint azt eddig gondoltuk. A hatalmas különbség a Föld és a Mars, illetve a Föld és a Vénusz között jól mutatják, hogy milyen fontos a megfelelő hőmérséklet az élet szempontjából.

Vannak olyan számítások, hogy a Földet jelenleg érő sugárzási energiában $\pm 5\%$ változás a megengedett. Ha ezt átszámoljuk távolságra, az $\pm 3\%$ Nap-Föld távolságmódosulást jelent. Tehát egy bolygónak nagyon pontosan meghatározott zónában kell tartózkodnia ahhoz, hogy a komplex élet hosszú távon, optimálisan fejlődhessen.



5. ábra. A Nap életrajza – nyílal jelölve a jelenlegi állapotot 4,5 milliárd évnél.
(Forrás: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonne>)

Az optimális hőmérséklet miatt a lakható zóna határait még szűkebben kellene meghatározni, ha nem létezne a lemeztektonika hőmérsékletszabályozó hatása (l. 5.7. alatt).

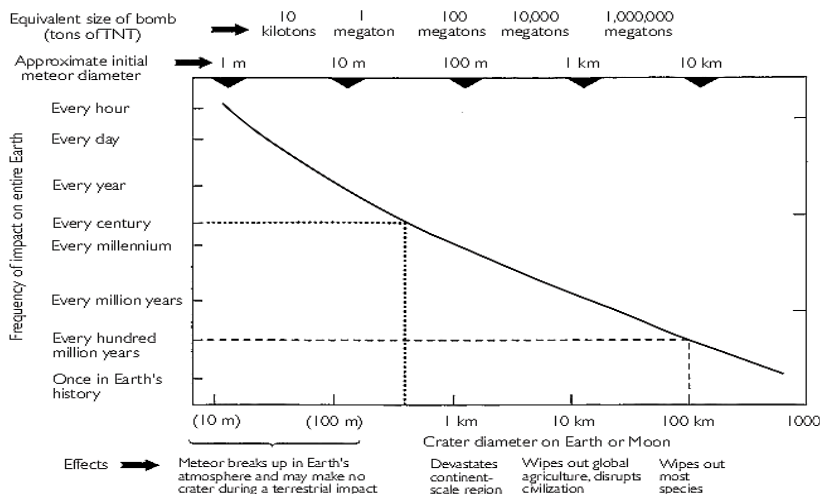
5.4. A bolygórendszer struktúrája, felépítése

Ward és Brownlee szerint ahhoz, hogy egy bolygórendszernek életet hordozó bolygója lehessen, többé-kevésbé a Naprendszerre kell hasonlítania:

A) a bolygók pályája nagyjából kör alakú kell legyen és stabilizáló rezonanciában kell lenniük egymással, hogy évmilliárdokra stabil pályákat foglaljanak el.

B) a vas-szilikát bolygóknak a belső zónában, a gázóriásoknak meg a külső zónákban kell elhelyezkedniük. Ezek hatalmas gravitációjukkal fel kellene fogják a külső övezetekből néha-néha befelé vándorló üstökösök legnagyobb részét, megvédve a belső bolygókat a pusztítóan nagy becsapódásoktól.

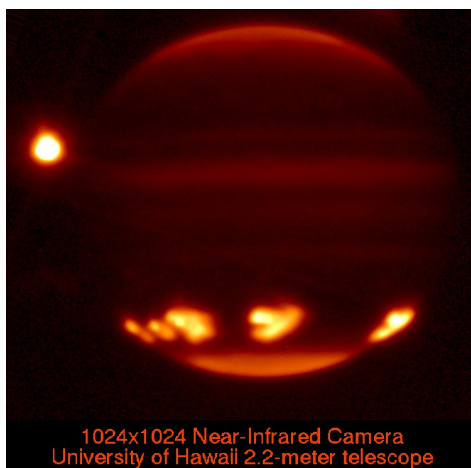
A Föld történetében nyolc jelentős, nagyjából százmillió évente megismétlődő, tömeges kihalás mutatható ki. Ezek közül több kihalás okozója egy nagyméretű, kb. 10 km-nél nagyobb meteor volt. Az alábbi, 7. ábrán az látható, hogy mekkora meteor milyen statisztikai gyakorisággal találja el a Földet. A kihalások periódusa közelítőleg egyezik az óriás, 10 km átmérő feletti meteorok becsapódási periódusával.



7. ábra. Összefüggés a meteorbecsapódások kráter-mérete és gyakorisága közt (24).

A Jupiter nagyságú gázbolygók jelenléte az ilyen becsapódások valószínűségét csökkenti le kb. egy 10-es nagyságrenddel. Az eddigi kb. 3,2-3,5 milliárd éves története során a földi élet elkerült egy olyan méretű becsapódást, amely minden életformát megsemmisített volna – valószínűleg éppen az óriás gázbolygóknak köszönhetően.

A gázóriások védő hatását modellező számításokat más-más paraméterekkel többször megismételték. A következtetések ma már nem tűnnek annyira egyértelműnek – így ez az állítás a Rare Earth hipotézis egyik gyenge láncszeme.



8. ábra. A Jupiter mint védőernyő. A Shoemaker-Levy üstökös becsapódásának nyomai a Jupiteren. (<http://www.ifa.hawaii.edu/images/sl9/>)

5.5. Kellő mennyiségű víz egy bolygón

Egy minimális mennyiségű víz és ennek a víznek egy víz-körforgásban való részvétele ugyancsak szükséges feltétele az életnek. A vízgőz az egyik legerősebb üvegház hatású gáz, a szerepe fontosabb a CO₂-nél is, az egész üvegházhatás 60-70%-áért felelős. Üvegházhatás nélkül pedig a Földön kb. -18 fokos hőmérséklet uralkodna (22).

A Vénuszon például nincs annyi víz, ami egy víz-körforgásban részt vehetne – így az felgyülemlik az atmoszférában és igen magas hőmérsékletet okoz.

Ha egy bolygón túl sok víz van, mely egy az egész felszínt beborító, több tíz km mély óceánt hoz létre, mint pl. a Jupiter holdján, az Európán, akkor ez szintén gátja lehet a magasabb rendű élet kialakulásának.

Egy technikai civilizációnak alapvető technológiája a tűz, mely alapfeltétele a fémek olvasztásának, a szerszámkészítésnek, energetikának, stb. Ám vizes környezetben nincs tűz. Ugyancsak a technikai civilizációk fejlődéséhez szükséges az elektromosság is – pl. éppen a rádióüzenetek küldéséhez. Az óceánok mélyén ez a technológia sem fejleszthető ki.

5.6. Egy nagy hold jelenléte és a ferde forgástengely

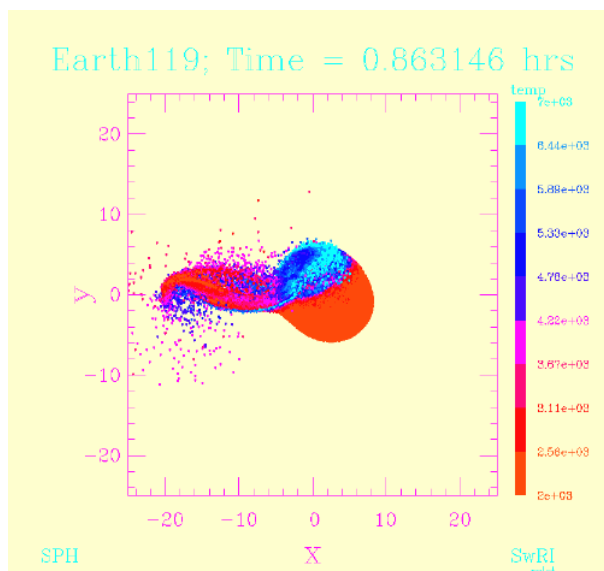
A „Ritka Föld”-hipotézis szerint egy nagyméretű Hold jelenléte alapvető fontosságú a földi élet kialakulása szempontjából, mivel a Holdnak meghatározó szerepe van a Föld forgástengelyének stabilizálásában.

A Jupiter gravitációjának hatására a Föld tengelye kaotikusan változtatná dőlésszögét. Egy 54 fokos dőlésszög felett a sarkok több napsugarat kapnának, mint az egyenlítői övezetek. De 9-10 foknál kisebb dőlésszögnél viszont a sarkok állandóan fagyott állapotban lennének, az egyenlítő zónája meg sokkalta forróbb és szárazabb lenne a mainál.

A forgástengely dőlésszögének kaotikus változása megakadályozna egy több tízmillió éven keresztül folyó fajfejlődést, gátolná az egész evolúciót. Ezért a komplex élet

kifejlődéséhez elengedhetetlennek tűnik egy nagy hold jelenléte.

A Hold kialakulása – ha mai ismereteink helyesek – egy nagyon kis valószínűséggel bekövetkező esemény. A Hold valószínűleg a korai Föld és egy Mars nagyságú bolygó – nem hivatalos nevén Theia – *nem centrális irányú* ütközéséből keletkezett. Az ütköző bolygók vasmagja egyesült, de a külső kőzetburok egy része leszakadt. Számítógépes szimulációk szerint a leszakadt anyagmennyiség egy része visszajutott a Földre, a többi törmelék relatíve rövid idő alatt (kb. 1000 év) a mai Holddá állt össze (22).



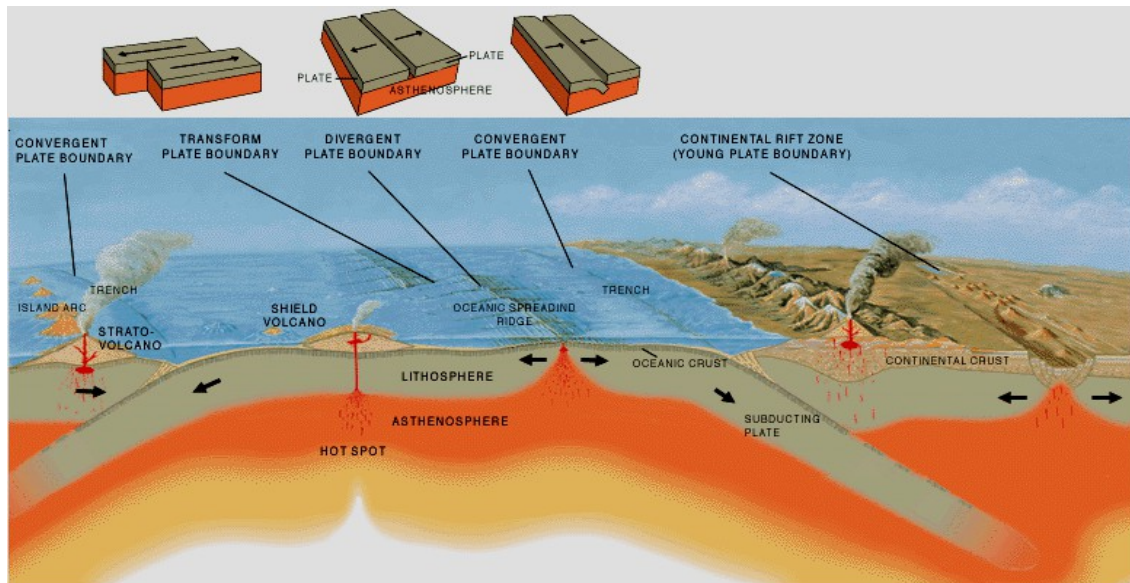
9. ábra. A korai Föld és a Mars nagyságú Theia ütközése (számítógépes szimuláció).
(http://withfriendship.com/user/crook/giant_impact_hypothesis.php)

A bolygórendszerek kialakulásának korai fázisában nagy valószínűséggel történnek ütközések, mivel a kezdeti bolygócsírák ütközések sorozatán keresztül nőnek egyre nagyobb bolygókká. Tehát valószínű, hogy a Mars és a korai Föld nagyságú protobolygók ütközése nem túl különleges esemény. Nem maga az ütközés az igen ritka esemény, hanem az, hogy ez egy olyan súroló típusú ütközés legyen, ami egy nagy Hold keletkezését eredményezi.

5.7. Lemeztektonika – a vulkánok és a szén körforgása

A lemeztektonika nagyon jelentős eleme a földi klíma stabilizálásának, olyan mint egy „globális termosztát”. Hatására az atmoszféra hőmérséklete évmilliárdokon keresztül egy relatív konstans érték körül stabilizálódik. A vulkanikus aktivitás folyamatosan szén (CO_2) juttat a légkörbe, ami pótolja a fosszilis folyamatok által kivont és az ún. „széntározókban” elraktározott szén (szén-karbonát ciklus). A szén-dioxid üvegház hatású gáz, ha hideg van a bolygón és kicsi a fosszilis szénkivonás – mennyisége megnő és felmelegedést okoz. Fordított irányba is működik a globális termosztát: ha magas a légkörben a szén-dioxid aránya és emiatt meleg van, fokozódnak a fosszilis folyamatok és kivonják a szén.

A geológiai bizonyítékok (gleccserek jelenléte az egyenlítőnél) azt mutatják, hogy a Föld történetében legalább kétszer volt olyan nagy globális eljegesedés (Snowball Earth), aminek eredményeképpen az óceánok teljesen – vagy majdnem teljesen – befagytak. Az ilyen globális eljegesedés egy önerősítő folyamat, mivel az albedó növekedésével egyre több napsugárzás verődik vissza a világűrbe. Ezeket a folyamatokat, mai tudásunk szerint, a vulkanizmus állította le. A vulkánkitörések hatására az atmoszférában felszaporodott a szén-dioxid, ami üvegházhatást – és ezáltal felmelegedést okozott. A „globális termosztát” kifejezés erre a folyamatra vonatkozik.



10. ábra. A lemeztectonikai folyamatok – a szén elsüllyesztése és felszínre kerülése. (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geophys/platemt.html>)

A lemeztectonika eredménye folytán alakulnak ki a szárazföldek és a kontinensek is. Ennek hatására a kontinensek a kezdeti 5%-ról 30%-ra növelték arányukat a Föld felszínén. A kontinensek és az óceánok találkozásánál kialakuló sekély vizek a komplex életformák fejlődését segítik elő. Az, hogy egy bolygón szárazföldek is kell létezzenek az óceánok mellett további fontos kritériuma a komplex életformák fejlődésének (l. az előzőekben az 5.5. fejezetben).

A lemeztectonika létrejöttének és fennmaradásának a feltétele egy kellő nagyságú bolygó, mely megtartja a belső hőmérsékletét és a veszteségeket pótolja a magban található, természetesen szabályozott atomreaktorral.

5.8. A „Ritka Föld”-egyenlet

A fenti megfontolások összefoglalásaként, a Drake-egyenlet mintájára Ward és Brownlee megalkották a „Rare Earth”-egyenletet:

$$N = N^* \times n_e \times f_g \times f_p \times f_{pm} \times f_i \times f_c \times f_l \times f_m \times f_j \times f_{me} \text{ ahol:}$$

N^* – a Galaxis megfelelő csillagainak a száma.

n_e – bolygók átlagos száma, melyek egy csillag lakható zónájában találhatóak

f_g – a galaktikus lakható zóna csillagainak a százalékaránya

f_p – a bolygóval rendelkező csillagok százalékaránya

f_{pm} – a vas-szilikát bolygók százalékaránya

f_i – azon lakható bolygók aránya, melyeken mikroorganizmusok keletkeztek

f_c – azon bolygók aránya, melyen komplex élet fejlődött ki

f_l – komplex élet létezésének időtartama arányítva az egész bolygó életidejéhez

f_m – óriásholddal rendelkező bolygók aránya

f_j – Jupiter-szerű gázóriással rendelkező bolygórendszerek aránya

f_{me} – kis kihalási valószínűségű bolygók aránya

Az egyes paraméterekhez tartozó számok a jelenlegi ismereteink szerint a következők:

N^* – Ez a megfelelő csillagok száma. Ezt a számot a szerzők kb. $9 \times 0,3 = 2,7\%$ -ban látják reálisnak (9% a G, K csillagok aránya, 0,3 a kettőscsillagok előfordulási aránya)

n_e – A szerzők ezt 1-nek veszik, a lakható zóna nagyon keskeny volta miatt csak egy bolygó keringhet optimális távolságban.

f_g – A galaktikus lakható zóna csillagszám-aránya. Ezt a számot nehezen lehet pontosan megbecsülni, de a 10% reálisnak látszik.

f_p – A bolygóval rendelkező csillagok százalékaránya. A könyv írásakor az volt a vélemény, hogy kb. 5-6% a bolygóval rendelkező csillagok aránya. Ma már úgy tudjuk, hogy ez lehet több is, de viszont a 200-400 napos keringési periódusú bolygók száma is csak 5,7%. Szűkebb pálya esetén még kisebb (9).

f_{pm} – A vas-szilikát bolygók százalékaránya. Az ilyen típusú bolygók az igen magas metallicitású csillagokkal együtt jönnek létre.

f_i – Azon lakható bolygók aránya, melyen mikroorganizmusok keletkeztek. A szerzők itt az optimista álláspontot képviselik. Azt mondják, hogy az egyszerű élet kialakulása nem egy túl valószínűtlen folyamat.

f_c – Az olyan bolygók aránya, amelyeken komplex élet fejlődött ki. Mivel a földi élet a megjelenésétől eltelt idő csaknem 85%-ában nem hozott létre komplex életformákat, ezt a számot Wardék meglehetősen kicsinek becsülik.

f_l – A komplex élet létezésének időtartama arányítva az egész bolygó életidejéhez. Ez a szám nagyon vitatott, mert nem ismerjük a komplex élet időbeli hosszának az értékét – a Földi élet még nem halt ki. A bolygó életideje addig tart, míg a napja vörös óriássá válik.

f_m – Az óriás holddal rendelkező bolygók aránya. Ezt a számot a szerzők igen alacsonynak becsülik, mert szerintük kicsi a valószínűsége egy pont olyan szögű és méretű ütközésnek, ami óriás holdat eredményez.

f_j – Jupiter-szerű gázóriással rendelkező bolygórendszerek aránya. Ezt a számot nem feltétlen tartják kicsinek, még a nagyszámú forró Jupitereket figyelembe véve sem.

f_{me} – A kis kihalási valószínűségű bolygók aránya. A kihalási veszélyt a szerzőpáros nagy valószínűségűnek tartja, mert nem csak meteorbecsapódásoktól, de biológiai alapú kihalásveszélyektől is lehet tartani. Szerintük kész csoda, hogy az élet eddig megúszott minden kihaláshoz közeli katasztrófaeseményt. (Peter Ward eredetileg geológus és planetológus. A katasztrófák a „Ritka Föld”-hipotézis fontos részét képezik, de terjedelmi okokból ezek ismertetése nem megoldható.)

Ahogy a Drake-egyenletben, a „Ritka Föld”-egyenletben is igen sok a bizonytalanság. A biztos ismeretek hiányában a szerzőpáros a jelenlegi legjobb tudásuk szerint becsülik meg a fenti értékeket és mindig hangsúlyozzák azt is, hogy „nem tudhatjuk pontosan”. Tudományos eredményük az, hogy olyan fontos tényezőket tesznek vizsgálat tárgyává, amik felett a Drake-egyenlet átsiklik. Ezért az elemzésük tudományosan jóval megalapozottabb.

Ward és Brownlee végkövetkeztetése a következőképp foglalható össze: az egyszerű, mikroszkopikus élet gyakorisága a Galaxisunkban valószínűleg elég nagy, de a fejlett, komplexebb életformák (esetleg technikai civilizációk) száma, több kis valószínűségű tényező miatt nagyon kicsi.

5.9. A „Ritka Föld”-hipotézis és az újabb eredmények

Ward és Brownlee könyvének 2001-es megjelenése óta több mint 10 év telt el, ami elegendő idő volt arra, hogy újabb eredmények keletkezzenek a tematikában. Ezek közül a következőket kell megemlíteni, mert a rájuk adott válaszok megint több nagyságrenddel befolyásolhatják a földszerű bolygók előfordulását:

A) A „*Fiatal, halvány Nap*” *problematikája* – egyelőre nem ismerjük a pontos magyarázatot arra, hogy a 4,5 milliárd évvel ezelőtti, kb. 30%-kal halványabb, fiatal Nap hogyan tudta

felmelegíteni a Földet. A problémát nem magyarázza az akkor jóval magasabb szén-dioxid koncentráció sem (27).

B) *Hogy került a Földre pont ennyi víz?* A legrégebbi geológiai leletek Ausztráliában azt mutatják, hogy a Késői Nagy Bombázás előtt is voltak óceánok a Földön. A deutérium-izotóp arány is arra enged következtetni, hogy a földi víz nagy része az aszteroida-övezetből származik (28). Számítógépes modellek (16) viszont azt mutatják, hogy kis valószínűsége van annak, hogy onnan annyi víz szállítódott volna, amennyi a Földön van. Egy megfelelő szárazföld/óceán arány is feltétele a komplex szárazföldi életnek – egy a földinél jelentősen kevesebb vagy több vízmennyiség is hátrányos.

C) *Metallicitás.* Az igen magas metallicitás létrejött a galaktikus centrumtól távol. Egy kellően nagy metallicitású csillag, mint a mi Napunk egy gammavillanás pomaradványaiból kellett összesűrűsödjön (25), ehhez képest a Napunk elég távol van a Galaxis centrumától. Nem ismerjük tehát a centrumtól távol eső gammavillanások gyakoriságát. És azt sem tudjuk, hogy tulajdonképpen mekkora kell legyen egy csillag metallicitása, hogy legalább egy olyan kőzetbolygója is legyen, mely az olvadt maghoz elég radioaktív elemet tartalmaz.

6. Az exobolygó kutatás – távoli csillagok körüli bolygók keresése

6.1. Az exobolygó kutatás jelentősége

Az exobolygók a naprendszeren kívüli bolygók. Nevük, az „exoplanet”, az „extrasolar planet” angol szavak összevonásából jött létre, ennek magyar fordítása az exobolygó.

Nehéz megmondani, hogy miért ragadják meg annyira az emberek fantáziáját az idegen világok. Mindenesetre ha sikerülne egy, a Földhöz igazán hasonló exobolygót találni, az az évek óta tartó kutatások jelentős mérföldköve lenne. Ha több ilyen exobolygót találnánk, és ezek egyikén ráadásul az élet jelenlétére utaló oxigént is ki tudnánk mutatni, az az egész természettudomány hatalmas eredménye lenne. Ezzel eldönthető lenne egy fontos elméleti kérdés: vajon kialakul az élet máshol is, ahol kedvező feltételek vannak hozzá? Mert ha az élet könnyen kialakul, akkor jelentősen nagyobb számot kell adni az f_l értékének a Drake-egyenletben.

Azt szokták mondani, egy „második Föld” megtalálása az exobolygó kutatás Szent Grálja: minden bolygóvadász erről álmodik, de ez a cél eddig nagyon távolinak tűnt. A távoli cél most egy kicsit közelebb került: 2013. november 4-én a Berkeley Egyetemen bejelentették, hogy a Kepler űrtávcső adatainak statisztikai elemzésével egy már rég sejtett, de mégis szenzációgyanús eredmény született: a Naphoz hasonló csillagok 22,8%-ának van Földhöz hasonló méretű bolygója a lakható zónában (9). Úgy tűnik, a galaxisunk tele van bolygórendszerekkel és már csak a műszerek precizitásán múlik, hogy megtaláljunk egy második Földet.

6.2. Az exobolygók – túl távoliak ahhoz, hogy látszódnak

Az exobolygó kutatás nagyon fiatal ága a csillagászatnak. Bár a csillagászok feltételezték, hogy miként a mi naprendszerünk, úgy más csillagok is bolygóikkal együtt alakultak ki, de ez a feltételezés nem volt bizonyítható. A távoli csillagok bolygóit, mivel anyacsillaguk fényénél 10^6 -szor kisebb a fényességük, nem tartották kimutathatónak.

Hogy mégis észlelhessük őket, közvetett módszerekre van szükség. Otto von Struve már egy 1926-os cikkben javasolta a spektroszkópiai vöröseltolódás módszerét a csillagok forgásának mérésére (10). Később, 1950-ben ezt a módszert bolygórendszerekre is alkalmazhatónak vélte... Felvetésével akkor nem foglalkoztak.

1990-ben Michel Mayor a Haute Provence-i 1,93-méteres teleszkóphoz egy igen precíz

spektrométert csatolt. Majd 1995-ben, az 51 Pegasi csillagának megfigyelésekor furcsa, 4,2 napos periódusú ide-oda imbolygó mozgást figyelt meg. Ez a jelenség csak egy a csillaghoz közeli, kb. 0,5 Jupiter-tömegű óriásbolygó jelenlétével volt magyarázható. Az 51 Pegasi 50 fényévre van tőlünk. Ekkora távolságban, hagyományos módszerekkel esélytelen lett volna bármilyen bolygót is meglátni. De az „imbolygásán” keresztül, indirekt módszerrel már tudták észlelni. Ez volt az első bizonyítottan létező exobolygó.

6.3. Exobolygók észlelésének legfontosabb technikái

A következőkben az észlelési technikák alapelveinek bemutatása a cél, fizikatanárok részére, akik az exobolygókutatás segítségével kívánják felkelteni a diákok fizika iránti érdeklődését – részletes ismertetésére a dolgozat terjedelme nem elegendő.

6.3.1. A radiális sebességmérés módszere

A módszer elve az, hogy egy távolodó és közeledő csillag fénye a Doppler-effektusból származóan változást szenved.

$$\Delta\lambda = \lambda v / c$$

(ahol $\Delta\lambda$ a hullámhosszváltozás, λ a beeső fény hullámhossza, v a csillag távolodási/közeledési sebessége, c a fénysebesség)

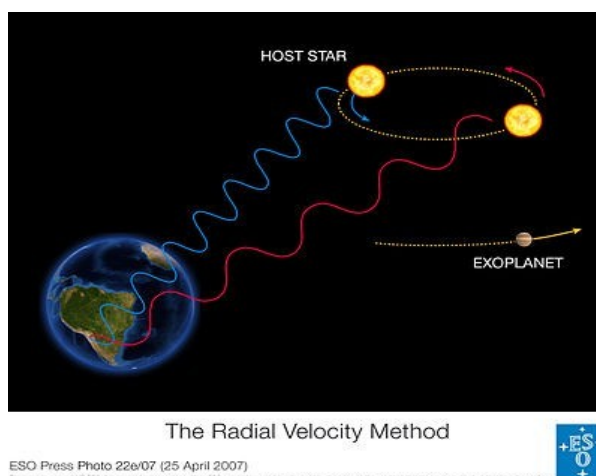
A bolygó, mikor a csillaga körül kering, tulajdonképpen a kettejük közös tömegközéppontja körül mozog – és ugyanígy a csillag is. Eközben egy körpályát ír le, melynek vannak felénk közeledő és távolodó szakaszai. Így keletkezik a csillag fényében a vörös -és a kékeltolódás, amit spektroszkóppal igen pontosan ki lehet mutatni (11. ábra).

A radiális sebesség módszerét használva Kepler harmadik törvényével kiszámítható az exobolygó tömege:

$$\frac{A_{\text{vrad}}^3 T}{2\pi\gamma} = \frac{m^3 \sin^3 \alpha}{(M+m)^2}$$

(ahol A_{vrad} = a sebesség-változás amplitúdója, T a keringési periódus, $\sin \alpha$ = a látóirány és a pályasík-normálisa közti szög, az m és M a bolygó, illetve a csillag tömege)

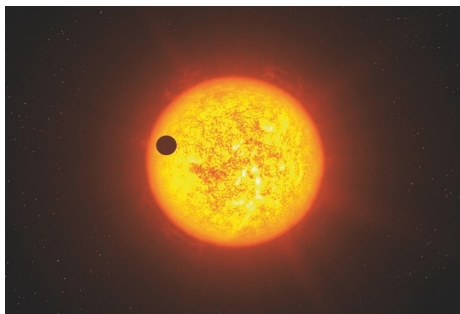
Michel Mayor spektroszkóppal az 51 Pegasi-nál egy 70 m/s-os eltérést mutatott ki. Spektroszkópja akkor egy 13 m/s sebességeltérést tudott kimutatni – a mai műszerek már ennél egy nagyságrenddel jobbak – az 1 m/s alatti tartományban is tudnak mérni.



11. ábra. A radiális sebességmérés elve. (<http://www.eso.org/public/unitedkingdom/images/eso0722e/>)

5.3.2. A tranzit (fotometriai) módszer

Ennek a módszernek az alapelve az, hogy amikor a bolygó a csillaga előtt elhalad, egy kis részt eltakar annak felületéből. Ezt a kis fényességváltozást tudjuk mérni. Jelentősége az, hogy az egyedüli módszer, mellyel a bolygók méretére tudunk következtetni.

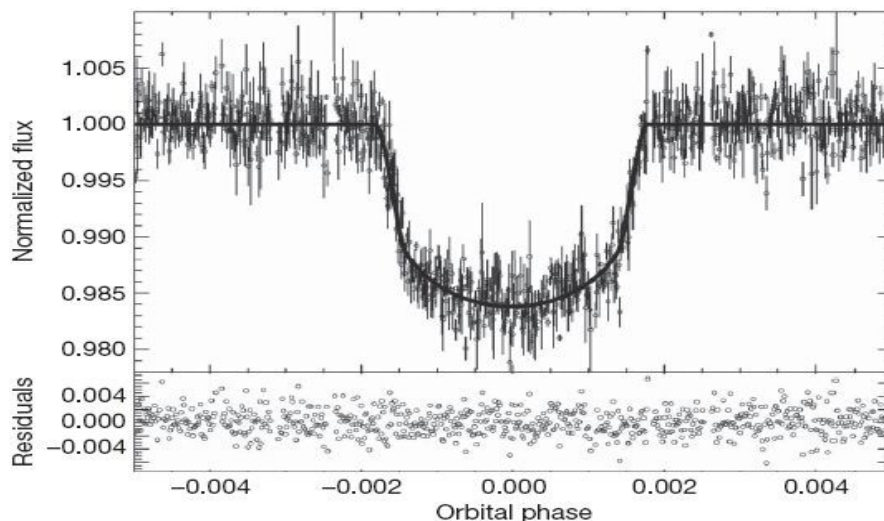


12. ábra. Egy bolygó tranzit közben. (<http://www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article6826885>)

A fényesség csökkenése attól függ, hogy a bolygó a csillag felületének mekkora részét takarja ki. A csillag I_{\min} takarás és I_{\max} takarás nélküli fényességének aránya egyenlő lesz a kitakarással csökkentett és az eredeti felület arányával:

$$\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{R_{csill}^2 - R_{bg}^2}{R_{csill}^2} = 1 - \frac{R_{bg}^2}{R_{csill}^2}$$

A fenti képlettel kiszámítható egy exobolygó átmérője, ha a csillaga átmérőjét egy más csillagászati módszerrel kiszámítjuk. Így például egy olyan hatalmas bolygó, mint a Jupiter, melynek átmérője a Napátmérő 1/10-e, takarásnál csak 1/100 fényességcsökkenést okoz.



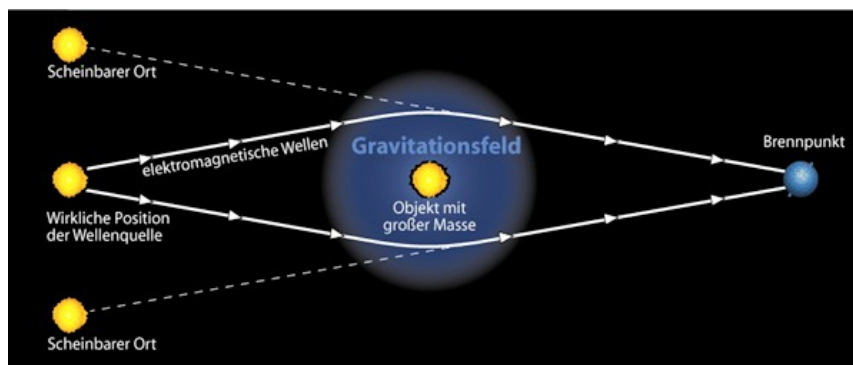
13. ábra. A CoRoT-9b jelű exobolygó fénygörbéje. (<http://csillagasz.blog.hu/>)

A CoRoT 9b exobolygó ábráján kb. 1,16%-os fényességcsökkenés olvasható le – tehát ez az exobolygó egy Jupiter nagyságú gázóriás lehet. A fénygörbe vizsgálatából több mindenre következtethetünk: a bolygó sugarának nagyságára a fényintenzitások arányából, de megfigyelhető a keringési periódus is két egymást követő takarás közötti időből.

A legtöbb exobolygót ezzel a módszerrel fedezték fel. A Hattyú csillagképben a Kepler űrtávcső kb. 150 000 csillagot figyelt meg és rövid idő alatt 2500 új exobolygó-jelöltet talált. A módszer hátránya, hogy – értelemszerűen – csak azokat a bolygókat tudja kimutatni, melyeknek a pályasíkja felénk néz.

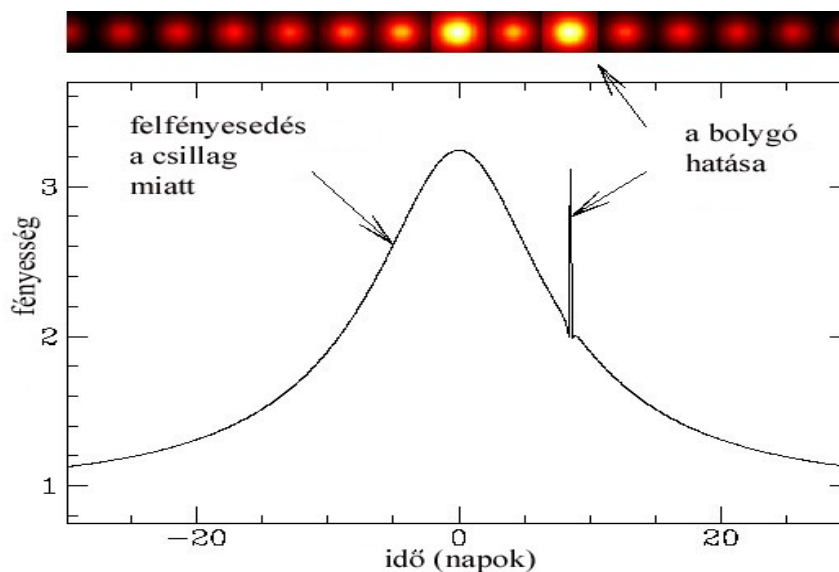
6.3.3. Gravitációs lencse hatás

Az Einstein-féle általános relativitáselmélet által megjósolt fényelhajlási jelenségen alapszik. Nagyon nagy tömegű testek a közelükben egyenes vonalban haladó fényt meggörbítik és ezáltal egy óriási lencseként működnek. A fény megfelelő meggörbítéséhez nagy tömeg kell, jó gravitációs lencsehatással fekete lyukak, galaxisok stb. bírnak.



14. ábra. Gravitációs lencse hatás alapelve. (<http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Gravitationslinse.gif>)

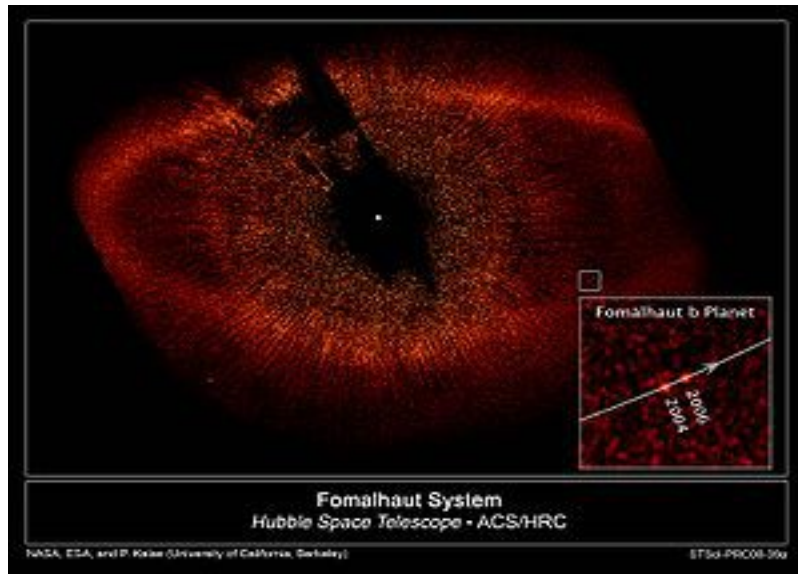
De egy kisebb bolygónak is lehet lencse-hatása: pl. ha egy lencsehatású csillag elfed egy háttércsillagot, annak felerősíti a fényét. Ha ezután a „lencséző csillag” egy exobolygója is áthalad a háttércsillag előtt, még egy rövid felfénylést fogunk észlelni (9. ábra). Maga a bolygó is gravitációs lencseként fog működni, ez a „gravitációs mikrolencse”-hatás.



15. ábra. A háttércsillag felfényesedése – gravitációs mikrolencse. (<http://www.matud.iif.hu/06aug/08.html>)

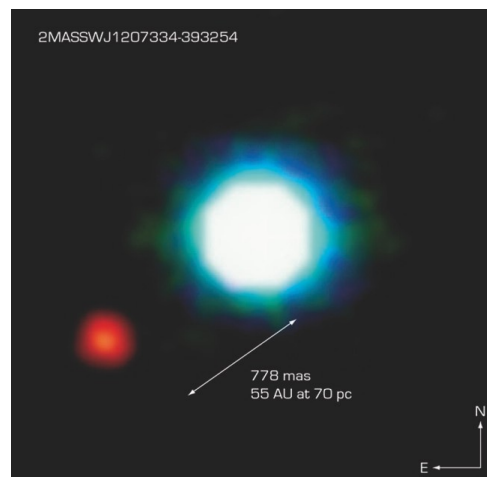
6.3.4. Közvetlen megfigyelés

Miután kiderült, hogy az exobolygók mégis megfigyelhetőek, sikerült módszert találni arra, hogy a távoli csillagok bolygóit speciális esetekben mégis láthassuk. Az infravörös tartományban a 10^6 fényesség-arány a csillag és bolygója közt már nem áll fenn – egyes forró bolygók elég erős jelet adhatnak, míg a csillagok hősugárzása már nem nyomja el annyira a bolygó infravörös fényét. Legszebb példa erre a Fomalhaut csillag (α Piscis Austrini) **Fomalhaut b** nevű exobolygója a 16. ábrán látható.



16.ábra. A Fomalhaut, törmelékkorong a Fomalhaut b-vel. Alul a bolygó két év alatti elmozdulása. (http://astrojourney.files.wordpress.com/2010/10/hs-2008-39-a-web_print.jpg)

Még ennél is megdöbbentőbb azonban egy 2004-es kép, ami a VLT 8,2 méteres Yepun nevű teleszkópjával készült az ESO Paranal hegyi csillagvizsgálójában, Chilében (11).



17. ábra. Az első tiszta exobolygó kép: 2M1207b. (<http://www.eso.org/public/news/eso0428/>)

Annak ellenére, hogy a fényessége miatt ez a „bolygó” akár egy barna törpecsillag is lehet, a kép egy 225 fényévnnyi távolságra levő csillagról készült!

6.4. Az exobolygó kutatás eredményei

6.4.1. Az exobolygó kutatás elméleti jelentőségű eredményei

Jelenleg (2014.04.30.) 1786 bizonyított exobolygót tartanak nyilván (12). Ehhez jön még hozzá a Kepler 3845 „exobolygó-jelöltje”, melyek létét más módszerrel is igazolni kell.

Az első exobolygó felfedezése önmagában is szenzáció volt. De csillagászati szempontból talán még meglepőbb volt, amit találtak: egy olyan bolygót, amelyhez hasonló a Naprendszerünkben nem is létezik – egy a napjához nagyon közeli, 4,2 nap periódusú „forró Jupitert”. Ezt jelenleg nem tudjuk jól magyarázni. Mai ismereteink szerint a gázóriások

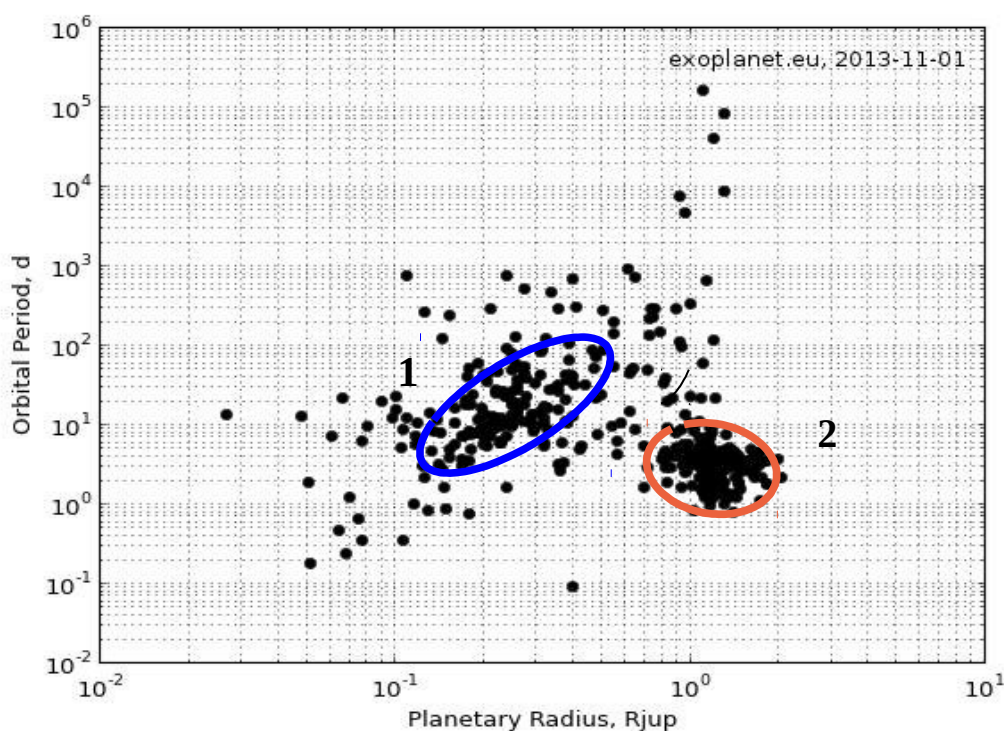
könnyű elemekből, a bolygórendszer külső részén alakulnak ki, míg a fém-szilikát bolygók a belső övezetekben.

Az exobolygó kutatásnak eddig két elméleti jelentőségű eredménye is van:

A) Bizonyítást nyert az a sejtés, hogy a galaxis csillagai körül a bolygók létezése nem kivétel, hanem általános szabály. Úgy tűnik, hogy a csillagképződés egyik alapvető tulajdonsága, hogy a napjukkal együtt a bolygórendszerek is kialakulnak.

B) A második eredmény viszont némileg meglepetés: a bolygók mérete, pályája sokkal változatosabb, mint azt a Naprendszer felépítése alapján gondoltuk volna. Vannak „szuperföldek” (kb. 2-10-szeres Föld-tömegű bolygók), „mini Neptunuszok”, csillagjukhoz közeli „forró Jupiteretek”. Ezen kívül sok, nagyon elnyúlt ellipszis pályájú bolygót is megfigyeltek.

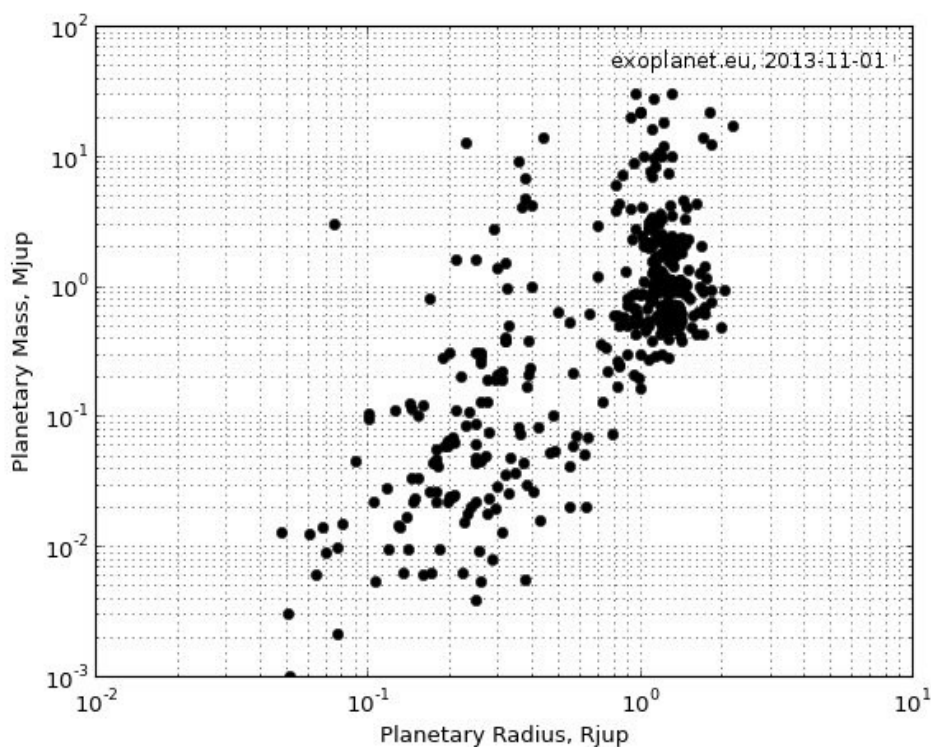
Meglepően magas az olyan Jupiter-szerű bolygók aránya, melyek olyan közel vannak a központi csillagjukhoz, ami a Naprendszerben elképzelhetetlen lenne. A 18. ábra diagramja jól mutatja a jelenséget. Van egy elszórt 1-es csoport 0,1-0,4 R_{jup} -átmérőjű, 3-80 nap keringési periódusú bolygókkal és jobbra lent egy sűrűbb 2-es csoport, 0,8-1,2 Jupiter-átmérővel és 1-10 nap keringési periódussal. Az 1-es a Neptunusz-szerű bolygók csoportja, csak sokkal belsőbb pályákon, a 2-es csoportot a Jupiter-szerű, napjukhoz nagyon közeli bolygók alkotják, ezek az ún. „forró Jupiteretek”.



18.ábra. Forró Jupiteretek, forró Neptunuszok. (<http://exoplanet.eu/diagrams>)

Felvetődik a kérdés: az exobolygók nagy része a „forró Jupiter” vagy „forró Neptunusz” családba tartozik? Valószínűleg nem, csak még rövid ideje figyeljük meg őket. A naprendszer gázóriásaihoz hasonló, pár tíz éves keringési idejű kísérők megtalálásához hosszú évekig kell gyűjteni az adatokat (14). Egy Neptunuszhoz hasonló pályán keringő exobolygó észleléséhez – igen hosszan – 165 évig kell megfigyelést végezni.

A 19. ábra átmérő/tömeg diagramjából kiszámítható a V/m – tehát az *exobolygók sűrűsége*. Jól látható itt is a Jupiter típusú bolygók csoportja a diagram (1,1) értékénél, de a nagyobb sűrűségű, kisebb bolygók szétszórt csoportja is.



19. ábra. Exobolygó átmérő és tömeg arányok. (<http://exoplanet.eu/diagrams>)

6.4.2. Exobolygó típusok

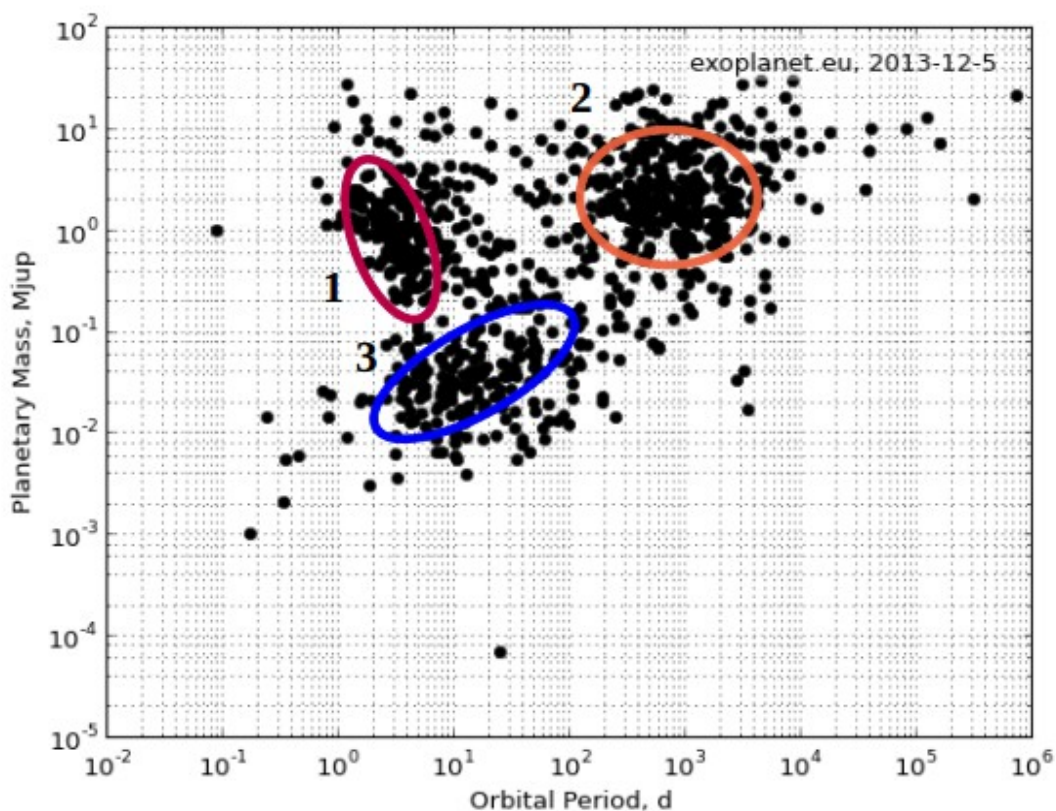
Az előző diagramokból az a következtetés vonható le, hogy az exobolygók mérete és pályája igen változatos. A Naprendszerünkben nem is létező bolygótípusok a távoli naprendszerekben gyakorinak tűnnek – olyannyira, hogy néhol egyenesen „exoplanet zoo”-ról, exobolygó állatkertről beszélnek. Az irodalom nem teljesen egységes az új típusok osztályozásában – talán mert az átmenet köztük eléggé folytonos. A következőkben bemutatunk pár kiemelhető típust (13).

„Forró” Jupiterek

Logaritmikus diagramon ez a legmarkánsabban elkülöníthető bolygótípus. A 18. ábrán a 2-es csoport a „forró Jupiterek” csoportja: 0,8-1,2 Jupiter-átmérőjű, 1-10 nap keringési idejű gázóriások. Legkönnyebben ezeket az exobolygókat tudjuk kimutatni: a nagy átmérő jelentős fedést okoz, nagy tömegük és közelségük miatt relatív nagy a v_{rad} változás.

A forró Jupiterek kialakulásáról csak sejtelmek vannak: feltételezhető, hogy a nagy tömegű gázóriások az ún. bolygó-migrációval kerülnek belsőbb pályákra, úgy, hogy a kialakulásuk során az anyagkorongban keringve lefékeződnek (14).

A migráció egy másik fajtája az, amikor a bolygók külső pályáról a pálya-rezonancia révén vándorolnak beljebb, a belsőbb bolygókat „kikapapultálva” a rendszerből. Az utóbbi időben talált magányos, nap nélküli bolygók (“free-floating planets”) nagy száma ezt látszik alátámasztani (15).



20. ábra. Exobolygók tömege és keringési periódusa. (<http://exoplanet.eu/diagrams>)

A 20. ábra egy keringési idő/bolygótömeg diagram. A forró Jupiterektől (1) jobbra a „normál” Jupiteretek (2) láthatóak. Egy harmadik csoportosulás is kivehető (3), a „forró Neptunuszok” ($0,1-0,05 M_{\text{jup}}$) és az ennél kisebb mini-Neptunuszok ($0,05-0,03 M_{\text{jup}}$) csoportja, lényegében egybeolvadva.

Forró Neptunuszok

A forró Neptunuszok jelenléte a távoli bolygórendszerekben kimondottan gyakori. Felépítésükben valószínűleg hasonlítanak a Naprendszer kis gázbolygóihoz. Ami meglepő bennük, az a „forróságuk”, az, hogy 2-80 napos keringési idejű pályákon tartózkodnak. Hogy hogyan kerültek olyan belső pályára, azt ugyanúgy csak sejteni lehet, mint a forró Jupiteretek esetében.

Mini-Neptunuszok

A 20. ábrán a 3-as csoportosulásban észlelhetők $0,05-0,03$ Jupiter-tömegnél ezek az ún. mini-Neptunuszok. Tömegük kb. 10 földtömeg és a Neptunusz tömege közé esik, és a sűrűségük alapján valószínűleg szilikát magot és sok vizet tartalmaznak.

Ezzel egybevágó eredményt kaptak még 2003-ban, a mini-Neptunuszok felfedezése előtt a Seattle-i egyetem csillagásza. Komputer-szimulációt készítettek a bolygórendszerek kialakulásának és fejlődésének tanulmányozására. Azt találták, hogy az 50 kaotikus eset több mint felében a belső pályán levő bolygók jóval több vizet kellene felhalmozzanak, mint azt a Naprendszerben tapasztaljuk. És a szimulációk finomítása után is ugyanerre az eredményre jutottak (16). A mini-Neptunuszok létezése jól illik ebbe a képbe. Elképzelhető, hogy a jövőben a víz jelenléte spektroszkópiai eszközökkel is igazolható lesz az ilyen exobolygókon, és nem csak egy sűrűségből levont feltételezés marad.

Szuperföldek

Az eddig talált exobolygók közt számos ún. „szuperföld” van. Tömegük kb. 2-10-szerese a Föld tömegének. Definíciójuk igen tág, általában mini-Neptunusznál kisebb bolygókat sorolnak ide. Az eddig felfedezett szuperföldek tömege 2,3-10,5 Föld-tömeg közt mozog. A Naprendszerünk nem tartalmaz ilyen típusú bolygót. Lakhatóságukról nem sokat tudunk. Sűrűségük alapján elképzelhető, hogy szilikát-magvú jégbolygók lehetnek, de az átmérő meghatározása éppen kis méretük miatt pontatlan. A Gliese 876d-ről azt tudjuk, hogy 1,4-2 földátmérőjű. Idáig kb. 37 db ilyen szuper-földet azonosítottak. A földszerű bolygóknál gyakoribb előfordulásuk azzal is magyarázható, hogy a méretük miatt éppen beleférnek a műszereink detektálási határába. A szuperföldek tipikus képviselője a 20 fényévyire levő Gliese 581 nevű vörös törpe körül keringő három szuperföld, a Gliese 581c, Gliese 581d és a Gliese 581e, tömegük 3 -7 földtömeg közt van.

Földszerű bolygók

Naprendszerünkben ezt a kategóriát 3 bolygó képviseli: a Vénusz, a Föld és a Mars. Méretük kb. 0,6 – 1,4 Föld-átmérő, sűrűségük 3,9 – 6 g/cm³ között, összetételük vas-szilikát. Föld méretű bolygót eddig nem sokat találtak. Felvetődik a kérdés: ha a Naprendszerben 3 ilyen bolygó is van, vajon eddig miért nem találtunk belőlük többet? Ennek az oka valószínűleg kettős:

A) A radiális sebesség meghatározása nem elég pontos még. Az ESPRESSO spektrográf, mely Föld-méretű bolygók kimutatására képes, előreláthatólag csak 2016-ban lesz üzembe helyezve (19).

B) a tranzit-módszer bolygórendszerek kis százalékát mutatja ki – azokat, melyek pályasíkja pont felénk néz. Ezért a forró Jupiterek kb. 10%-a mutat fényességcsökkenést tranzitnál, a Földről nézve. A napjuktól 1 CSE-re keringő, Föld-méretű bolygók viszont csak 0,47% eséllyel fognak látóirányunkba kerülni (17).

6.4.3. Az exobolygók nagy változatossága

A 20. ábra grafikonjából több fontos tanulság vonható le.

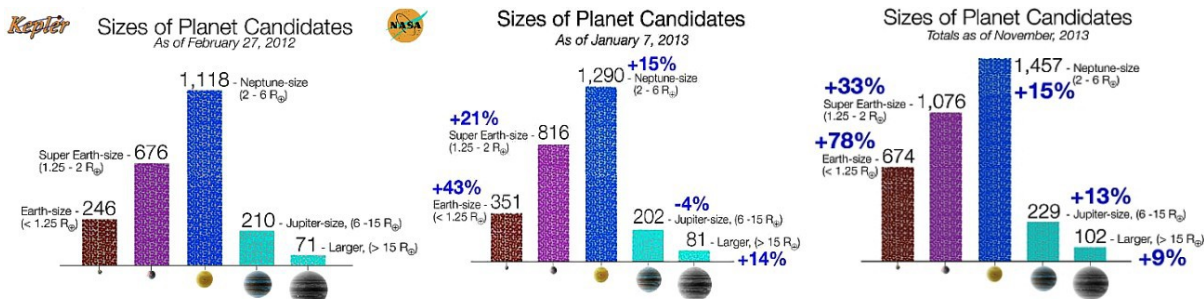
A) *Van átmenet a bolygó-típusok között.* A „forró Jupiterek” ritkulnak, majd lassan normál Jupiterré lesznek. A „forró Neptunuszok” összekeverednek a mini-Neptunuszokkal. Habár a 12. ábra diagramján egyes periódus/tömeg zónákban sűrűség-növekedés van, mégsem határozhatóak meg pontos zónahatárok.

B) *A diagramról hiányoznak bizonyos bolygók.* Egyrészt a Jupiter méretű bolygók közt igen ritkák a 10⁴ napnál nagyobb keringési periódus feletti. Ennek az oka valószínűleg a megfigyelési idő rövidegével magyarázható. Egyszerűen nem mérünk olyan rég, hogy a hosszú periódusú bolygókat is láthattuk volna.

Másrészt igen ritkák a Föld méretű és periódusú bolygók. Ez valószínűleg azzal magyarázható, hogy ezek az exobolygók csak a fent említett 0,47% eséllyel hoznak létre fedést, így detektálásuk valószínűsége kisebb (17). Ez a megfontolás igaz a napjuktól távoli Jupiter-méretű bolygókra is.

Ennek ellenére a 21. ábrán látható, hogy amíg a Kepler működött, a Föld típusú exobolygó-jelöltek száma nőtt a legdinamikusabban: +43%, majd +78%-kal. A szuperföldek +21%, majd +33%-kal, míg a Neptunusz méretűek már csak +15% és +15%-kal nőttek.

A kis méretű exobolygók növekvő számú észlelése már előrevetíti azt az eredményt, amit 2013-ban, statisztikai elemzéssel Geoff Marcy és kollégái kimutattak (9).

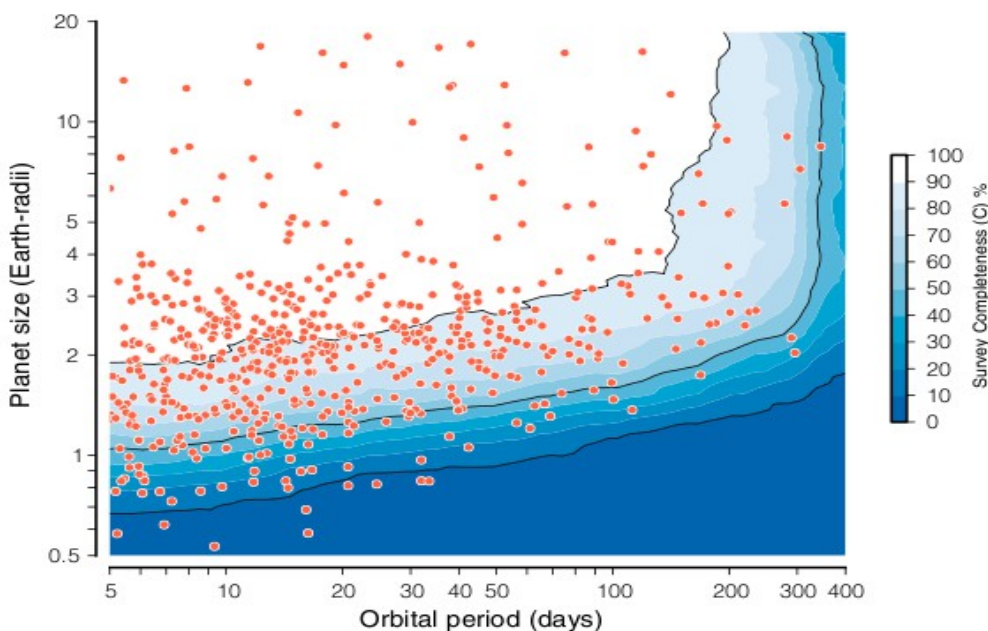


21. ábra. A különböző bolygótípusok számában történt változások.
http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler

6.4.4. Földszerű bolygók sűrűsége a Galaxisban

2013. november 4-én a Berkeley egyetem kutatói fontos bejelentés tettek: a Kepler űrtávcső adatait statisztikailag elemezték és a következő eredményt kapták: a Naphoz hasonló csillagok $22 \pm 8\%$ -ának van Föld nagyságú bolygója a lakható zónában (9). A cikket érdemes alaposabban tárgyalni – egyrészt a következtetése fontossága miatt is, de azért is, mert kiderül, hogy mekkora jelentősége van a „lakható zóna” definíciójának.

A Kepler által figyelt 150 000 csillagból Petigura és társai kiválasztottak 42 557 Naphoz hasonló, 10–15 magnitúdójú, G és K spektrális típusú csillagot. Ezekből 603 körül találtak eddig exobolygót. Diagramon ábrázolva a következő eloszlást kapjuk (22. ábra).



22. ábra. 603 exobolygó eloszlása keringési periódus és méret szerint.
(Petigura & al <http://www.pnas.org/content/110/48/19273>)

Statisztikailag a diagram legfontosabb része a kék árnyalataival jelölt C „megfigyelési teljesség”. A fehér színű részén az adatok biztosak, komplettek. A kék rész adatai a sötétkék irányába egyre bizonytalanabbak, mivel vagy túl kicsi bolygót figyeltek, vagy ezek keringési periódusa túl nagy, hogy megfigyelhetőek legyenek. Minél kisebbek és távolibbakk a bolygók, annál bizonytalanabb adataink vannak róluk. Azonban ezeket a hiányzó adatokat statisztikailag jól meg lehet becsülni. Az adatok statisztikai elemzésével ki lehetett mutatni, hogy nem azért találtunk több óriásbolygót, mert a számuk tényleg nagyobb, hanem mert könnyebben detektáljuk őket. Egy igen fontos eredménye ennek a statisztikának az, hogy

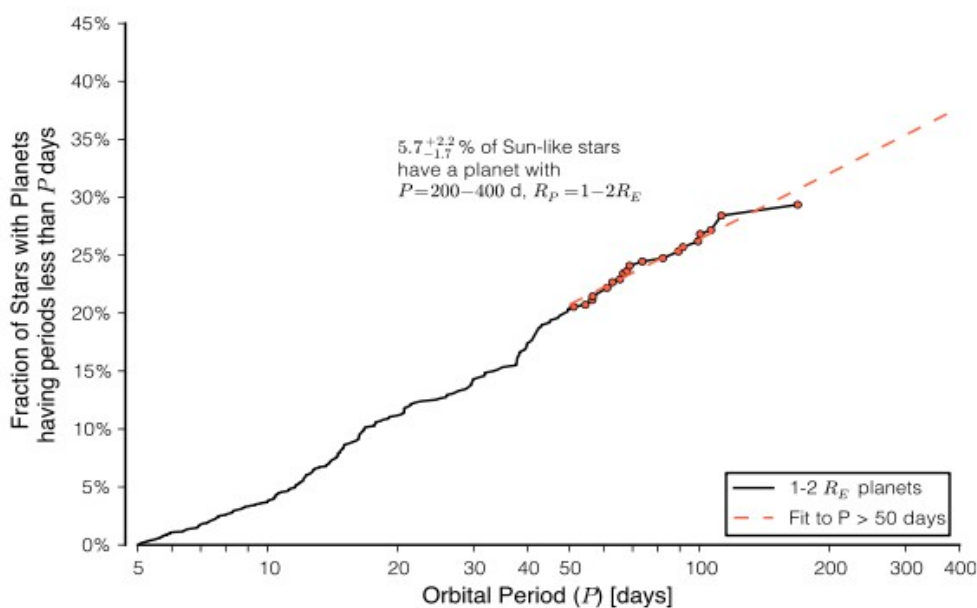
kimutatja: *minél nagyobb egy bolygó, annál ritkábban fordul elő* (l. 22. ábra fehér zóna) – és az ellentéte is igaz: *minél kisebb egy exobolygó, statisztikailag annál gyakrabban fordul elő*.

A diagramon látszik az is, hogy sajnos az 1 földnyi, 350-400 napos keringési időhöz tartozó adatok a sötétkék zónában oda esnek, ahol a C „megfigyelési teljesség” nullával határos – nincsenek adataink az ilyen bolygókról, mert kicsik is és távoliak is. A gyenge jelek elvesznek a fotometriai zajban.

Mivel még hiányoznak az adatok ahhoz, hogy a Föld-szerű exobolygókat statisztikába foglalhassuk, a meglévő exobolygók statisztikai tulajdonságait kell extrapolálni. Erre szolgál a 23. ábra diagramja, ahol már csak az 1-2 Föld-átmérőjű bolygók vannak ábrázolva.

Az ábrán a fekete vonal a nagy bizonyosságú adatokat mutatja 50 napos periódusig (a C >50%-os bizonyosságú világoskék adatok). De az 50-100 napos bizonytalanabb adatok is jól illeszkednek ehhez. A piros szaggatott vonal az extrapolálás. Pl. 200-400 nap periódus között kb. az érték $37,5-32=5,5\%$ G, K csillagnak van földszerű bolygója. (Ez az adat van kiemelve a táblázaton középen fent: 5,7%.)

Ez az adat nem ugyanaz, mint amiről a sajtótájékoztató szól. A kutatócsoport, habár több forrást idézve részletesen elemzi a lakható zóna fogalmát, úgy tették izgalmasabbá az adataikat, hogy lakhatónak vették az egész **0,5 – 2 CsE (!)** közti zónát. (Ez az előzőekben bemutatott Rare-Earth hipotézis szerint nagyon is vitatható, l. 5.3.) Akárhogy, 0,5-2 CsE-el számolva tehát „a Naphoz hasonló csillagok $22 \pm 8\%$ -ának van Föld nagyságú bolygója, lakható zónában!” Korrektül kiemelik, hogy ezek *nem földszerű*, csak *Föld típusú* bolygók.



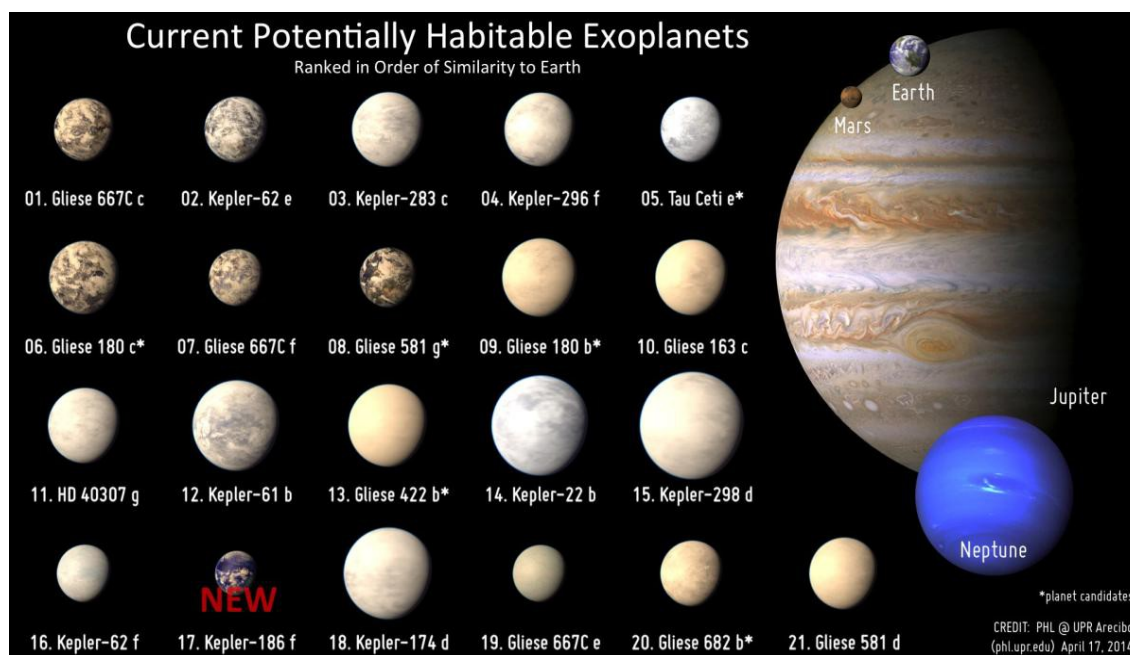
23. ábra. A G, K csillagok hány %-ának van P napok közti periódusú, 1-2 $R_{\text{Föld}}$ átmérőjű bolygója. (Petigura et al <http://www.pnas.org/content/110/48/19273>)

Ha a diagram segítségével egy közelítő számítást végzünk – pl. a 340-380 nap keringési periódusú bolygókra – az eredmény kb. 1,25% lesz. Fontos tanulság tehát, hogy a lakható zóna definíciójából adódóan akár egy egész nagyságrendet is változhat az eredmény, 22%-ról 1,25%-ra. Ugyanakkor optimizmusra ad okot az, hogy ha a Galaxis 9%-nyi G és K típusú csillagainak 1,25%-a körül kering földszerű bolygó, ez még mindig egy óriás szám, kb. 450 millió potenciálisan lakható világot jelenthet.

6.4.5. Megerősített földszerű exobolygók

Az előző statisztikai adatokból is láthattuk, hogy nem áll rendelkezésre elég adat az igazán földszerű exobolygókról – mégis találtak párat, amelyen talán elképzelhető élet.

Az Arecibo egyetemen működő PHL – „Bolygó Lakhatósági Laboratórium” kutatói a 24. ábrán felsorolt 21 exobolygón tartják a legvalószínűbbnek, hogy élet alakuljon ki:



24. ábra. A jelenlegi „potenciálisan lakható” exobolygók listája. (2014.04.30.)
(<http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>)

A rangsorolást az ún. Earth Similarity Index, (ESI) alapján végezték el, amit négy komponensből alakítottak ki:

1. A bolygó R sugara
2. A bolygó sűrűsége
3. Gravitáció (szökési sebesség)
4. Felszíni hőmérséklet

Ezeket súlyozva, majd összeszorozva kapják meg az ESI indexet.

$$ESI = \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{|x_i - x_{i0}|}{x_i + x_{i0}} \right)^{w_i}$$

(ahol x_i a fenti 1-4 összetevő egyike, az x_{i0} az ennek megfelelő földi érték, w_i a súlyozási exponens, n a bolygótulajdonságok száma)

A PHL munkatársai még egy sor különböző mutatót alakítottak ki: Habitable Zone Composition (HZC), Habitable Zone Distance (HZD), Habitable Zone Atmosphere (HZA), Standard Primary Habitability (SPH) mutatókat. Véleményem szerint kissé optimistán: a HZD definíciójuk a lakható zónáról a Vénusztól jócskán a Mars mögöttig terjed. Ám az új felfedezés, a legígéretesebb exobolygó, a Kepler 186f csak a 17. ebben a rangsorban.

6.5. Nagy pontosságú eszközök az exobolygó kutatásban

A fotometria a bolygó átmérőjéről szolgáltat adatot, radiális sebességméréssel pedig a bolygó tömegét lehet meghatározni. Mindkét adatra szükségünk van ahhoz, hogy a megfigyelt objektum sűrűségét kiszámíthassuk. A radiális sebesség változását spektrográffal, a fényességcsökkenést távcsövekkel tudjuk meghatározni. Ezeknek az eszközöknek az érzékenysége döntő fontosságú a kis méretű exobolygók felfedezésében.

Az űrtávcsövek, az óriás földi telepítésű távcsövek, a szuper-spektrográfok világa egy izgalmas, de egyben nagyon tág témakör. Egy átfogó bemutatásra itt nem is lehet vállalkozni, csak a legizgalmasabb eredményekhez kapcsolódó eszközök bemutatására.

6.5.1. Spektrográfok

Habár a köztudatban a legfontosabb csillagászati műszerek a távcsövek, azonban az exobolygó kutatásban nem lennének elegendők. Az exobolygók tömegének meghatározásához a távcsövekhez spektrográfokat kell csatlakoztatni. Michel Mayor 1995-ös híres 51 Pegasi b felfedezésében is az ELODIE nevű, akkor csúcsminőségű spektrográf játszotta a főszerepet. Ez a spektrográf az akkor szenzációs 13 m/s-os sebességeltérést tudott kimutatni.

A mai kutatások viszont a Földhöz hasonló nagyságú és naptávolságú bolygók kimutatását célozzák meg. Több igen precíz spektrográf van, ezek közül a két legfontosabbat említjük meg.

A „HARPS” spektrográf

A HARPS a „High Accuracy Radial velocity Planet Searcher” angol szavak rövidítése, egy ún. második generációs spektrográf (25. ábra). A HARPS-ot 2002-ben csatlakoztatták egy 3,6 m-es átmérőjű távcsőre az ESO La Silla-i obszervatóriumában Chilében. A HARPS jelenleg 0,97 m/s radiális sebességváltozást tud kimutatni. Ez a pontosság csak az ún. szuperföldekhez – a 2-5-szörös Föld tömegű bolygókhoz – elegendő, ráadásul csak a kis tömegű csillagok körül.



25. ábra. A HARPS – a vákuum alatt levő tartály kinyitva.

(http://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/instruments/harps/images/spectrograph_open2.jpg)

Az ESPRESSO spektrográf

Az Echelle **S**pectrograph for **R**ocky **E**xoplanet- and **S**table **S**pectroscopic **O**bservations angol szavak rövidítése. Ez a következő évek csúcstechnikája.

Kiszámítható, hogy a Föld a Nap radiális sebességében egy 9 cm-es változást okoz. Ha Föld nagyságú exobolygókat akarunk találni egy Nap típusú csillag körül, akkor ezt a szintet kell elérni. Ezt a hihetetlen érzékenységet éri majd el az ESPRESSO, előreláthatólag 2016-ban. Chilében, az európai VLT hatalmas, 8,2 m-es távcsövei mellé lesz felszerelve (18).

6.5.2. Űrtávcsövek

A Földi légkör jelentős zavaró hatással van a csillagászati megfigyelésekre: csökkenti a felbontóképességet, fényszóródást okoz, egyes hullámhosszakon nem átlátszó, stb. Ennek kiküszöbölése végett vetődött fel, hogy az űrbe kellene telepíteni a távcsöveinket.

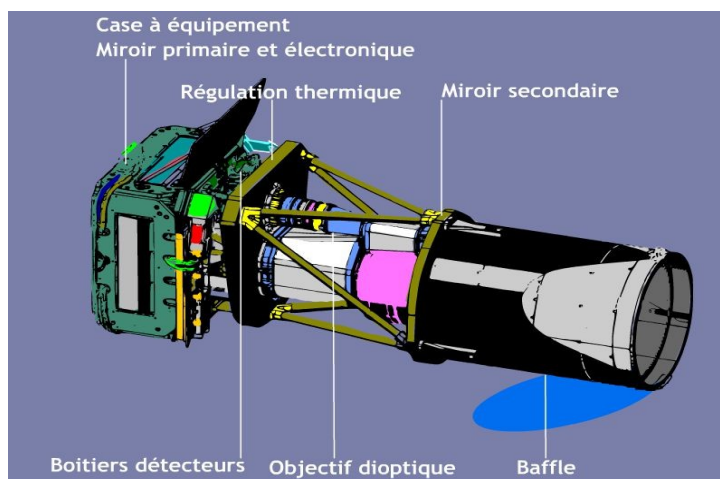
Ezt az ötletet már 1923-ban a német Hermann Oberth is felvetette. Egy 1946-ban megjelent cikkében Lyman Spitzer – a Spitzer űrteleszkóp névadója – már részletesen elemezte is az űrtávcsövek lehetőségét.

Az exobolygók kutatásában a világűrbe telepített távcsövek különösen fontos szerepet játszanak, mert légköri zavaroktól mentes megfigyelést tesznek lehetővé. A folyamatos megfigyelés is nagy előnyük, mivel az űrben nincs éjjel-nappal ciklus. A Jupiter nagyságú bolygók tranzitja könnyen detektálható földi távcsövekkel is, de a kisebb exobolygók pontos észleléséhez már űrtávcsövekre van szükség.

A „COROT”

Az Európai Űrügynökség, az ESA és a Francia Űrügynökség közös projektje, 2006 decemberében bocsájtották fel. Neve a „CONvection ROTation and planetary Transits” rövidítése. A tükre mindössze 27 cm-es, de 4 darab 2048 × 2048 pixeles CCD érzékelője van. Az űrtávcső az Egyszarvú és a Kígyó csillagképekben levő területeket figyelte meg a tranzitmódszer alapján, összesen 12 000 csillagot egyszerre (13).

Misszióját 2016-ig meg akarták hosszabbítani, de 2012-ben egy számítógéhibra miatt leállt. Több javítási kísérlet után 2013-ban misszióját befejezettek nyilvánították.



26. ábra. A COROT űrtávcső felépítése.

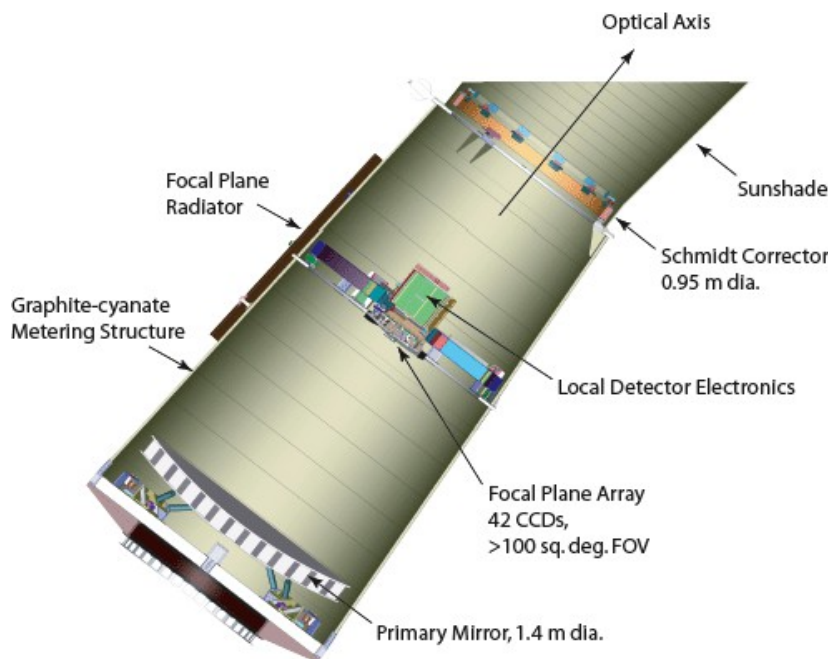
(http://media4.obspm.fr/exoplanets/pages_corot-instrument/images/figures/telescope.jpg)

A COROT űrtávcső csak 150 naposnál kisebb periódusú bolygókat tudott megfigyelni, mivel 150 napig egy irányba fordítva, utána az ellenkező irányba fordítva végzett megfigyeléseket. 530 bolygó-jelöltet fedezett fel, melyek közül viszont csak 30 bizonyult exobolygónak, miután alaposabb földi megfigyelésnek vetették alá.

A „COROT” sikerei olyan szempontból is fontosak voltak, amennyiben elősegítették a NASA döntését, hogy érdemes az exobolygókutatásokat az űrben folytatni. Ezzel hozzájárult a legsikeresebb exobolygókutató űrtávcső, a *Kepler* 2009-es fellövéséhez, amit a NASA addig költségvetési okokból többször elhalasztott.

A Kepler űrtávcső

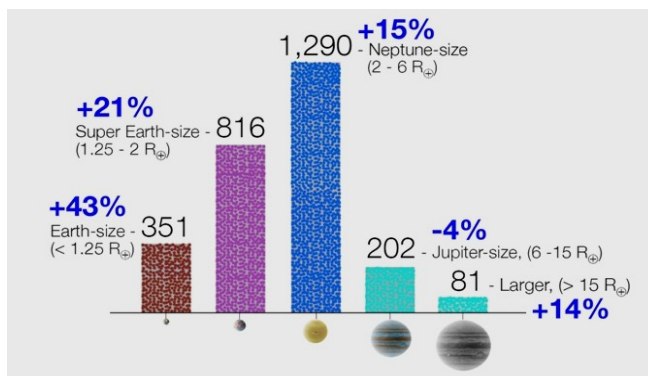
A Kepler űrtávcső eddig messze a legsikeresebb, speciálisan exobolygó-megfigyelésre épített szerkezet volt. A COROT-énál jóval nagyobb 1,4 m átmérőjű tükrével és 42 darab CCD érzékelőjével (egyenként 2200×1024 pixel) összesen 95 Megapixel felbontással tudott dolgozni.



27.ábra. A Kepler űrtávcső szerkezeti felépítése.

(<http://kepler.nasa.gov/multimedia/artwork/hardware/?ImageID=244>)

A Kepler 150000 csillagot figyelt meg egyszerre a Cygnus és a Lyra határán lévő területen, tranzitmódszer alapján. Missziója abból állt, hogy felderítse, a Galaxisunkban milyen gyakorisággal fordulnak elő Föld típusú bolygók. A Kepler által talált „bolygójelölteknek” még át kellett esniük a Földről végzett radiális sebesség módszerrel végzett ellenőrzésen, hogy pl. a napfoltok, változó fényű csillagok, stb. hatását kiszűrjék és a tömegüket is meghatározhassák. Ezt elsősorban a Keck Observatórium HIRES (High Resolution Echelle Spectrometer) spektrométerével végzik.



28.ábra. A Kepler bolygójelöltek eloszlása típus szerint (2013. 01.10. állapot).

(http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/kepler-461-new-candidates.html)

A legújabb adatok szerint a Kepler 962 igazolt exobolygót és 3845 bolygójelöltet fedezett fel (2014.04.30.-i állapot, <http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/candidates/>).

Sajnos a Kepler eredeti misszióját felfüggesztették, mert 2013 elején egyik giroszkópja meghibásodott. Tíz nap szünet után 2013 májusáig még sikerült újraéleszteni, de akkor két giroszkópja végleg leállt. Kihasználására folyamatosan keresték a megoldásokat, mivel az általa szolgáltatott adatok annyira úttörő jellegűek voltak, hogy a NASA egyszerűen nem hagyhatta veszni a projektet. Végül 2013 novemberében bejelentették, hogy sikerült új feladatot találni a Keplernek. A kieső giroszkópok miatt iránytartási problémák jelentkeznek,

ami a fényességmérési pontosság csökkenését eredményezi. Ezért nem az eredetileg figyelt terület, hanem az ekliptika egy egész körsávja lesz a megfigyelések célpontja. Az új projekt neve K2 Second Light.

A Kepler zavartalan működése alatt annyi adatot gyűjtött, hogy elemzésük alapján 2014 februárjában 715 új exobolygó felfedezését jelentették be, majd április közepén az eddig a Fökhöz leghasonlóbb exobolygó, a Kepler – 186f detektálását.

6.5.3. A megvalósítás előtt álló űrtávcsövek

A GAIA űrteleszkóp (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics)

Az Európai Űrügynökség (ESA), eredetileg a *Hipparcos égbolt-feltérképezés* folytatásaként tervezte és célja a Galaxis csillagainak még pontosabb 3D felmérése, eddig sohasem látott minőségben, számban és felbontásban. Kb. 1 milliárd csillagot fognak megfigyelni – a Galaxis csillagainak kb. 1%-át.

Mivel a 3D galaxis-térképhez a távolsági eredményeket a csillagok fényességéből fogják megkapni, a GAIA különösen alkalmas lesz exobolygó kutatásra is.

De nemcsak fotometriai, hanem spektrometriai méréseket is végez majd. Két darab, ellenkező irányba néző főtükre lesz (négyzetesek), méretük 1,45m×0,5m. A CCD detektorainak száma impozáns: 106 darab, egyenként 4500×1966 pixellel. Ebből fotometriára 14, radiális sebességek mérésére 12 CCD szolgál majd.

A várható eredmények lélegzetelállítóak: 650 fényév távolságban több 10 000 exobolygó kimutatására lesz alkalmas. Az 5 évre tervezett működési idő alatt mindegyik célpontját 70-szer fogja megvizsgálni és ezalatt távolsági, mozgási és fényességi adatokat rögzít. Ennek megfelelően a begyűjtött adatmennyiség is elképzelhetetlenül nagy: 30 000 CD ROM-nak megfelelő adat. Ezért az 577 M € összköltség mellett még 120 M €-t adatfeldolgozási költségekre terveztek be. A GAIA-t 2013. december 19-én lőtték fel, 2014. január 8-án érte el célját, a Nap-Föld L2 pontját. Jelenleg, kb. május végéig kalibrálják.

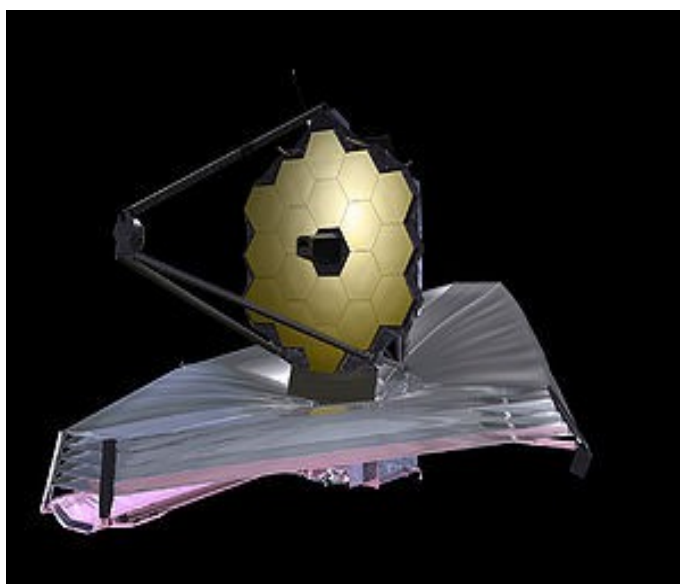


29. ábra. A GAIA űrszonda (művészi elképzelés). (http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Gaia)

A „JWST“ (James Webb Space Telescope)

A JWST egy infratávcső lesz, a Hubble tükreknél 7,3-szor nagyobb tükörfelületű és 18 db hatszögletű berillium tükörből áll majd. A JWST-t eredetileg 2014-ben kellett volna felőni, de a költségütlépések miatt úgy néz ki, hogy erre csak 2018-ban fog sor kerülni. A helyét a Nap-Föld L2-es Lagrange-pontjában határozták meg, mert így – a Föld árnyékában – elkerülhető a Nap melegítő hatású sugárzása. Mivel infravörös-tartományra tervezték, a

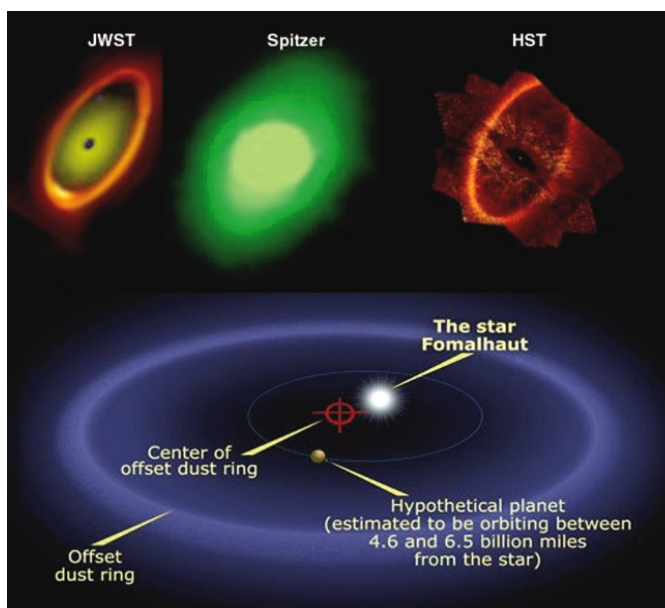
minél jobb eredmények érdekében még hővisszaverő fóliákkal is védik.



30. ábra. A James Webb Space Telescope. (<http://de.wikipedia.org/wiki/JWST>)

A James Webb Space Telescope teljesítményéről csak szuperlatívuszokban lehet beszélni. A 6,5 méteres főtükrével a Földön is előkelő helyet foglalna el az óriástávcsövek között. Tükre 18 darab hatszögletű kisebb tükörből áll. Ezek teljesen új technológiával készültek – nem üvegből, hanem berilliumból, aranybevonattal. Ez azt a célt szolgálja, hogy az infravörös tartományban még jobb visszaverődést lehessen elérni. Egy résztükör teljes súlya mindössze 20 kg, így a JWST egész tükre, hatalmas méretei ellenére, jóval könnyebb mint a Hubble üvegből készült tükre.

Habár a JWST fő célja az ősrobbanás utáni galaxisok és a korai csillagképződés tanulmányozása, az exobolygó kutatáshoz kapcsolódó feladata is van: a protoplanetáris rendszereket is tanulmányozza majd és nagy teljesítményű spektroszkópjai segítségével életjeleket is képes lesz keresni (19). Felbontását a következő kép ilusztrálja:

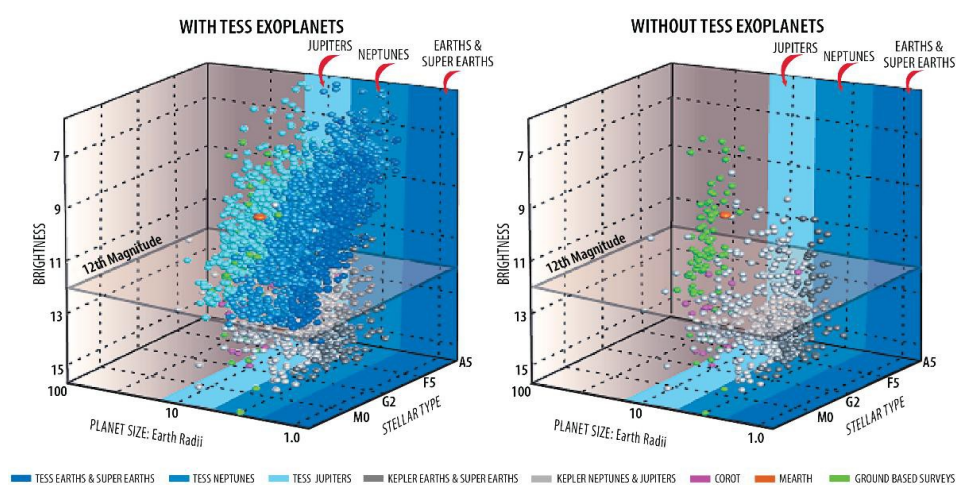


31. ábra. A Fomalhaut: a JWST felbontása a Spitzer és a Hubble-hez viszonyítva. (<http://www.jwst.nasa.gov/exhibit/birth.html>)

TESS – Transiting Exoplanet Survey Satellite

A NASA 2013-ban beemelte az MIT projektjét, a TESS-t a megvalósítandó tervek közé. A felbocsajtás várható ideje 2017-ben lesz. Míg a COROT és a Kepler űrtávcsövek az égbolt egy kicsiny területét figyelték meg, a TESS különlegessége az lesz, hogy az egész égboltot fogja pásztázni, bolygó-tranzitra utaló fényességcsökkenést keresve.

A TESS 400-szor nagyobb területen végzi majd a méréseit, mint az eddigi rendszerek. Speciális, 13,7 napos Föld körüli pályán kering majd, mely nagy része a Van Allen öveken kívül van. Ez a speciális, ún. „holdrezonáns” pálya évtizedekig stabil marad, így hosszú idejű megfigyeléseket tesz lehetővé. A megfigyelendő csillagok száma kb. 500 000, típusuk főleg a naphoz hasonló G és K színképosztályú, de a legközelebbi vörös törpéket (kb. 1000-et) is figyeli majd. Küldetésének fő célja az, hogy a **JWST** számára keressen tanulmányozandó objektumokat. Az előzetes becslések szerint a TESS megsokszorozza majd a Föld és szuperföld méretű fedési észlelések számát (29). Ezzel egy olyan hiányosságot pótol majd, amit ma még csak statisztikai módszerekkel lehet úgy-ahogy kiküszöbölni (9).



32. ábra. A TESS-től várt észlelések (baloldal) és a jelenlegi észlelések (jobboldal) (29).

6.5.4. A jövő űrtávcsövei

Az eddig felsorolt csillagászati technika addig a határig működik, hogy Föld nagyságú bolygókat mutasson ki tranzit és radiális sebesség módszerrel, a Naprendszerünk kb. ezer fényéves környezetében. De mi lesz a következő lépés, ha pár éven belül egyre több Föld nagyságú, kb. Nap-Föld távolságban keringő bolygót találunk?

Kézenfekvőnek tűnik, hogy meg kell próbálni az élet jelenlétére utaló spektrumjelet keresni az erre alkalmasnak tűnő „jelöltek” halvány fényében. Hogy ez mennyire nem lehetetlen, arra van példa: 2008-ban az infravörösben érzékelő Spitzer űrtávcsővel acetilén- és ciánhidrogén-molekulákra bukkantak egy fiatal csillag körüli anyagkorongban (13).

A DARWIN és a Terrestrial Planet Finder

Az exobolygók alaposabb vizsgálatához a mai eszközök képességét jóval meghaladó űrtávcsövek és spektrumelemzési berendezések szükségesek. A NASA és az ESO is tervbe vették űrtávcsőrendszerek kiépítését – ezek a **DARWIN** és a **Terrestrial Planet Finder** űrtávcsövek lettek volna. Sajnos, 2007-ben még a tervezési fázisban leállították mind a két projektet.



33. ábra. Terrestrial Planet Finder űrtávcső rendszer (művészi elképzelés).

(Forrás: NASA http://exep.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_what_is.cfm)

Az európai űrhivatal, az ESA a Darwin projekttel a NASA-éhoz hasonló felépítést tervezett, de mivel nem volt elég adat arról, hogyan tudnák a távcsövek közti távolságot μm nagyságrendű pontossággal megtartani, a további tervezéseket leállították.

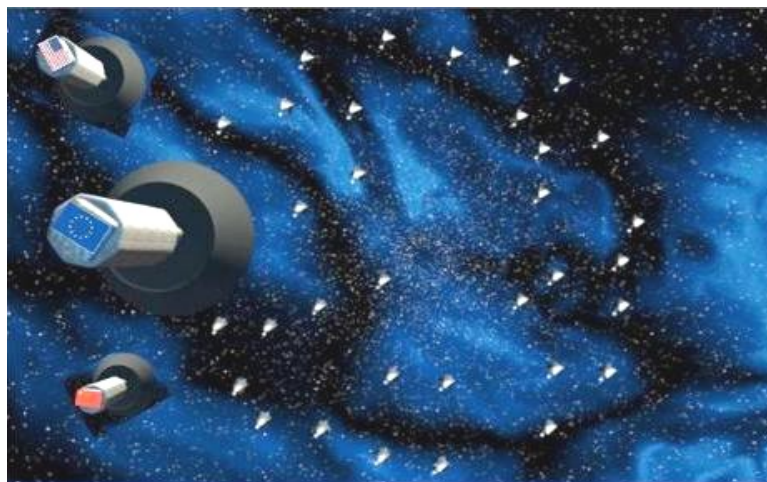
Exo Earth Imager, Antoine Labeyrie hiper-teleszkópja

Habár a DARWIN és TPF űrteleszkóp-rendszereknél is volt megoldatlan technológiai probléma, egy francia asztronómus, Antoine Labeyrie már 20 éve dolgozik egy olyan teleszkóprendszer tervezésén, amely minden eddigi elképzelést felülmúl.

Labeyrie egy olyan teleszkóprendszert képzelt el, melynek az átmérője 100 km (!) lenne, kb. 150 db, 3 méteres űrteleszkópból állna és felbontóképessége akkora lenne, hogy a 30 fényévre levő exobolygókon részleteket is lehetne vele látni (20).

Labeyrie nem egy ismeretlen név: az 1970-es években a Speckle-interferometria egyik kidolgozója volt, amit az atmoszferikus turbulenciák kiküszöbölésére használnak.

Első lépésben, a technológia kiérlelése és az új típusú űrtávcső-generáció tesztelése céljából egy kicsi, 24 db-os rendszer felbocsájtását javasolja. Ez a 25 cm átmérőjű, könnyű tükrökből álló, Luciola nevű távcsőflottilla később akár 1000 db-ra is bővíthető lenne.



34. ábra. A Luciola-projekt távcső-flottillája (művészi elképzelés).

(Forrás: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080045798_2008045136.pdf)

5.5. A hosszú távú cél – bioszignatúra kimutatása exobolygókon

Az exobolygókutatás hosszú távú célja az lenne, hogy ne csak életet hordozni képes, de élet jeleit mutató exobolygókat is találjunk. Hogyan lehetséges ez?

Az élet mint jelenség, egy negatív entrópiájú folyamat, ami rendezettséget hoz létre a rendezetlenség rovására – energia felhasználása által. A fő energiaforrás a földi élet számára a Nap. Az energia látható és infravörös spektrumban érkezik hozzánk – legnagyobb része 250 és 2500 nm hullámhossztartományban.

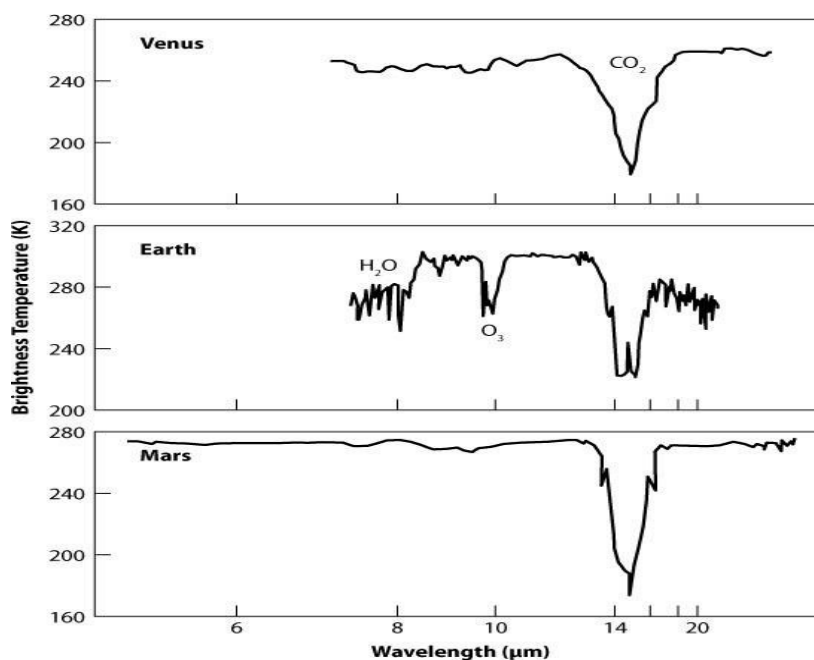
A fő energiaátalakítást, sugárzási energiából kémiai energiává, a növények végzik, túlnyomó részt klorofill segítségével. Azonban a napsugarak teljesítménye és a klorofill határfoka túl kevés ahhoz, hogy hosszan mozogni tudó élőlények energiaszükségletét fedezze – ezért nem tudnak a növények helyet változtatni. A gyors mozgás magas energia-igényének biztosítására a magasabb rendű élőlények kémiai energiaforrást használnak – a táplálék oxigénben történő elégetésével. Jelenlegi tudásunk szerint magasabb rendű élet nagy valószínűséggel csak oxigént tartalmazó légkörben jöhet létre (22).

Az oxigént az exobolygók légkörében megfelelően érzékeny spektrográfokkal ki lehetne mutatni. Az oxigén jelenléte, ha nem is lenne bizonyíték magasabb rendű életre, annak a lehetőségét jelentené.

A 35. ábrán az látható, hogy egy bolygó atmoszférájában lévő különböző anyagok milyen nyomot hagynak a spektrumban. A mérések a Naprendszer bolygóiról készültek ugyan, de megfelelő érzékenységgű távcsövekhez kapcsolt spektrográfok távoli bolygók esetében is képesek elvégezni ilyen méréseket.

Például, a Spitzer űrtávcső egy fontos eredménye volt, hogy segítségével, a HD 189733 jelű exobolygó légkörében először tudtak vizet kimutatni infravörös tartományban – tehát az elv működik az exobolygók esetében is (13).

Geoff Marcy, az egyik legmagasabb citációs indexszel rendelkező exobolygókutató szerint olyan tudományos áttörés előtt állunk, ami az emberiség történelmében Amerika felfedezésének és az ipari forradalomnak a jelentőségét is túlszárnyalja (13). Sarah Seager, az MIT kutatója azt is kiszámította, hogy tíz éven belül két bioszignatúrás spektrumot mutató exobolygó felfedezése valószínűsíthető, a JWST és a TESS várható eredményei alapján (35).



35. ábra. A víz, oxigén és CO₂ a Vénusz, a Föld és Mars légkörének spektrumában. (21)

7. Az exobolygók témakörének alkalmazása a fizika oktatásában

7.1. Motiváció és exobolygók a fizikatanításban

A természettudományos tárgyak iránti csökkent érdeklődés európszerte jelentkező probléma. Valószínűleg erre is vezethető vissza, hogy az oktatási irodalomban egyre nagyobb súllyal szerepel a diákok motiválásának a témaköre. A német szakirodalomban a tanárok egyik fontos motivációs lehetőségét „Einstiege”-ban látják, amit „belépő”-nek lehetne fordítani. Míg a szimpla „bevezető” az új témához szükséges előzetes ismereteket foglalja össze, a belépő az összes új anyaghoz szükséges tényező gyűjtőfogalma. Lehet rövid film, a témához kapcsolódó vicc, anekdota, vagy tudománytörténeti érdekesség, stb.

A korábbi, ún. „informatív belépők” helyett, amikor az óra elején a tanár vázolja, hogy az órán miről lesz szó, egyre többet hallani az ún. „motivációs belépőről”. Hilbert Meyer szerint a tanároknak minél több motivációs technikát kell alkalmazzanak a figyelem felkeltésére (30), úgymint:

A) *Meglepő kérdések*: szokatlan irányból közelítik meg a témát, és meglepő, váratlan eredményre vezetnek (Aha-effektus).

B) *Félrevezető kérdések*, blöff: olyan kérdések felvetése, melyek direkt hamis következtetés levonására készítetik a diákokat, hogy aztán a hibából tanulni lehessen.

C) *Szokatlan témakapcsolások*: a diákokat erősen foglalkoztató területekről (pl. autóversenyzés) problémákat felvetni, és ezek megoldására a fizika törvényeit alkalmazni.

A leghatékonyabbnak az utóbbi módszert tartják, mert még ha sikeres is a figyelemfelkeltés – pl. meglepetés által – ennek elmúltával a motiváció csökken. Míg ha meglevő érdeklődést aktiválunk, a figyelem kevésbé lanyhul. Az exobolygók témaköre ez utóbbira ad jó lehetőséget a fizika tanításában. Segítségével hosszú távon fenntarthatjuk az érdeklődést, a motivációt a tananyag elsajátítása közben.

A természettudományok tanításának színesebbé tételét az exobolygók témakörének segítségével már Dr. Szatmáry Károly is megfogalmazta 2006-os cikkében: „Az exobolygók izgalmas témaköre kiváló lehetőséget ad a csillagászat oktatásában a komplex szemlélet fejlesztésére...” (14). Ennek szemléltetésére tételezzünk fel két forgatókönyvet:

Ha egy átlagos diáknak azt kezdjük el magyarázni, hogy a Nap hány W/m^2 energiát sugároz a Földre, a Föld magja milyen forró és milyen elemek találhatóak benne, elég valószínű, hogy nem fogjuk nagyon lekötni a figyelmét. De ha a témát úgy közelítjük meg, hogy mindezt azért van szükség, hogy távoli csillagok körüli bolygókon idegeneket találhassunk, a figyelmet már a téma felvetésével felkelthetjük.

7.2. Alkalmazás a fizika hagyományos területein

A fizika legtöbb területe kapcsolódik a csillagászathoz – a mechanika és az égi mechanika rokon területek. A hőtan legtöbb területe is kapcsolható, kivéve a belsőégésű motorokat. Talán a legkevesebb csatlakozási pont az elektromosságtannal van – az elektromos kölcsönhatás 10^{40} nagyságrenddel nagyobb a gravitációs kölcsönhatásnál, a csillagok, bolygók világában az uralkodó erő a gravitáció.

A lényeg itt nem az, hogy fizikatanítás közben előforduló fogalmaknál az exobolygók témakörében is megtalálható azonosságokra *utólag* rámutassunk. Az a motivációs többlet a fontos, amit az exobolygók lenyűgöző világa jelent. Ezért mindig érdemes egy kis kitérőt tenni a Fermi-paradoxon és az idegen civilizációk irányába, mielőtt a tiszta tudomány képleteit, definícióit ismertetnénk.

7.2.1. Mechanika

Az exobolygók az égi mechanika tipikus tárgyai, hozzájuk konkrétan csak Kepler három törvénye lenne kapcsolható. A Fermi-paradoxon, az űrhajóval utazó idegenek viszont alkalmasak jó pár egyszerűbb mechanikai fogalom bevezetésére. A bevezetendő fizikai fogalmakat a következőkben aláhúzva jelöljük, a *motivációs kérdéseket* dőlt betűvel.

Egyenes vonalú egyenletes mozgás

Meglepő kérdés: hogy ha egy űrhajóval elindulnánk egy távoli bolygóra, majd egy idő után kikapcsoljuk a motorokat, mi történik? Leáll az űrhajó?

A válasz az autó analógiából kiindulva egyes diákoknak meglepő: a mozgás egyenes vonalú egyenletes mozgás lesz. (itt észrevétlenül elő lehet készíteni Newton I. törvényét is, annak megnevezése nélkül)

Egy „magára hagyott” űrhajóval a következő fogalmak vezethetők be:

- az űrhajó pályája → a mozgás pályája
- a Földet és az űrhajót összekötő vektor → a helyvektor
- az űrhajó abszolút sebessége, hogy merre halad → sebesség, sebességvektor
- koordináta-rendszerek → Az origóban lehet a Föld is, de lehet a Nap is. Távolról célszerűbb a Napot venni mint orientációs pontot, mert látszik.

Egyenes vonalú, egyenletesen változó mozgás

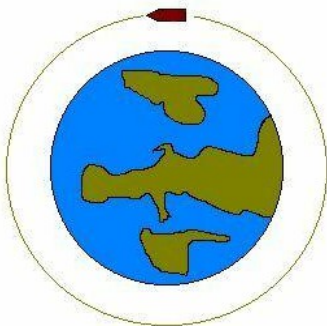
Itt visszatérünk az űrhajó indulásához, a hajtóművek bekapcsolásához.

- Ahhoz, hogy elérjük az űrhajó kívánt utazósebességét, a sebességet állandóan növelnünk kell. → a gyorsulás mint sebesség-változás
- A célállomáshoz megérkezéskor le kell fékezni az űrhajót. → lassuló mozgás
- A gyorsulás a sebességvektor időegység alatti változása

A körmozgás

A körmozgások tárgyalása a bolygók körrel közelíthető mozgása miatt témája lehetne az exobolygók irányából történő megközelítésnek. Mégis, célszerűbb az űrhajós modellnél maradni.

- Az űrhajó körpályára kell álljon a célbolygó körül. → körpálya, kerületi sebesség



36. ábra. Űrhajó körpályán. (http://wp1099603.server-he.de/Alles_im_Eimneu.html)

- Az űrhajó körpályájának a jellemzői: → kerületi sebesség, szögsebesség, periódus.
- Mi tartja a körpályán az űrhajót, ha eddig egyenes vonalú mozgást végzett? Egy gyorsulás, mely lefele, a bolygó irányába mutat → centripetális gyorsulás

Newton törvényei

Newton I. törvénye *Meglepő kérdés: Egy magára hagyott, sodródó „alien” űrhajó hogy viselkedik két bolygó között félúton, az űrben? Egy helyben lebeg?*

Válasz: Nem, egyenes vonalú egyenletes mozgást végez, míg meg nem állítják.

Newton II. törvénye $F = ma$ A nagyon nagy tömegű űrhajók megmozgatására nagy erő kell.

Newton III. törvénye Akció-reakció elve. Egy rakétamotor is tipikusan jó példa erre. Ugyanakkor jó lehetőség elmagyarázni a radiális sebesség mérésének az alapelvét.

Egy exobolygó azért kering a csillaga körül, mert az vonzza, tehát eltéríti az egyenes vonalú pályájáról. *Félrevezető kérdés: De vajon az exobolygó is vonzza a csillagát? Eltéríti-e azt a pályájáról?* *Válasz:* igen, amekkora erővel vonzza a csillag az exobolygót, akkora erővel vonzza a bolygó is a csillagát. Mindketten a közös tömegközéppont körül keringenek, csak a csillag hatalmas tömege miatt nagyon kis körpályán. Ezt a „ráncigálást” mérni is tudjuk.

Newton IV. törvénye Az erőhatások függetlenségének elve. Két hajtómű használata az űrhajón – egy oldalsó és egy hátsó – ferde mozgást hoz létre.

Erőtörvények

A gravitációs erő törvénye *Meglepő kérdés: Mi történik egy űrhajóval egy exobolygó felett, 100 km magasságban a légkörének határánál, ha egyszerre csak oda „teleportáljuk”?*

Válasz: Nem kering, az F gravitációs erő hat rá. $F = \gamma \frac{mM}{R^2}$

(ahol m az űrhajós, M a bolygó tömege, R a távolság, γ a gravitációs állandó)

Az űrhajós zuhanni kezd a bolygó felé, mert ennek az F nagyságú gravitációs ereje hat rá.

A zuhanás gyorsulása nagyjából akkora, mint a bolygó felszínén, mivel $(R+100\text{km})^2 \sim R^2$.

A nehézségi erő: $G = mg$ Tipikusan alkalmas az exobolygós *szokatlan témakapcsolásra*. Számolási példa: Mekkora lesz a súlya egy embernek egy a Földnél 2-szer nagyobb, magasabb rendű életet hordozó exobolygón? Első számolási meglepetés: A „csak” kétszer nagyobb átmérőjű exobolygóban 8 darab Föld férne el!

$$V = 4\pi R^3 = 4\pi(2R_{\text{Föld}})^3 = 8 \times (\pi R_{\text{Föld}}^3) = 8V_{\text{Föld}}$$

Hogy az exobolygón mekkora a súlya egy embernek, ahhoz tudnunk kell mekkora a gravitációs gyorsulás az illető exobolygón. Ehhez ismernünk kell a tömegét, ehhez meg a sűrűségét. Az, hogy magasabb rendű életet hordoz, nem irreleváns információ! Mivel élet van rajta, feltételeznünk kell, hogy van mágneses tere, tehát vasmagja is. A sűrűsége tehát a Föld sűrűségéhez nagyon közeli. Ezért ha

$$V_b = 8V_{\text{Föld}} \mid \times \rho \rightarrow M_b = 8M_{\text{Föld}}$$

Félrevezető kérdés: a bolygó 8× nagyobb tömegű, $g_b = 8g$? Számoljunk...

$$F = \gamma \frac{mM}{R^2} = m \frac{\gamma M}{R^2} \rightarrow g_b = \frac{\gamma M_b}{R_b^2}$$

$$M_b = 8M_{\text{Föld}}, R_b^2 = (2R_{\text{Föld}})^2 \rightarrow g_b = 2g_{\text{Föld}}$$

(ahol M_b , R_b , ρ , g_b sorban a bolygó tömege, sugara, sűrűsége és gravitációs gyorsulása)

Súrlódási erő, légellenállás *Félrevezető kérdés: Mi történik az előbb említett űrhajóval, ha a légkör határán egy keringő űrhajóból kiszáll? Tovább kering, de... (Már nem esik? De igen, csak a kerületi sebessége nagy.)*

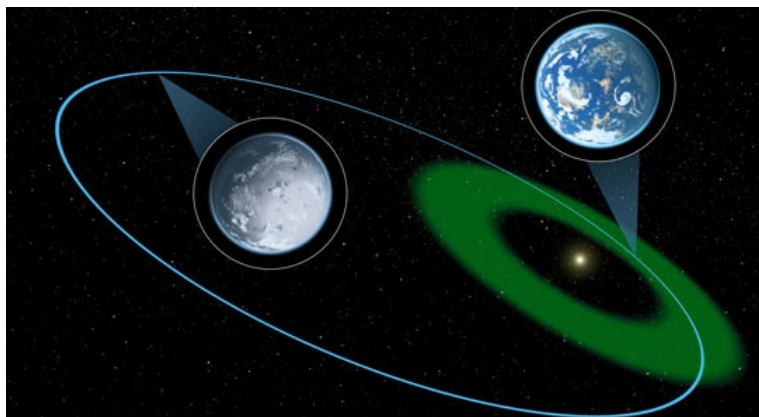
Beleütközik az atmoszféra részecskéibe a keringése kerületi sebességével, az így keletkező légellenállás fékezi, egyre jobban, míg a sűrűbb légrétegekben a közte és a levegő

közti sűrűdés akkora lesz, hogy a hőmérsékletet a szkafander sem bírja, az űrhajós elég (l. Columbia űrsikló).

Kepler törvényei

Kepler három törvénye tipikusan exobolygó-megközelítésű témakör – égi mechanika.

K.I. A bolygók ellipszis pályán keringnek, melyeknek egyik gyújtópontjában a Nap áll.



37. ábra. Exobolygó elnyúlt ellipszis pályán. (Forrás: <http://scitechdaily.com/habitable-zone-might-help>)

Az elnyújtott ellipszispálya nem alkalmas arra, hogy egy lakható bolygó pályája legyen. A bolygó ki-be halad a lakható zónába. Mikor kívül van, kihűl, megfagy a víz a felszínén.

K.II. A Naptól bolygóhoz húzott rádiuszvektor egyenlő időközök alatt egyenlő területeket sűrol. A 37. ábrán látható exobolygó gyorsan halad át a lakható zónán.

K.III. A bolygók keringési időinek négyzetei úgy aránylanak egymáshoz, mint az ellipszispályák nagytengelyeinek köbei.

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = konst.$$

Ez a legfontosabb képlet az exobolygó kutatásban: a két tranzit között eltelt időt mérve megkapjuk a T keringési időt, ebből pedig ki tudjuk számítani a napjától való távolságot, tehát azt, hogy a bolygó lakható zónában kering-e.

$$a^3 = \frac{\gamma (M+m) T^2}{4 \pi^2}$$

(ahol γ a gravitációs állandó, M, m a bolygó és a csillag tömege, T a keringési periódus)

Az energia, a mechanikai munka

A mozgási és a potenciális energia fogalmai szorosan kapcsolódnak egy bolygóhoz, de középiskolai szinten inkább érdemes megint egy űrhajó példáját felhozni (amellyel „eljutunk” egy exobolygóig).

Mozgási energia. Az űrhajót egy bizonyos utazósebességre kell felgyorsítsuk, ehhez erőt kell kifejtenünk, ezt a hajtóművek tolóereje adja. Az űrhajó mozgási energiáját azért kell kiszámítanunk, hogy megtudjuk, mennyi üzemanyagot kell magunkkal vinni. (Erre az egyszerűsítő magyarázatra az integrálni nem tudó diákok miatt van szükség.)

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2}$$

A képletből látható, hogy a mozgási energia a sebesség négyzetével nő: kétszeres sebességhez négyszer annyi üzemanyag kell, tízszeres sebességhez százszoros üzemanyag-mennyiség. Itt meg lehet említeni azt a tényt, hogy az eset nem ilyen egyszerű, mert ekkora üzemanyag-mennyiségeket magunkkal vinni is további üzemanyag kell! Érdekességképp felírható a Ciolkovszkij-egyenlet is.

$$v(t) = v_{gáz} \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m(t)}\right)$$

(Ahol a $v(t)$ a mindenkori sebesség, $v_{gáz}$ a rakétahajtóműből kiáramló gáz sebessége, m_0 az űrhajó kezdeti tömege, $m(t)$ a tömege a mindenkori t időben.)

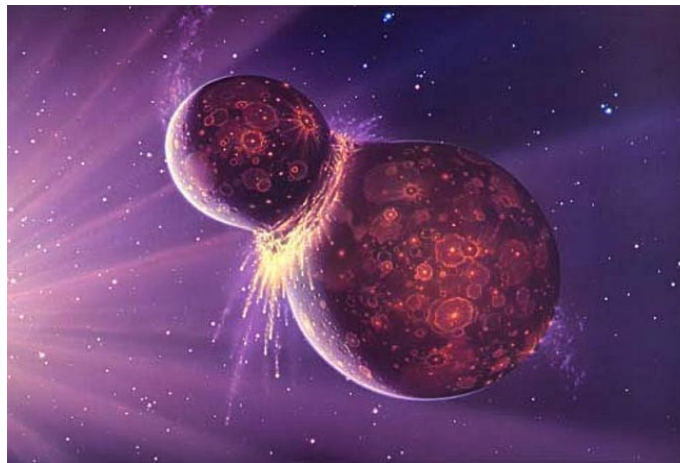
Rugalmatlan ütközések

Nagy a valószínűsége annak, hogy azok az exobolygók lesznek lakottak, amelyeknek egy nagy holdjuk van (l. 7.6. fejezet). A Föld holdja valószínűleg úgy jött létre, hogy egy hatalmas kozmikus ütközésben az Ős-Föld egy Mars méretű bolygóval ütközött.

Bolygók ütközése rugalmatlan ütközés, mert a vékony kéreg alatt meg van olvadva a magjuk, így nem pattanhatnak vissza a másikról. A rugalmatlan ütközés azt jelenti, hogy az ütközés után a két bolygó sebessége egyenlő lesz.

$$v_{közös} \cdot (m_1 + m_2) = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

A rugalmatlan ütközés során az egyik bolygó mozgási energiája a másik gyorsításától eltérő munkát végez, lefékeződik, mozgási energiája lecsökken és hővé alakul. Mindkét bolygó kérge megolvad, a gravitáció hatására egy gömb lesznek.



38. ábra. Rugalmatlan ütközés. Az Ős-Föld ütközése egy Mars méretű bolygóval. (művészi rajz)
<http://nascentarray.com/wp-content/uploads/2013/02/theia-hypothetical-planet.jpg>

Első kozmikus sebesség

A centrifugális és gravitációs erő egyensúlyából számítható ki: ezzel a sebességgel kell körpályára álljon egy űrhajó. Ez 200 km magasban 7,8 km/s

$$\frac{m \cdot v_{kl}^2}{R} = G \frac{mM}{R^2} \quad \rightarrow \quad v_{kl} = \sqrt{G \frac{M}{R}}$$

Második kozmikus sebesség

Az űrhajós mozgási energiája nagyobb kell legyen helyzeti a energiájánál, hogy elhagyhassa a bolygó körüli pályáját.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv_{k2}^2 = mgR \rightarrow v_{k2} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Mivel ezzel a sebességgel el lehet hagyni a bolygó körüli pályát is, ezért szökési sebességnek nevezik.

7.2.2. Hőtan

A középiskolás hőtan tanítása elég egyszerű keretek közt marad, mivel elektromosságtannal együtt, egy évben tanítják. A tankönyv nagy részben a gázok állapotváltozását, a hőtágulást, a körfolyamatokat és a kalorimetriát tartalmazza. Az exobolygó irányú megközelítéshez leginkább közel álló hősugárzás emelt szinten is nagyon leegyszerűsítve van tárgyalva, a hó terjedése fejezetben (32).

Azért található pár dolog, ahol a hőtanhoz az exobolygók irányából lehet közelíteni.

A hőmérséklet fogalma, hőmérés

A hőmérsékletnek alapvető szerepe van abban, hogy egy exobolygó lakható lesz-e vagy sem. Ha a bolygó felszínén optimális, életnek kedvező hőmérséklet uralkodik – még a „Ritka Föld” hipotézis szerint is – nagy valószínűséggel kialakul az élet. A bolygó felszínén más-más hőmérsékletek uralkodhatnak, mivel a Nap különböző helyeken különböző szögek alatt süt a felszínére.

A hó terjedése, hőcsere

A hó melegebb testekről a hidegebbek irányába terjed, tehát a különböző hőmérsékletek ki akarnak egyenlítődni. Ahhoz, hogy hőcsere történjen, a testek kontaktusban kell legyenek.

A vörös törpék körül keringő bolygók nagy valószínűség szerint kötött forgásúak. Ezeknél a bolygóknál a nap felőli oldal túl forró, a sötét oldal meg mindig hideg. Mivel a két oldalt csak az atmoszféra egy vékony sávja köti össze, azon keresztül nem tud elég hő áramolni. A hőmérsékletek különbsége a sötét és a világos féltekén akkora, hogy azt a légmozgások sem tudják kiegyenlíteni.

A lakható exobolygóknak viszont megfelelően gyors tengely körüli forgásuk kell legyen ahhoz, hogy a sötét felük ne nagyon hűljön le addig, amíg újra sütni fogja a nap.

Halmazállapot-változás, fajlagos hőkapacitás

A 37. ábrán látható exobolygó a meleg lakható zónában csak rövid ideig tartózkodik, az ideje nagy részét az ellipszispálya olyan szakaszain tölti, ahol alacsony a hőmérséklet. A bolygón levő víz állapotváltozást szenved el, megfagy. Vajon fel tud olvadni ez a víz a lakható zónába érve? Tekintettel arra, hogy a vízjég fajhője elég magas, nem valószínű, hogy felolvad. Ha meg fel tud olvadni a rövidebb idő ellenére, az azt jelenti, hogy a meleg zónában túl nagy a forróság, ami a szárazföldi életet pusztítja el.

Kinetikus gázelmélet, a gázmolekulák mozgása

A gázok jellemző tulajdonsága az, hogy kitöltik a rendelkezésükre álló teret, mert a gázmolekulák addig, ameddig nem ütköznek, egyenes vonalú egyenletes mozgást végeznek.

Akkor hogy lehetséges, hogy nem „szöknek el” az úrbe? Úgy, hogy a hőmozgásukhoz tartozó sebességük kisebb, mint a bolygón érvényes szökési sebesség.

Azonban egy hőmérséklethez a statisztikai eloszlás szerint nem csak egy sebességtartományban levő részecske tartozik – vannak az átlagnál nagyobb sebességűek is.

Egy gázcsepe mozgási energiája $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ Ebből látszik az, hogy a könnyű molekulák, mint pl. a H könnyebben megszökhetnek az atmoszféra felső határán, még a Földön is. Ha a v_{k2} szökési sebesség egy exobolygón kicsi, az szép lassan elvesztheti az atmoszféráját.

A termodinamika második főtétele, entrópia

A termodinamika II. főtétele egy axióma, amire még nem találtunk ellenpéldát.

Régebbi megfogalmazásában azt jelenti ki, hogy egy rendszerben csak olyan irányú folyamatok játszódhatnak le, melyek a rendszert egyensúlyi állapotához közelítik. Ezért áramlik a hő a meleg test felől a hideg test felé, így nő a rendszer rendezetlensége.

Modernebb megfogalmazásban: a magukra hagyott rendszerekben olyan folyamatok játszódhatnak le, melyek a rendszer rendezetlenségét, entrópiáját növelik.

A Földön és az olyan exobolygókon, ahol élet van, negatív entrópiájú folyamatok játszódnak le: az élőlények növelik a rendezettséget, hiszen kivonják a tápanyagot a környezetükből és abból építik fel önmagukat. Ez a folyamat nem mond ellent a termodinamika II. főtételének. Az élet ugyanis nem egy magára hagyott rendszer, hanem folyamatosan vesz fel napenergiát, és annak felhasználásával növeli a rendezettséget.

7.2.3. Elektromosság

A fényév nagyságrendű távolságok esetén a gravitációs kölcsönhatás a meghatározó. Az elektromos kölcsönhatás egy bolygónál kisebb testek világában játszik fontos szerepet. Azonban található pár dolog, ami kapcsolható az eddigi megközelítéshez.

Elektrosztatika

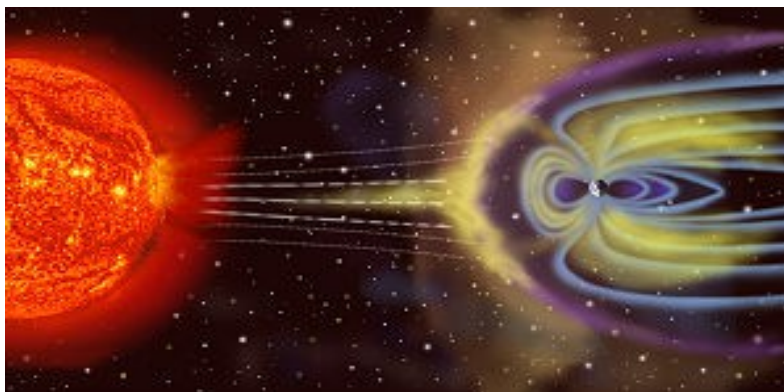
A születőfélben levő napok és bolygók egy akkréciós korongot hoznak létre. Modellszámítások is megerősítették, hogy az igen ritka porrészecskék nem hoznak létre akkora gravitációs erőt, amitől ezek elkezdenének csomókba tömörülni. Akkor mi hozza létre a csomósodást? Az ISS űrállomáson, súlytalanságban végzett kísérletek igazolták, hogy a meginduló csomósodás elektrosztatikus jelenségekre vezethető vissza (21). A részecskék összedörzsölődnek és vonzani kezdik egymást. Az elektrosztatikus vonzással összeállt csomók között, egy méret fölött, már elég nagy lesz a gravitációs kölcsönhatás is, hogy a csomósodás folytatódjon.

Mágnesesség – a Föld mágneses mezeje

A bolygók mágneses mezejének döntő befolyása van az illető bolygó lakhatóságára. A mágneses mező azáltal, hogy befogja a napszél töltött részecskéit a Van Allen övekbe, megvédi a Föld felszínét az ionizáló sugaraktól.

A Föld mágneses mezeje az olvadt vasmagjában keringő örvényáramoknak a következménye. A forgó Föld valószínűleg úgy működik mint egy dinamó. A folyamat elég

komplex, nem ismerjük minden részletét. De azért valószínű, hogy a feltevés helyes, mert a kihűlt bolygók körül nincs számottevő mágneses tér.



39. ábra. A Föld mágneses mezejének napszél elleni védő hatása (művészi rajz).
(http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%B6ldi_m%C3%A1gneses_mez%C5%91)

8.2.4. Optika

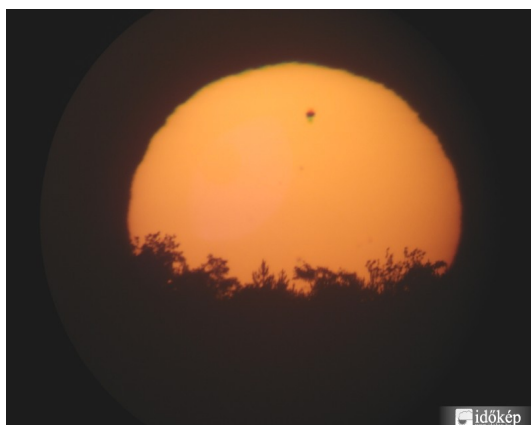
Az exobolygó kutatás fő műszerei, a távcső és a spektroszkóp, optikai eszközök. A tankönyvben (33) pont ez a két terület különösen röviden szerepel, ezért meg kell próbálni az optika egyszerűbb területeit is az exobolygók irányából megközelíteni.

A fény és az árnyék fogalmai – napfogyatkozás és bolygótranszit

A fénysugár útjába elhelyezett tárgyak árnyékot vetnek. Ide az árnyékkúpba nem jut fény. Ez a napsugár útjába tett tárgyra is igaz – de az árnyékukban azért nincs teljes sötétség, mert oda is jut szórt fény az égboltról. *Az űrben az árnyék teljesen sötét.*

Az egyik legmegdöbbentőbb fény és árnyék jelenség a teljes napfogyatkozás. A Hold teljes egészében eltakarja a Napot, mivel a Föld és a Nap közé kerül. Hasonló dolog történik akkor is, amikor egy bolygó, pl. a Vénusz halad el a Nap előtt. Tulajdonképpen *ez is egy kis „napfogyatkozás”*, csak a nagy Föld-Vénusz távolság miatt a kis takarás fel sem tűnik. De kormozott üvegen át szabad szemmel is látszik – fényképen pedig jól látható (40. ábra).

Az exobolygókat is hasonlóképpen figyelhetjük meg – egy *alig észlelhetően kis „napfogyatkozást” keresünk egy nagyon távoli csillag fényében. (Meglehető megközelítés)*

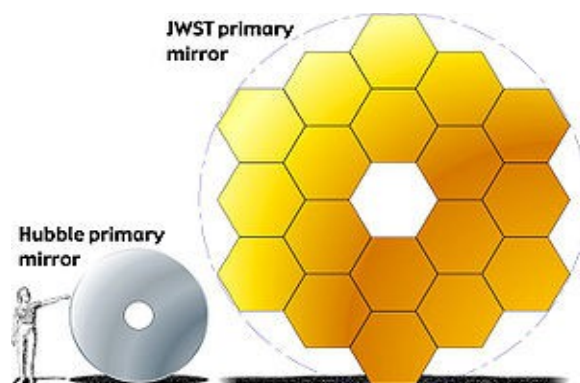


40. ábra. A Vénusz bolygó tranzitja a Nap előtt 2012. 06. 05-én, Pócsai Sándor felvétele.
(<http://www.idokep.hu/hirek/venuszt-avonulas>)

A fényvisszaverődés fogalma – tükrök, homorú tükrök képképzése

A tükrökről visszaverődő fény nem torzul úgy, mint egy lencsén áthaladó fénysugár. A homorú tükrökkel ugyanolyan valódi képeket lehet létrehozni mint a lencsékkel. Ezt az ötletet Newton használta ki, amikor megépítette kicsiny, olcsó, de az akkori korban relatíve nagy teljesítményű tükrös távcsövet.

A homorú tükrök a legfőbb alkatrészei a mai nagy teljesítményű tükrös távcsöveknek. Nélkülük elképzelhetetlen lenne exobolygókat találni (36. ábra).



41. ábra. Homorú tükrök: A Hubble és az JWST aranybevonatú tükrői. (http://hu.wikipedia.org/wiki/James_Webb_űrtávcső)

Tükrös távcsövek

A távcsövek, amiket a csillagászatban az exobolygók keresésére használunk, mind a Newton-féle tükrös távcsövön alapszanak. A mai távcsövek már sokkal nagyobb, összetettebb és érzékenyebb műszerek, mint amit Newton használt. Erre a legjobb példák a VLT Chilében, vagy a Hawai szigeteken, a Mauna Kea vulkán tetején levő hatalmas távcsövek: a Keck, a Subaru és a Gemini North távcsövei.

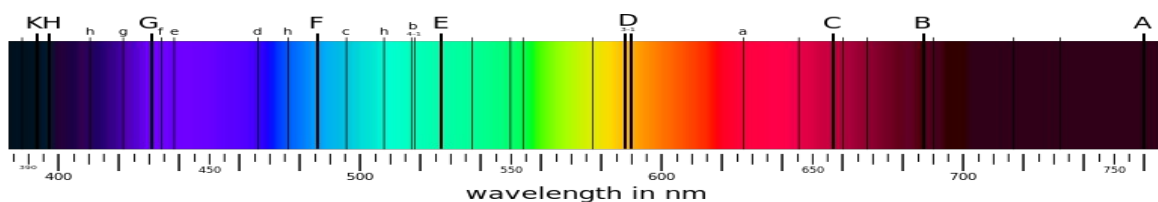
Az űrtávcsövek nagyon fontos előrelépést jelentettek a távcsövek területén. A Föld nagyságú exobolygók által okozott igen kis fényességváltozás pontos méréséhez űrtávcsövekre van szükség.

(Az 5.5.2.-5.5.4. fejezetek anyagát szakkörön lehet feldolgozni, az új óriástávcsövek, az űrtávcsövek egy igen széleskörű, izgalmas témát jelentenek.)

Színszóródás, színek, prizma

A prizma által felbontott színek nemcsak szépek, de erre épül az optikának egy igen fontos részterülete, a spektroszkópia.

A Nap által kibocsátott fény spektruma folytonos – azaz csak majdnem, mert sok fekete csíkot is láthatunk benne, ha felnagyítva nézzük meg. A fekete csíkok a különböző kémiai elemek által elnyelt fényhullámot jelentik. Ez az ún. elnyelési spektrum (35. ábra).



42. ábra. Abszorpciós spektrum. (Forrás: http://da.wikipedia.org/wiki/Fil:Fraunhofer_lines.svg)

Ezek a fekete csíkok képezik az exobolygó kutatás egyik alapját. A csíkok vörös vagy kék irányú eltolódásából tudunk következtetni a bolygója által „imbolygásra” készített csillag mozgására – a radiális sebességváltozás módszer segítségével (11. ábra). Ebből tudjuk kiszámítani az exobolygók tömegét, ami a sűrűségük meghatározásához kell. A sűrűség ismerete ahhoz kell, hogy megmondhassuk, hogy lakható-e az exobolygó. A kis sűrűségű gáz és vízbolygók nem lakhatóak, csak a nagyobb sűrűségű vas-szilikát bolygók.

8.3. A számolás fontossága a fizikában – Arisztarkhosz

A számítások fontosságát nem lehet eleget hangsúlyozni – ez egy nagyon fontos fizikatanítási cél. Ha nem sikerül példákkal illusztrálni, hogy mi múlik a számoláson, számításokon, a diákok a fizikai képleteket csak egy kerülendő rossznak fogják tartani.

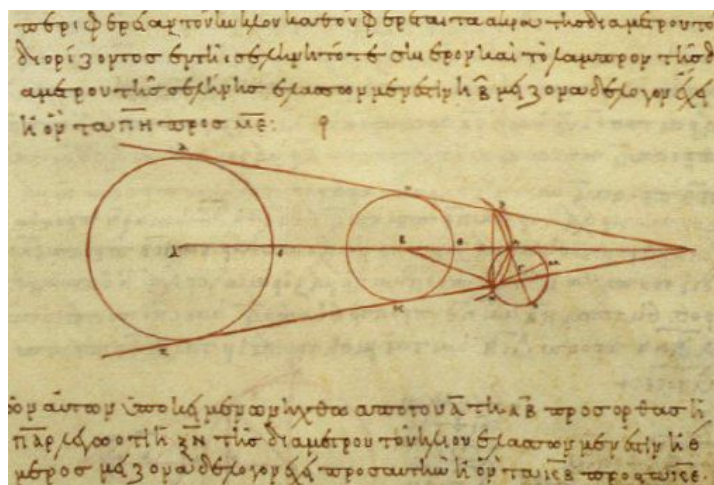
Nem tartozik szorosan az exobolygók témájába, de itt meg kell említeni Arisztarkhosz nevét, akit a kozmológia előfutárának lehet tekinteni – talán Kopernikusz is tőle kapott ihletet. Az ő példáján keresztül jól megmutatható, milyen fontos a számolás.

Szamoszi Arisztarkhoszt a nézetei miatt istenkáromlással is meg akarták vádolni – pedig ő csak logikusan végiggondolta a számításai következményeit.

Arisztarkhosz holdfogyatkozásokor megfigyelte a Föld árnyékának méretét, és arra a következtetésre jutott, hogy a Föld átmérője 2,85-szöröse a Holdénak. (A tényleges arány 3,67 – de az akkori eszközökkel ez is jó teljesítmény volt.)

Talált egy módszert arra is, hogy megbecsülje a Nap-Föld távolságot. Rájött, hogy félholdkor a Nap-Föld-Hold hármasszögű háromszöget alkot. A Nap-Hold közti szöget megmérte, és 87 fokosnak találta. Ebből kiszámolta, hogy a Nap-Föld távolság $1/\cos 87^\circ \approx 19,1$ -szerese a Hold-Föld távolságnak. De mivel a Hold a Napot pontosan eltakarja napfogyatkozásokor, ezért a Nap átmérője 19-szerese a Holdénak. Ebből következik, hogy a Nap $19/2,85 = 6,67$ -szer nagyobb a Földnél.

Arisztarkhosz számára logikus volt tehát, hogy nem a majd 7-szer nagyobb test, a Nap fog keringeni a kisebb Föld körül, hanem a Föld kering a Nap körül.



43.ábra. Arisztarkhosz számításai a Nap-Föld-Hold állásról (arab másolat).

(http://hu.wikipedia.org/wiki/Szamoszi_Arisztarkhosz)

Arisztarkhosz legnagyobb eredménye mai szemmel is lenyűgöző. Parallaxis mérésekből rájött, hogy az állócsillagok „végtelenül” messzebb vannak még a hatalmas Nap-Föld távolságnál is. Ezzel az eredményével annyira megelőzte korát, hogy magát a nagy Arkhimédész is fejcsóválásra készítette. Arkhimédész így írt erről: „...Előtted ismeretes, oh Gelon király, hogy a csillagászok Univerzumnak hívják azt a gömböt, amelyeknek közepében

a Föld van... De a számoszi Arisztarkhosz egy könyvet írt, amelyben néhány olyan hipotézis található ...hogya az Univerzum sokszorosan nagyobb annál, amit ma úgy hívnak. Az ő hipotézise az, hogy a Nap és a csillagok mozdulatlanok, és a Föld a Nap körül forog egy kör kerülete mentén...” (1).

A sors iróniája, hogy kb. 1800 évet kellett még várni, míg a tudomány újra eljutott erre a tudásszintre, pedig Arisztarkhosz gondolatmenete logikus és követhető volt, számolásait ellenőrizhették volna.

A fenti példa remek bizonyíték arra, hogy helyes megfigyelésekből, helyes számolással milyen fontos következtetéseket lehet levonni. Ez az egész fizikára is igaz.

8.4 Kitekintés

Szaktervezésben megpróbáltam bemutatni, hogy a földönkívüli élet, az idegen civilizációk témaköre milyen lenyűgöző – annyira, hogy még az Enrico Fermi komolyságú tudósokat is megihlette. Stephen Hawking, korunk egyik legismertebb fizikusa is több előadást szentelt a témának (34). Annyira érdekli az embereket a földönkívüli élet lehetősége, hogy a NASA Curiosity nevű robotjárműve az élet nyomai után kutat a Marson.

Évvel párhuzamosan az elmúlt másfél évtizedben jelentős előrelépések történtek az exobolygó kutatás terén. Valószínűsíthető, hogy az exobolygók utáni fokozott érdeklődés ugyancsak a földönkívüli életnek szól.

Mit hoz a jövő? Azt, hogy mit, nem annyira nehéz megmondani, mint azt, hogy mikor. Valószínűleg a közeljövőben eljutunk odáig az exobolygó kutatásban, hogy több, igazán optimális, lakható zónában keringő planétát találunk. Az, hogy mikor, az anyagi ráfordítások függvénye. Ha valamikor elég sok ilyen bolygó lesz a listánkon, és az egyiken talán oxigént is ki tudunk mutatni, még nagyobb kihívásoknak nézünk majd elébe.

Ezek a kihívások a jövő tudósgenerációjának kihívásai lesznek. Ezért lenne nagyon fontos, hogy a természettudományok oktatása ne folyamatosan sorvadjon. Ebben segítség lehet – pont a fizikatanulási kedv növelésével – az exobolygók témaköre.

Végezetül had fejezzem be a gondolatmenetemet egy idézettel, amely rávilágít arra, hogy a tudás megszerzésénél mennyire támaszkodni kell a motivációra:

„A képzelet fontosabb, mint a tudás. A tudás véges, de a képzelet felöleli az egész világot.” **Albert Einstein** (The Saturday Evening Post, 26 October 1929)

Irodalomjegyzék

- 1) Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete, Gondolat kiadó (1981)
- 2) Almár Iván, Galántai Zoltán: Ha jövő akkor világűr, Typotex Kiadó (2007)
- 3) Stephen Webb: Where is Everybody? – Fifty Solutions to the Fermi Paradox, Copernicus Books (2002)
- 4) Paul Davies: Egyedül vagyunk a világegyetemben?, Vince kiadó (1996)
- 5) Almár Iván: A SETI szépsége, Vince Kiadó (1999)
- 6) Margaret Turnbull: Target Catalog for SETI.
web.archive.org/web/20061109233818/http://skye.as.arizona.edu/~turnbull/HabCat.pdf
- 7) Dyson Sphere search program at Fermilab
http://home.fnal.gov/~carrigan/infrared_astronomy/Fermilab_search.htm
- 8) Meibom S. et al. : The same frequency of planets inside and outside open clusters of stars
<http://www.nature.com/nature/journal/v499/n7456/full/nature12279.html>
- 9) E. Petigura, A. Howard, G Marcy: Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars
<http://www.pnas.org/content/early/2013/10/31/1319909110.full.pdf+html>
- 10) E. Frost, S. Barrett, and Otto Struve: Radial Velocities of 368 Helium Stars
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1084541/>
- 11) ESO 0428 Science Release: Is This Speck of Light an Exoplanet?
<http://www.eso.org/public/news/eso0428/>
- 12) The Extrasolar Planet Encyclopedia – Catalog Listing, <http://exoplanet.eu/catalog/>
- 13) Sven Pieper: Exoplaneten, Springer Verlag (2011) DOI 10.1007/978-3-642-16470-5
- 14) Szatmáry Károly: Exobolygók, Magyar Tudomány, 2006/8
<http://www.matud.iif.hu/06aug/08.html>
- 15) The Microlensing Observations in Astrophysics (MOA) Collaboration: Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing
<http://www.nature.com/nature/journal/v473/n7347/full/nature10092.html>
- 16) Philip Ball: Earth-like planets probably water-logged
<http://www.nature.com/news/1998/030818/full/news030818-10.html>
- 17) Szabó Róbert: Bolygóáradat és asztroszeizmológia
<http://wwwold.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0904/szabo0904.html>
- 18) ESPRESSO Instrumental RV precision <10 cm/sec
<http://www.eso.org/sci/facilities/develop/instruments/espresso.html>
- 19) The James Webb Space Telescope, <http://www.jwst.nasa.gov/science.html>

- 20) Luciola hypertelescope space observatory
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2009ExA....23..463L>
- 21) Ray Jayawardhana: Strange New Worlds, Princeton University Press (2011) (epub)
- 22) Harald Lesch, Jörn Müller: A nagy Bumm. Második felvonás, Atheneum Kiadó (2006)
- 23) G. Gonzalez, D. Brownlee, P. Ward: The Galactic Habitable Zone
<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0103165>
- 24) P. Ward, D. Brownlee: Rare Earth – Why Complex Life is Uncommon in the Universe Copernicus Books (2000)
- 25) E. Berger, W. Fong, R. Chornock: Earth’s Gold Came from Colliding Dead Stars
<http://www.cfa.harvard.edu/news/2013-19>
- 26) Holtkamp, G.: Chaos bei Alpha Centauri. Numerische Experimente mit unserem stellaren Nachbarn. Sterne und Weltraum 3/2001
- 27) Feulner, G. (2012), The faint young Sun problem, Rev. Geophys., 50, RG2006, doi:10.1029/2011RG000375.
- 28) Jörn Müller, Harald Lesch: Woher kommt das Wasser, Chemie in Unserer Zeit 2003/37
doi: 10.1002/ciuz.200300282
- 29) TESS Science Goals and Drivers www.nasa.gov/pdf/606069main_Ricker_George.pdf
- 30) Hilbert Meyer: Unterrichtsmethoden II: Paxisband; Frankfurt, Cornelsen Verlag Scriptor (1997)
- 31) Csajági Sándor, Dr. Fülöp Ferenc: Fizika 9. Emelt szintű kiegészítésekkel, Nemzeti Tankönyvkiadó (2011)
- 32) Póda László, Urbán János: Fizika 10. Emelt szintű kiegészítésekkel, Nemzeti Tankönyvkiadó (2011)
- 33) Simon Péter, Dégen Csaba, Elblinger Ferenc Fizika 11. Emelt szintű kiegészítésekkel, Nemzeti Tankönyvkiadó (2011)
- 34) Stephen Hawking: Life in the Universe
<http://www.hawking.org.uk/life-in-the-universe.html>
- 35) Sarah Seager: Exoplanets_in_the_Post_Kepler_Era
www.cfa.harvard.edu/events/2013/postkepler/Exoplanets_in_the_Post_Kepler_Era/Program_files/Seager.pdf

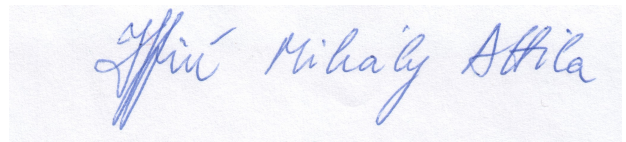
Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Székely Péternek, amiért ennél a szerteágazó témánál a lényegre koncentrálásban segített, a tippekért az irodalomkeresésben és az útmutatásért, amit adott, valamint türelméért, melyet a dolgozat elkészítése során kaptam tőle.

NYILATKOZAT

Alulírott, Iffiú Mihály Attila BSc levelező szakos hallgató, (ETR azonosító: IFMSAAT.SZE) „**A Fermi paradoxon, Föld-típusú exobolygók keresése és felhasználásuk a fizika tanításában**” című szakdolgozat szerzője, fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2014. május 10.



.....

a hallgató aláírása