

OTDT
XXXVII. OTDK
2024

Bolygórendszerek lakhatósága

Készítette: Tamási Csaba

Tartalom

Bevezetés.....	3
Elsődleges megjegyzések	4
Lakható exobolygók szűrése	7
Kísérletek és eszközök	12
Saját eredmények	14
További célkitűzések	18
Források.....	19

Bevezetés

Az élet más bolygókon való keresése mind filozófiai, mind tudományos szempontból az emberiség egyik kiemelt szellemi célkitűzése. Ha ugyanis életet találunk más bolygókon, az a tudomány rengeteg ágában bizonyosan gyökeres szemléletváltást fog előidézni. Ennek fő oka az lenne, hogy még mindig rengeteg kérdés tisztázatlan az élet megjelenésével és korai fejlődésével kapcsolatban. Ráadásul, ha minél több bolygón fedezünk fel minél magasabb fokú fejlettséget mutató életformát, annál több okunk lesz feltételezni, hogy nálunk fejlettebb, ránk esetlegesen ránk is nagy veszélyt jelentő civilizációk is létezhetnek.

Jelen kutatás egy olyan témakört érint, mely egy bolygó vagy egy hold lakhatóságát döntően befolyásolja, ez annak a bolygórendszernek a természete, amelyhez a vizsgált égitest tartozik. A bolygórendszer természetének fogalomköre kiterjed az anyacsillag típusára, a kiszemelt bolygók pályáinak elhelyezkedésére, keringésre, ill. gravitációs stabilitására, valamint a bolygótípus belső szerkezetére is.

A galaxis korát nézve (11 milliárd év), a fénysebességnél lényegesen kisebb utazási sebesség mellett is, fejlett, nagy kiterjedésű csillagközi civilizációk is elméletileg képesek lettek volna létrejönni, de ezek létezésére még nem kaptunk egyértelmű bizonyítékot. Példaként, a galaxisunkban elméletileg található magasan fejlett civilizációk számára egyszerű becslést adó Drake-egyenlet nagyszámú magasan fejlett civilizáció létezését sejteti. A tudomány az észlelt civilizációk hiányára több hipotézist is kidolgozott, az életnek az űrben történő esetleges jövődöbeli megtalálása több elméletet is lényegesen átformálhat, esetenként felülírhat. Lehet, hogy az eszközeink nem elég fejlettek, lehet, hogy a civilizációk sikeresen rejtőznek a többi elől, nem ismerve azok szándékait. Talán az egyik legjobban befolyásolt elmélet a „nagy szűrő” elmélete.

A nagy szűrő elmélete [1] arra alapoz, hogy a civilizációk, amelyek könnyen képesek végrehajtani az űrkolonizációt, ténylegesen ritkák. Ennek okául azt veszi, hogy van egy vagy több olyan biológiai és civilizációs „próbatétel” amelyet minden evolúciós fán levő fajok legalább egyikének ki kell állnia ahhoz, hogy eljusson az élet megjelenésétől, az élet fejlődésén és a társadalom megjelenésén keresztül az űrkolonizációt gyorsan végrehajtó civilizációig. Ezen próbatételek között vannak olyanok, amelyekben sok, és vannak olyanok is, amelyben majdnem az összes elbukik. Ez utóbbi, a „nagy szűrő”.

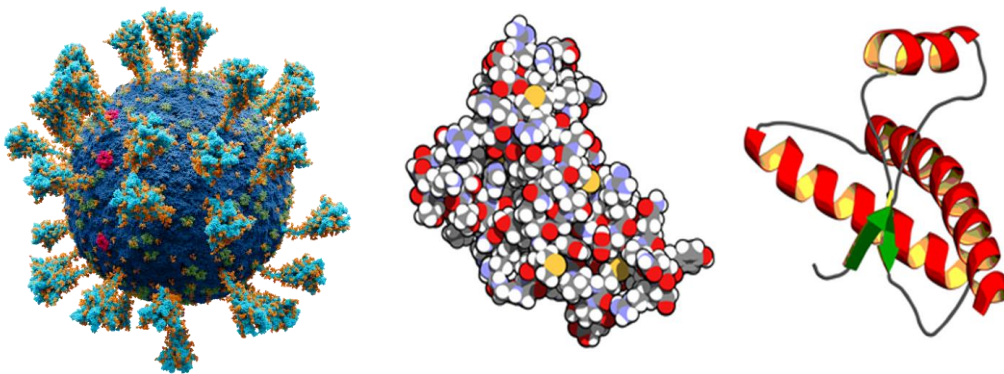
Amennyiben a „nagy szűrő” elmélet helytálló, akkor minél több olyan bolygót fedezünk fel, ahol az élet magasabb szintekig jutott, annál világosabb lesz, hogy a legnagyobb próbatételek még az eddigiek után következnek, és annál valószínűbb, hogy a csillagközi civilizációhoz vezető úton, a legnagyobb próbatételen a földi élet még nem esett át. Mivel nincs még bizonyíték arra, hogy egy civilizáció eljutott volna a csillagközi szintig, ez statisztikailag azt is jelenti, hogy az emberiség is nagyon kis eséllyel teljesítheti ezt a követelményt.

A kolonizáció kérdése jelenleg a nagyon távoli jövő kérdése, elsődlegesen a hatalmas távolságok és kozmikus veszélyek miatt, azonban nem tagadható, hogy egy magasfokú fejlettséget mutató civilizációnak saját jövője érdekében ezt a lehetőséget is komolyan kell vennie.

Elsődleges megjegyzések

Amikor a Világegyetemben keressük az életet, akkor már első lépésben egy fontos élettudományi akadályba ütközünk.

Mivel csak egyetlen evolúciós fát ismerünk, annak képességeivel és korlátaival, és amely egyben a sajátunk is, ezért hajlamosak vagyunk az életnek csupán ezt a formáját „elismerni” és így ilyen, vagy ehhez nagyon hasonló életformákat keresni a Világegyetemben. Ebből indulunk ki, amikor azt próbáljuk megállapítani, hogy melyek azok a körülmények, amelyek lehetővé teszik, hogy egy bolygón, vagy holdon az élet létrejöjjön és fennmaradjon. Lehetséges, hogy túlságosan szűk kereteket fogalmaztunk meg azzal kapcsolatban, hogy mit lehet életnek nevezni. Lehet, hogy DNS, vagy hasonló szerepet betöltő molekula nem is szükséges, csak nem tudunk róla, mert az életnek csupán ezt a formáját ismerjük.



Ábra 1 és 2: Vírusok és prionok.

A vírusokról és prionokról élőként való gondolkodás máig vita tárgya. Egyrészt, képesek magukat sokszorozni, de kell egy másik fajból származó élőlény ehhez. A vírusok sejteket fertőznek meg, és maradványaikból jönnek létre a vírusok alkotóelemei, a prionok pedig „hibásan” összehajtott proteinek, amelyek a saját eredetproteinük más „példányait” alakítják át saját maguk képében.

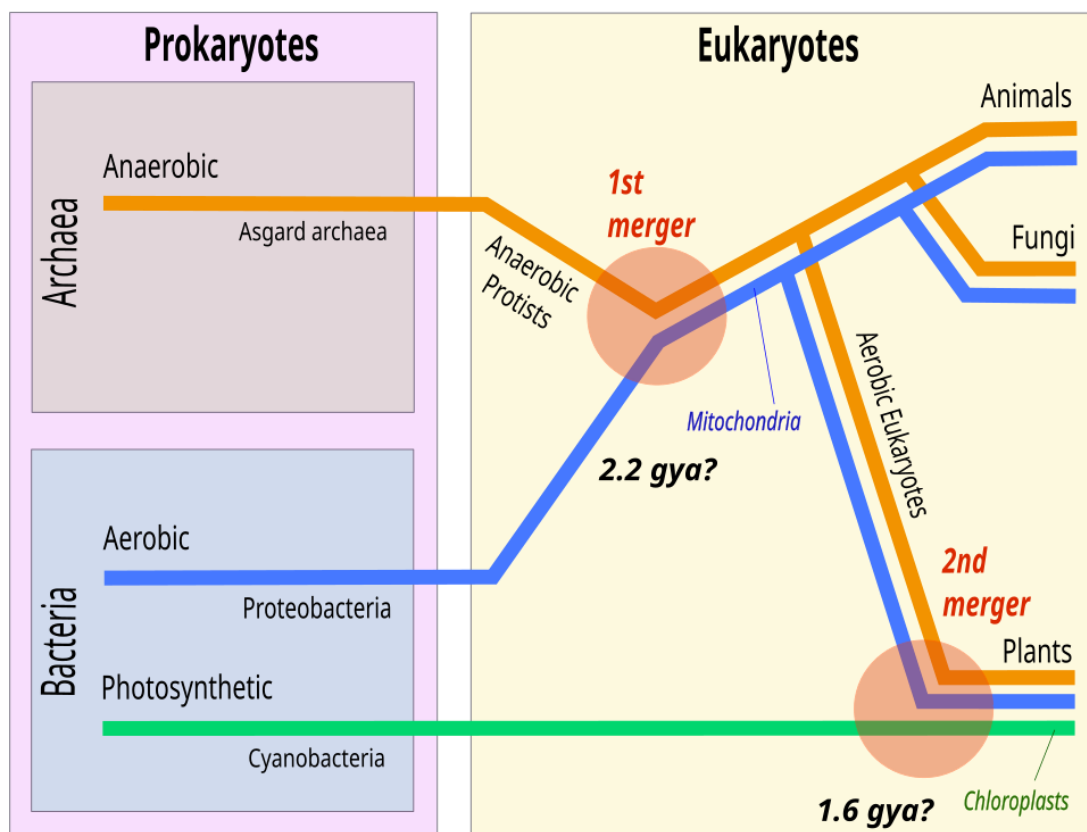
A vírusoknak van DNS-megfelelőjük, a prionoknak nincs.

[2], [3]

Képek forrásai: 1: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Coronavirus._SARS-CoV-2.png
2: <https://www.thermofisher.com/blog/food/prion-disease-and-the-safety-of-our-food-supply/>

Az élet korai fejlődésével és megjelenésével kapcsolatban máig léteznek lezáratlan kérdések. A Földön nagy valószínűséggel bekövetkezett a szimbiogenézis jelensége. Ennek a napjainkban tudományosan elfogadott jelenségnek a lényege, hogy néhány milliárd évvel ezelőtt két sejt szimbiózisba lépése után, egyetlen, bonyolultabb sejt jön létre, azután, hogy egyik sejt bekebelezi a másikat, anélkül azonban, hogy a bekebelezett sejtet „megemésztené”. Ez utóbbi

beépül az őt bekebelező „anyasejtbe”, illetve funkcióinak és génjeinek egy részét elveszíti vagy „átadja” az anyasejtnek. Ez az eukariótáknak a prokariótákból való kialakulásának evolúciósan legvalószínűbbnek tartott elmélete, melyet azóta több oldalról is igazoltak. Ahhoz, hogy ez megtörténjen, véletlenek hosszú, meglehetősen kis valószínűségű események láncolatának kellett végbemennie. A két, egymással szimbiogenetikus kapcsolatba kerülő baktérium fajának élettere részben meg kell egyezzen, olyan életműködések kell legyenek, amelyek ilyen típusú kölcsönhatásba lépve evolúciós előnyt kell biztosítsanak mindkét „részvevő” számára. Továbbá, egyik sejt sem emésztheti meg a másikat, és a sejtosztódásuknak szinkronizálódnia kell. Ha az elmélet helyes, ezek a követelmények, bár elvileg lehetővé teszik a szimbiogenezist, sokkal ritkábbá teszik a sikeres sejtegyesüléseket.



Ábra 3: Szimbiogenézis

Az ábrán láthatjuk a földi élet esetén feltételezett szimbiogenézis eseményekhez kapcsolódó hipotetikus időpontokat, előzményeket és következményeket. Láthatjuk, hogy az első szimbiogenézis feltételezett résztvevői az archeák anaerob „Asgard” törzséből, és a baktériumok anaerob „proteobaktériumok” törzséből származnak. Ebből lettek az állatok és gombák.

A második szimbiogenézis esetén a baktériumok fotoszintetizáló cianobaktérium törzséből épült be a már létrejött sejtbe egy újabb kis sejt, és vált sejtalkotóvá. Ebből az egyesülésből keletkeztek a növények.

Forrás: [4]

Kép forrása: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Symbiogenesis_2_mergers.svg

A komplexebb élet, amely feltételezhetően a szimbiogenézis eredménye, a becslések szerint a Föld keletkezése után 2,3 milliárd évvel jött létre.

Ezesetben, ha az élet létre is jön, lehetséges, hogy nem tud egy olyan formába fejlődni, amelyben eléggé befolyásolni tudja környezetét ahhoz, hogy hatásai által létezését észlelni tudjuk. Azt is meg kell említeni, hogy ha a pánspermia elmélet igaz, és az élet más bolygóról vagy holdról került a Földre, az nagyban megnehezíti az objektumok lakhatóság szempontjából történő szűrését. Ennek oka, hogy a bolygón vagy holdon, ahonnan a Földre kerülhetett az élet, lehetséges, hogy annak kialakulásához kedvezőbb körülmények szélesebb tartományokban mozogtak, és az élet kezdeti formája ezeket átvészelte, mielőtt a Földre került (Azt is fontos megjegyezni, hogy az élet megjelenésekor a Földön uralkodó körülmények tekintetében is sok a bizonytalanság, a feltételezés). Ez azt jelentené, hogy az élet az előző bolygón uralkodó, földi élet szempontjából lényegesen mostohább körülményeket is képes túlélni, és a Földre történő érkezése után, az új körülményekhez alkalmazkodva, feltehetőleg elveszítette ezeket a képességeit. Tehát lehet, hogy túl szűkre szabjuk a földi élet kialakulásához kedvezőnek tartott körülmények tartományát, amikor az földönkívüli élet keresésére indulunk.

Ezért, amikor azt mondjuk, hogy leszűkítjük a keresést az földönkívüli élet megtalálásához, akkor az általunk ismert életnek otthont adó körülményeket feltételezhetően biztosító bolygókra, holdakra gondolunk, csupán ezekre tudjuk leszűkíteni a keresést, mért asztrofizikai tulajdonságaik alapján.

Lakható exobolygók szűrése

Az élet szempontjából fontos kedvező élettani körülmények mellett meghatározó fontossággal bírnak az asztrofizikai és planetológiai szempontok. Ugyanis a bolygók és holdak tömege, mérete, „geofizikai” szerkezete döntően befolyásolja azokat a biológiai feltételeket, melyek jelen ismereteink szerint az élet kialakulásához, fennmaradásához és fejlődéséhez nélkülözhetetlenek.

Az elkövetkezendő néhány sorban röviden összefoglalhatók azok a döntő asztrofizikai és planetológiai mennyiségek, melyek meghatározzák a bolygón található, fizikai és kémiai szempontból meghatározó körülményeket.

Minél nagyobb egy adott bolygó tömege, annál nagyobb a belső nyomása, ami több szempontból is lényeges szempont.

Minél nagyobb a bolygó anyagának tömegéből származó belső nyomás, annál nagyobb a belső hő, melynek belső áramlása állandó hőenergiaforrást jelent az élet számára.

Továbbá, ha elegendően nagy a belső, olvadt kőzetanyag konvektív áramlása, a bolygó forgó, magas vas- és nikkeltartalmú magja mágneses mezőt fog létrehozni, mely erős védelmet biztosít a csillagból származó töltött részecskékből álló csillagszél ellen.

A belső hőforrások mellett azonban égi mechanikai belső fűtési mechanizmusok is léteznek, ezek közül az árapályhő döntő fontosságú lehet. Példaként, a Jupiter Ió holdjának vulkáni aktivitása kizárólag erre a jelenségre vezethető vissza.

Az árapályhő megjelenésének oka elsődlegesen a bolygópálya geometriai sajátosságaira, a fél-nagy tengelyre és a pálya excentricitására, „lapultságára” vezethető vissza.

Nagyon ritka kivételek mellett kijelenthető, hogy a bolygók és holdak pályái nem kör alakúak. Ezért, ahogy egy adott hold közelebb-távolabb kerül a bolygótól, enyhén változik a holdra ható gravitáció, ennek következtében a hold enyhén deformálódik, ez hőt kelt, amely helyettesítheti a belső nyomást mint belső hőforrást. A Jupiter Galilei-holdjainak mindegyike árapályfűtött, azonban csak a Callisto helyezkedik el a gázóriás sugárzási zónáján kívül (a bolygók magnetoszféráján belül vannak régiók, ahol „megreked” a csillagszélből származó sugárzás. Erős mágneses mező esetén ez azt jelenti, hogy amennyiben léteznek, az eltérített csillagszél töltött részecskéi a holdak irányába is mozoghatnak, amennyiben a holdak nem rendelkeznek saját mágneses erőterrel. A nagyintenzitású mágneses erőter elsődlegesen a gázóriásokra jellemző.



Ábra 4: A négy Galilei-hold.

Belülről kifelé/jobbról balra: Io, Európa, Ganümedesz, és Callisto. Az Io felszínén észrevehető rengeteg vulkán, színét a vulkanikus úton felszínre kerülő anyagok, beleértve a kén adják, az Európa felszínén látható a jég réteg.

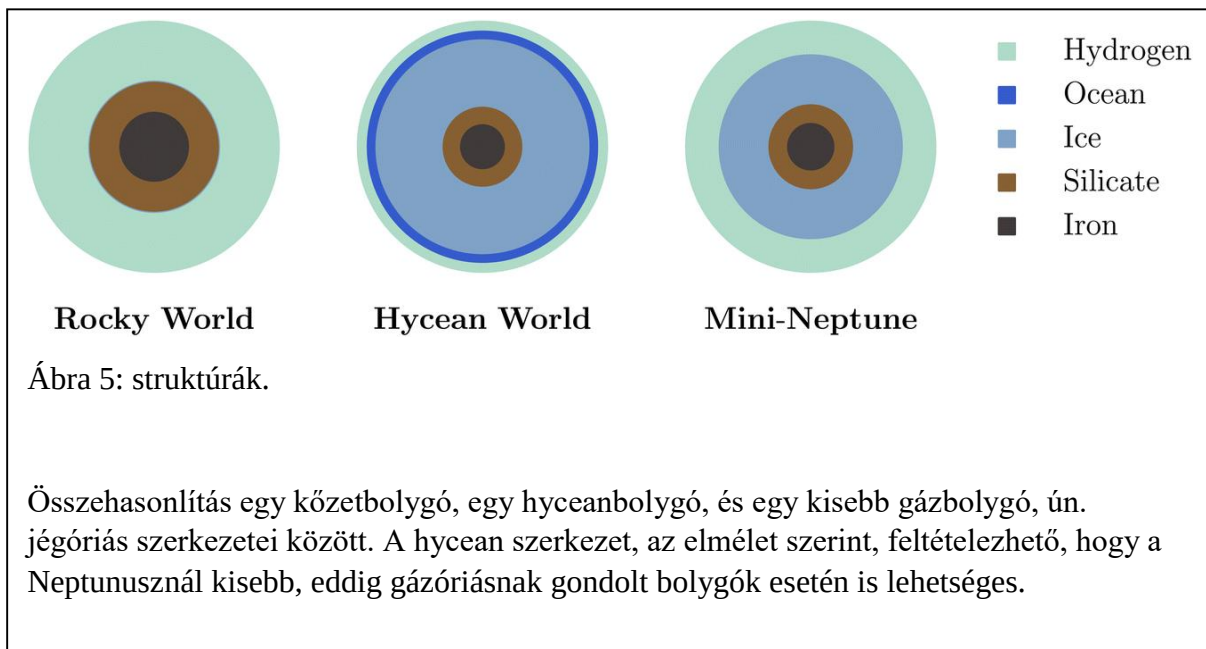
Kép forrása:

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01299>

A fentiek alapján, ha van egy Jupiter típusú bolygónak egy vagy több holdja, akkor valamennyi holdon csak akkor maradhat fenn élet, ha az adott holdak is rendelkeznek magnetoszférával, még akkor is, ha a holdak a bolygó magnetoszférája belsejében vagy annak a szélén helyezkednek el. [5] Az Európa hold, mely mélyen az anyabolygó magnetoszférájában található, és nem rendelkezik saját mágneses erőterrel, mégis otthont adhat az életnek, mert a vastag jég és esetleg vízrétegje képes lehet a töltött részecskékből álló sugárzás elleni védelemre, egy feltételezett felszín alatti óceánban hipotetikusán jelenlévő élet számára. [6]

Fontos megemlíteni a Hycean bolygótípust. Ennek a bolygótípusnak a létét egyértelmű bizonyítékok hiányában jelenleg még csak feltételezzük, de létezése planetológiai szempontból nem zárható ki. Ez a bolygótípus elméletileg átmenetet képez a kőzetbolygók és a gázbolygók

között. A kőzetbolygók egy szilárd kőzetből álló testtel, és egy, azt közel gömbszimmetrikusan körülvevő vékony gázréteggel rendelkeznek, amely a légkör szerepét tölti be. A gázóriások a kőzetbolygók átmérőjénél valamivel nagyobb méretű szilárd kőzetmaggal rendelkeznek, melyet cseppfolyós halmazállapotú fémes hidrogén vesz körül, és amelyet cseppfolyós



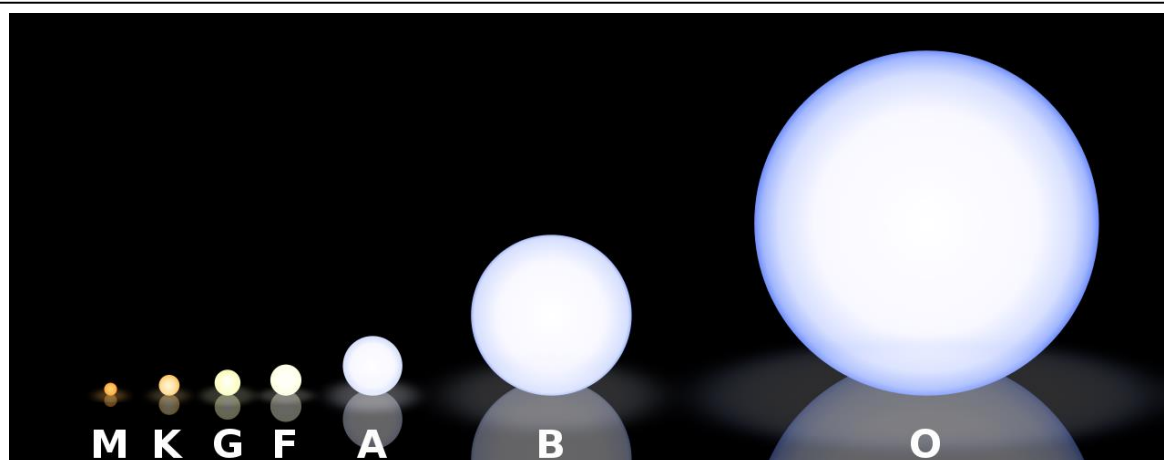
halmazállapotú, de nem fémes hidrogén „óceán” ölel körül. Efelett gáz halmazállapotú hidrogénből álló atmoszféra található, melynek vastagsága kb.

1000km, végül pedig a légkör felső struktúráit egy felhőréteg választja el a környező űrtől. A két struktúra között képez átmenetet a Hycean bolygótípus. A kőzetbolygók kőzetteste és a gázbolygók kőzetmagja közötti mérettartományban mozgó kőzetmag jellemzi. Ezt mély, cseppfolyós halmazállapotú vízből álló óceán vesz körül. A légkör vastagsága szintén a két ismert bolygótípus méretei közti átmeneti tartományba illeszkedik, összetételét tekintve elsődlegesen hidrogénből áll a jelen hipotetikus bolygótípus esetében. A nagy atmoszferikus nyomás miatt a víz nem párolog el és nem fagy meg, a hidrogénlégkör megvédi az életet a töltött részecskék sugárzásától, nagyobb hőmérsékleten pedig gyorsabban mennek végbe azok a reakciók, amelyek a kezdeti biokémiai folyamatok bekövetkezésének szempontjából meghatározó fontosságúak lehetnek. A hipotetikus bolygótípus megnevezése egy szóösszetétel: Hy (hidrogén) cean (ocean). [7]

A bolygók égimechanikai, geomorfológiai és szerkezeti vizsgálata mellett a bolygórendszer lakhatósága szempontjából az anyacsillagok szűrése is kiemelt fontosságú, mivel ezek a bolygók elsődleges külső energiaforrásai, és amelyek tulajdonságai a bolygó felszínén fejlődő élet szempontjából döntő jelentőséggel bírnak.

Első probléma a sugárzás, ennek két elsődleges tulajdonsága az intenzitása és a színe, azaz spektruma. Utóbbi a csillag által az elektromágneses színek különböző tartományaiban kisugárzott energiának a hullámhossz szerinti eloszlását írja le. A sugárzási energia hullámhossz szerinti eloszlása egy univerzális törvénynek, az abszolút feketetest sugárzást a teljes színek tartományban elméletileg leíró a Planck-féle görbének felel meg igen jó

közelítéssel. Ennek a görbének a hullámhossz szerint felírt alakja a csillag légköre abszolút hőmérsékletének bonyolult, de matematikailag egyértelmű függvénye. A csillag hőmérsékletét



Ábra 6: hét típus.

Egy szín-és méretösszehasonlítás a csillagtípusokról. Ezeken a színeken, és méreteken maradnak a csillagok, típusaik szerint, léttartamuk nagyrésztében. A csillagok felszíni hőmérsékleteik alapján sorolhatók színeképcsoportokba. A csillag látszó színe korrelál a légköre hőmérsékletével. Így a legkisebbtől a legnagyobb hőmérséklet felé haladva a színük alapján sorolhatjuk be a csillagokat az alábbi színeképcsoportokba: M: vörös törpék, K: narancs és sárga csillagok, G: sárgák és fehérek (ilyen a nap), F: fehérek, A: kisebb kékesfehér, B: nagyobb kékesfehér, O: kék óriás.

spektrumának az adott eloszlású, ismert hőmérsékletű elméleti Planck-spektrumhoz legjobb illesztésével határozzák meg. A csillagszínekben található vonalakat a csillag légkörében található elemek és/vagy molekulák határozzák meg, relatív sűrűségüknek és ionizációs állapotuknak megfelelően. Ez a csillagok színekép szerinti típusokba sorolhatóságának elméleti alapját adja meg.

A különböző típusú csillagok különböző mennyiségű és hullámhossz tartományonként különböző mértékű sugárzásban részesítik bolygóikat.

Az életet létrehozó biokémiai kötések szempontjából pusztító hatású nagyenergiájú sugárzások a magasabb hőmérsékletű csillagokra jellemzők, ezek energiájuk nagy részét a szerves molekulák kötéseit szétzúzó energiatartományban sugározzák ki. Emiatt az O, B és A csillagok közelében nem valószínű DNS alapú élet, így ezek kiszűrése első körben meg is történt.

Ugyanakkor az elektromágneses sugárzás mellett a csillagok váltakozó mértékű és erősségű csillagszelet is kibocsátanak, ez töltött részecskék árama. Bizonyos típusokba tartozó csillagok (a kizártakon kívül az M típusúak) által kibocsátott csillagszéllal szemben már egy igen erős mágneses mező sem nyújt védelmet. Így a csillagok szűrésének második erős szempontja a csillagszél erőssége, ezzel ismételtén kiszűrve a második körben az M színeképűeket is. [8]

A harmadik szűrési szempont égimechanikai jellegű, és a bolygónak az anyacsillag körül vett keringését veszi alapul. Ha egy bolygó közel kering a csillagjához, akkor az utóbbi árapályerői lelassítják a bolygó forgását, és emiatt kötött keringésű lesz. Ez azt jelenti, hogy mindig ugyanazt az oldalt mutatja a csillaghoz felé. Jó példa kötött keringésű rendszerre a Föld-Hold,

melynek következtében égi kísérőnk felszínének maximum 59%-át látjuk, a többi pedig a „Hold sötét oldala”. Ha ez történik egy bolygó és az anyacsillaga esetében, azt eredményezi, hogy egy hideg és egy forró féltéke jön létre, a kettő között pedig hatalmas viharok hivatottak a hőkiegyenlítést elvégezni. Kisebb csillagok esetén az a távolságtartomány, ahol ez a típusú kötött keringés kialakulhat, egybeeshet a lakható zónával, így, ha ebben a távolságban keringenek bolygók, lakhatóságuk jelentős mértékben lecsökken.

	Csillag típus	M	K	G	F	A	B	O
Bolygó típus								
Szub-föld (Merkúr, Mars)								
föld								
szuperföld								
hycean								
Kettősbolygó	?							

	hold tömeg	Szub- föld	Föld	Szuper- föld	Hycean
Bolygó					
Szub-föld (Merkúr, Mars)		Kettősbolygó			
föld			kettősbolygó		
szuperföld				kettősbolygó	
hycean					kettősbolygó
Szub-neptunusz					
Neptunusz-szarturnusz					
Jupiter					
Szuper-jupiter					

Ábra 7 és 8: kompatibilitás.

Itt láthatunk két táblázatot a bolygók és csillagok (8-as ábra), valamint bolygók és holdak (9-es ábra) kompatibilitásairól, az élet fenntartásának szempontjából. A sötétzöldtől (legesélyesebb) a vörösre leg esélytelenebb. A Földnél kisebb (szub-Föld) bolygók esetén a magnetoszférák gyengék, ezért azokat ki kell venni, ezért azokba a méretkategóriákba tartozók esetén kisebb százalék az élettel valószínűleg rendelkezők száma. A két ábra saját.

Az élet huzamos fennmaradásához szükséges feltétele a bolygó pályájának időbeli stabilitása. Ennek azonban égi mechanikai feltételei mellett fontos szempontja, hogy a bolygó gravitációs stabilitását a többi égitesttel való esetleges ütközése se befolyásolja.

Ehhez az első fontos feltétele, hogy a bolygórendszert is tartalmazó törmelékkorong mechanikailag stabil rendezett legyen, így közép- és hosszútávon a nagyobb égitestek ütközése ne következzen be.

A bolygórendszerek kialakulásának első fontos szakasza, egy gázkorong létrejötte a kialakuló csillag körül, ennek egy része molekulákká, azok pedig porrá, majd a pornak egy része közzé sűrűsödik össze. Ezek ütközései következtében, összetapadás útján nagyobb testek jönnek létre, de ezek nem mindig jutnak el a bolygó méretig. A törmelék képező kisebb testek megmaradnak, és belőlük alakulhatnak ki törmelékkorongok, és a mi Naprendszerünkben két ilyen is van. Fontos, hogy a törmelékkorong nem csak távol legyen az élettel rendelkező

bolygótól/holdtól, de rendezett is legyen, különben a becsapódási események gyakorisága megnő. Ennek oka, hogy a rendezetlen keringésű törmelék testek nagyobb valószínűséggel ütközhetnek a lakható bolygóval/holddal, és az ütközésükből származó másodlagos, ütközési törmelék mozgása még kevésbé lesz rendezett, és ismét becsapódhat a bolygóba/holdba.

A bolygórendszer, illetve a törmelékkorong rendezése megvalósulhat a keringési rezonancia jelensége által. A rezonancia a csillagászatban azt jelenti, hogy két test keringési időinek aránya kifejezhető két alacsony értékű egész szám arányaként. A „törmelékdarabok” távolság szerinti, illetve térbeli eloszlását a korongban az adott rendezőbolygóval való rezonancia határozza meg. [9]

A rezonancia a bolygók pályáit stabilabbá teszi, így az egész bolygórendszer stabilitására összességében pozitívan hat ki.

Kísérletek és eszközök

Mindezeket figyelembe véve, kísérleteket végeztem a Universe Sandbox nevű gravitáció szimulációs programban, mely ugyan nem hibátlan, azonban a számomra elérhetőek közül kétségtelenül a legjobb. A bolygórendszer élıhetőségére vonatkozó adatokat a központi csillag és a körülötte keringő égitestek pályáinak meghatározásával számolja ki. A központi égitest által kibocsátott sugárzás természete és intenzitása határozza meg a lakhatósági zóna határait. Az élıhetőségre vonatkozó legfőbb követelmény, hogy az adott bolygó pályája ezen a tartományon belül stabilan helyezkedjen el. Az adott pályájú bolygó élıhetőségét, felszínén uralkodó hőmérsékleti tartományt a mind a bolygó pályájának sajátosságai határozzák meg. Ezt, és ennek időbeli stabilitását meghatározóan befolyásolhatják a bolygórendszer további égitestei, így a földi élet számára szükséges földpályára vonatkozó feltételeket is. Az égitestek közötti égi mechanikai kölcsönhatások és a bolygók pályáinak időbeli változásainak meghatározása a klasszikus, Newtoni gravitációs törvény felhasználásával, az ún. N-test probléma kisszámú égitestre történő numerikus megoldásaival történik, figyelembe véve a törmelékkorongok hatását a bolygópályára. Az algoritmusok több-féle módon végzik el a pályaelemek idő szerinti változását, azok meghatározását időléptetéssel az ún. integrátorok segítségével végzik. Egy szimuláció nagyszámú lépést feltételez és az integrátorok megfelelő kiválasztása befolyásolja az adott feladat számára lépésköz hosszát és a számítás megbízhatóságát. A programban hét integrátor található: PEFRL, RK2, explicit Euler, fél implicit Euler, Monk, Forest- Ruth, velocity Verlet, ezek közül lehet válogatni annak függvényében, hogy az eredmény gyorsan elérhető, de kevésbé pontos vagy inkább lassan, de pontosabb legyen. Ugyanis folyamatosan kompromisszumot kell kötni a gyorsaság és a pontosság közt, az erőforrások milyensége és a rendelkezésre álló idő alapos figyelembevételével. A program a lakható zóna méreteit nem csak az alapján számolja ki, hogy egy adott csillagtól mekkora távolságban lenne folyékony a víz (amely a lakható övezet tényleges igen/nem alapú megállapítási módszere), hanem az alapján is, hogy egy adott bolygón uralkodó körülmények mennyivel tolják a lakható övezetet a csillagtól távolabb/közelebb. Az elvégzett szimulációs kísérletek lényege annak megállapítása, hogy mennyire kell stabil legyen egy rendszer az élet tartós fennmaradásához. A kísérletek során az égitestek kiválasztása után, figyelembe véve a bolygórendszerekről, és lakható bolygókról ismert tulajdonságokat, olyan

rendszereket hoztam létre, amelyekről feltételeztem, hogy bizonyos okoknál fogva kevésbé stabilak, és változékonyak. A program futása törmelékkorong jelenlétében sokkal lassabban és csak rövid időlépésekkel lehetséges, mert rengeteg apró égitest hatásával is számolnia kellene. Továbbá, egy adott időtartamon lefuttatva, annak ellenére, hogy más tényezők elfogadható kereteken belül maradnak, a hőmérséklet sokkal nagyobb intervallumokon mozog, ha „gyorsabban”, nagyobb lépésközzel futtatunk le ugyanakkora időtartamot, függetlenül attól, hogy változtak-e a körülmények. Ez azt eredményezheti, hogy a gyorsan történő futtatás során túlságosan eltolódhat egy égitest hőmérséklete a reálistól, mire a lassabb futtatásra váltunk, azt előidézve, hogy ha időközben megváltoztatjuk a lépésközt, akkor a nagy lépésközü, gyors futtatás utáni lassú futtatás esetén is jelentős mértékben hibás eredményeket kapunk. A program, bár képes grafikonon ábrázolni az égitestek tulajdonságainak időbeli változását, és több test esetén egy grafikonban ez össze is hasonlítható, a grafikonok egy adott idő után hirtelen elkezdik lassítani a szimulációk futását. A grafikonok lekapcsolásával és újra létrehozásával megszűnik a probléma, azonban az új grafikon a saját létrehozásának időpontjától mutatja az adott tulajdonság változását. Ez azt jelenti, hogy a gyorsaság előnyben részesítése esetén rövidebb időtartamokhoz tartozó, részgrafikonokkal tudunk csak dolgozni. Gyakran megtörténik, hogy a grafikonok maguktól indulnak újra, vagy tolódnak el, törölve a korábbi adatok egy részét újak befogadásáért.

A program törekszik Newtoni gravitáció használatával a valósat megközelítő eredményeket adni, mely értelemszerűen az idő előrehaladtával egyre kevésbé pontos. Lehetséges különféle típusú csillagok, bolygók, aszteroidák közül választani, és tetszőleges nyújtottságú, dőlésszögű pályákon elhelyezni őket. Lehet különböző sebességeken futtatni a programot, és a valósághűség kiválasztott mértékétől függően a program egy bizonyos sebességen felül nem engedi a felhasználónak gyorsítani, annak érdekében, hogy ne változzon el a valósághűség értéke a felhasználó által megszabottól.

Saját eredmények

Váratlan eredmény született, ugyanis kiderült, hogy létezhetnek hosszútávon stabil rendszerek, amelyekben a lakhatósági zónán belül keringenek földtípusú bolygók, ám ennek ellenére az élet megjelenése ezeken az égitesteken lényegesen nagyobb kihívásokba ütközik.

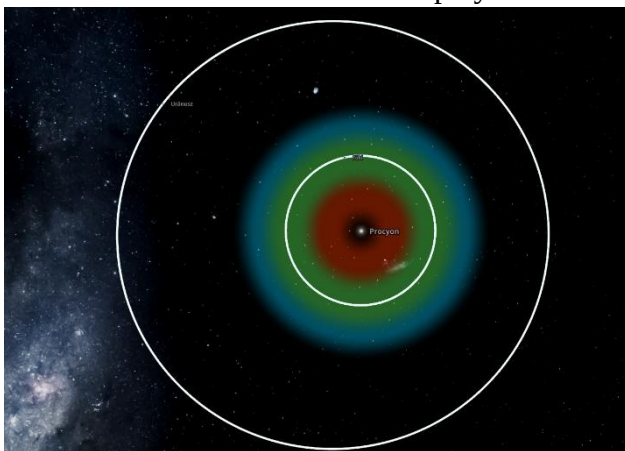
Az egyik kísérlet során egy kéttagú bolygórendszerben egy ismétlődő jelenségre figyeltem fel.

A kísérletben használt rendszer részei egy naptípusú csillag, ennek lakható zónájában kering egy földtípusú bolygó, kerek pályán, távolabb a csillagtól kering egy gázbolygó, elnyújtott pályán.

Az elnyújtott pályákról fontos megjegyezni, hogy a pálya megnyúlásának iránya fokozatosan változik. Ezt ahhoz lehet hasonlítani, mintha egy korongra úgy rajzolnánk egy ellipszist, hogy az egyik gyújtópontja a korong középpontja, és megforgatnánk a korongot. Ez a bolygók kölcsönhatásai nélkül is megtörténik. A pályák forgási sebessége függ a bolygók pályájának nyújtottságától, a csillagtól való távolságától, és a keringési időtől. Ahogy „forog” a belső bolygó elnyújtott pályája, és a megnyúlás iránya közeledik a külső bolygó pályájának elnyúlási irányához, egyre elnyújtottabb lesz, majd ahogy attól eltávolodik, a megnyúlás lecsökken, és ahogy az azzal ellentétes irányhoz ér, majdnem egészen kerek is lesz. Ez a folyamat folytonosan ismétlődve zajlik le.

A kísérletet elvégeztem többször is, először annak érdekében, hogy újra létrehozzam a történeteket, később annak érdekében, hogy módosításokat eszközöljek a rendszeren, beleértve a csillag tömegét, és egy harmadik bolygó jelenlétét. A kísérleteket úgy lefuttatva, hogy egy másik bolygó is szomszédos a Föld analóggal, változatos eredményeket adott. A csillag tömegének növekedésével csökken a megnyúlás is, azonban a csillagok, amelyek esetén az elnyúlás feltételezhetően elhanyagolhatóbbá válik, azok már olyan típusokba (nagyobb F típusúak és azoknál nagyobbak) tartoznak, amelyek sokkal nagyobb mennyiségű sugárzásban részesítik bolygóikat, mint a Nap a Földet. [10]

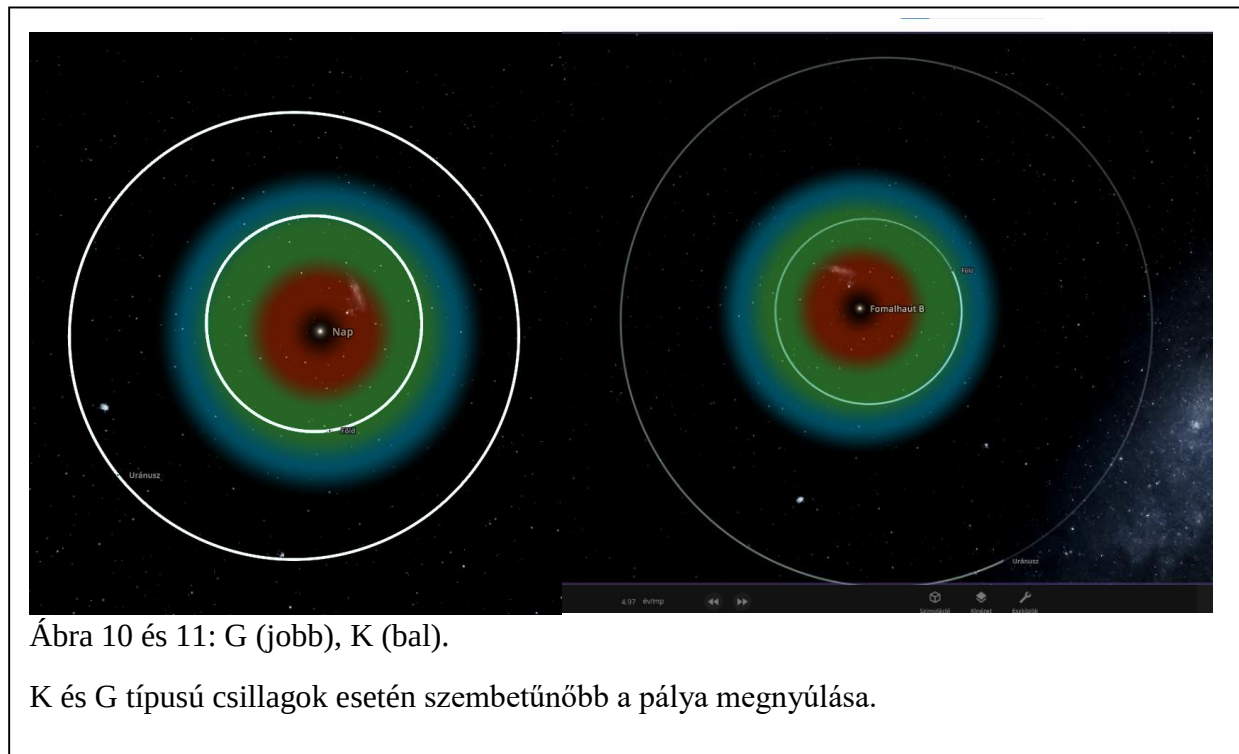
A fent említett következtetések a pályák vizuális véleményezése alapján történt:



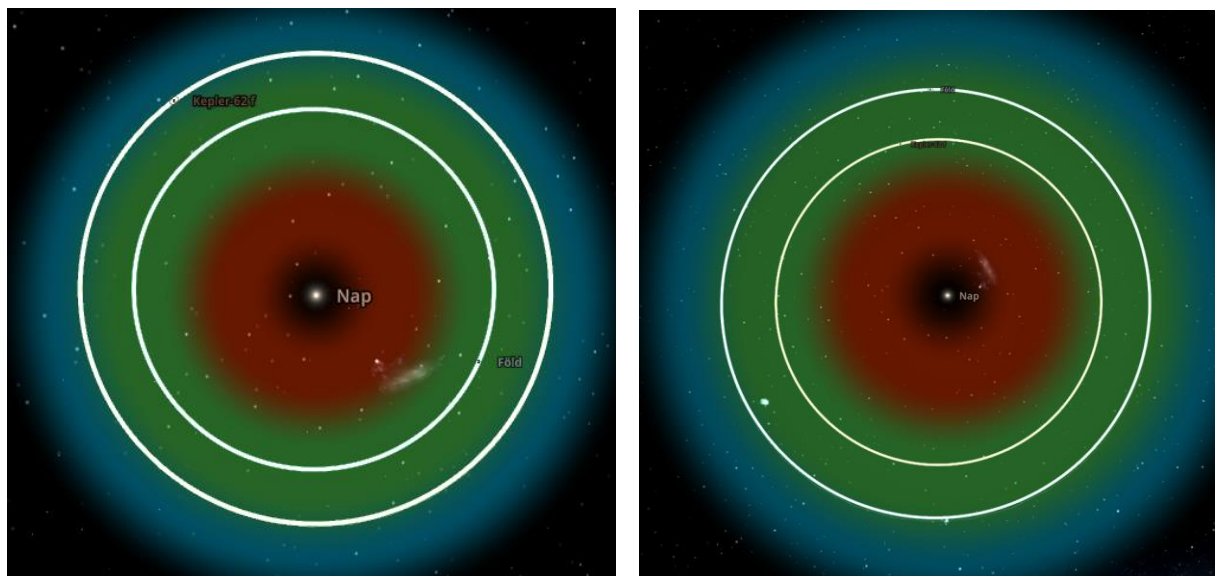
Ábra 9: F.

F típusú csillag, a földtípusú bolygó pályája, ha nyújtott is, elhanyagolható mértékben.

Ez, és hasonló ábrák, képernyőképek a programból.



A szomszédos bolygóval kapcsolatos vizuális véleményezés:

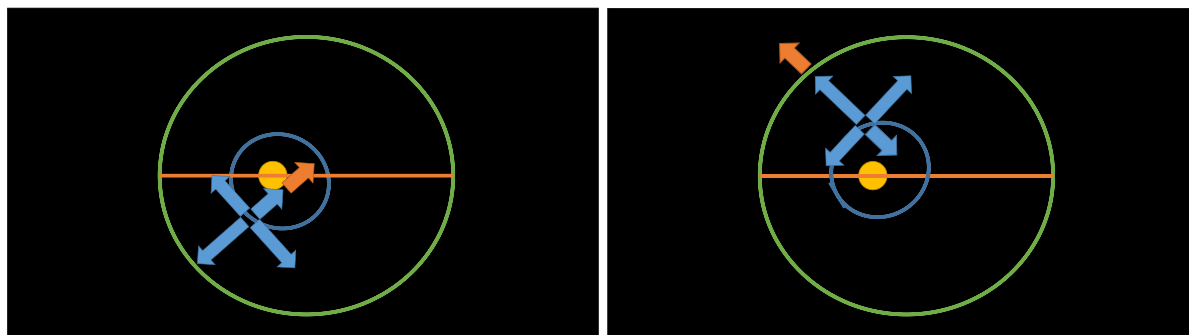


A szomszédos bolygó tömege 3-szorosa a Földének. Láthatjuk, hogy amikor a nagyobb tömegű kőzetbolygó kívül, (bal ábra) a befolyásoló bolygó és a földtípusú között helyezkedik el, akkor a megnyúlás elhanyagolható, ellenkező esetben (jobb) mindkét pálya megnyúlhat.

A későbbi kísérletek a pontosabb adatgyűjtésre szolgáltak. A Monk, és Verlet sebesség integrátorokkal futtattam G és K típusú rendszereket, amelyek mindegyikében két bolygó volt. Mivel a Verlet sebesség integrátor esetén a szimulációk lassabbak voltak, numerikus szintű adatgyűjtés a további esetekről nem volt lehetséges.

Monk	Földtípusú		gázbolygó	
	Kezdeti távolság	Végső excentricitás	távolság	excentricitás
G	1,01	0,0866	3.36	0,112
K	0,436	0,1	1,25	0,112
Verlet	Földtípusú		Gázbolygó	
	Kezdeti távolság	Végső excentricitás	Távolság	excentricitás
G	1,01	0,0785	3,36	0,112
K	0,436	0,085	1,25	0,112

Mindkét integrátor esetén ugyanez a folyamat játszódott le, a pályák megnyúlásai nagyobbak voltak 0,075 excentricitásnál a verlet sebesség integrátorral. A monk integrátorral ez 0,09 volt. Mindkét érték nagyobb, mint amekkora a Föld pályája bármikor is megnyúlt, ekkora távolságkülönbségek szélsőséges hőmérsékletkülönbségeket okozhatnak, mely az élet fennmaradását és fejlődését veszélyezteti. A K típusú csillagok esetén a pálya megnyúlása még nagyobb lett, a 0,1 excentricitást is elérte, melyre a fenti állítás értelemszerűen még érvényesebb.



Ábra x és y: a jelenség magyarázata.

Mindkét ábra saját.

A jelenség létrejött két tényező együtt jelenléte miatt történik.

Képzeljük magunk elé a külső bolygó nyújtott pályáját (zöld). Ha húzunk egy egyenest a pálya a csillaghoz legközelebbi és legtávolabbi pontja között, (mely a pálya nagytengelye, az árán a narancs egyenes), két fél ellipszist kapunk, ezeket említsük „pályafél” néven. Az első pályafél legyen az, amelyik esetén a bolygó eltávolodik a csillagtól, a második, amelyik bejártakor közeledik ahhoz. A külső bolygónak a belsőre (kék) gyakorolt hatásának pillanatnyi mértékét az határozza meg, hogy mennyire vannak közel egymáshoz, ezt leegyszerűsítendő, beszéljünk azokról az esetekről, amikor a belső bolygó pályájának nagytengelye:

1- meghosszabbítva az első pályafelet metszi.

2- a második pályafelet metszi,

3-megegyezik a külső bolygó pályájának nagytengelyének meghosszabbításával.

Az első esetben, a nagyobbik bolygó hosszútávú legnagyobb gravitációs hatásai a Föld analógra nézve az első pályafélben történtek. A nagyobbik tömegű bolygó miatt a pálya abba az irányba nyúlna, amerre a két pálya a legközelebb található, azonban a pálya tovább fordul, ez lassan eltolja a legnagyobb hosszútávú hatás pozícióját. Ez azt idézi elő, hogy idővel a két bolygó nagytengelyének meghosszabbítási iránya megegyezik, ezután átfordul a második pályafélre a hosszútávú legerősebb kölcsönhatás iránya.

Amikor a második pályafél esete van érvényben, akkor az a pont is ebbe a félbe kerül, ahol a két bolygó a legközelebb van, a nagyobbik tömegű bolygó ebbe az irányba húzza a bolygót, és erre fordul el a pálya alapjáraton is. Az első esetben a pálya azért nyúlt meg, mert a külső bolygó bizonyos irányokból ható húzó erejét semlegesítette a pálya elfordulása, így az arra merőleges irányúak érvényesebbek voltak. Ezzel felerősíti, így az elfordulásra merőleges hatások kevésbé érvényesek, arányokban véve.

A pálya legbelső és legkülső pontja is lakható zónán belül helyezkedik el, amikor a pálya kerek, azonban ekkora megnyúlások előidézhetik, hogy a bolygó szélsőséges hőmérsékletkülönbségeket tapasztaljon, vagy az által, hogy egy év alatt nagy a hőmérséklet változás, vagy az által, hogy az átlaghőmérséklet nehezen átvészeltetnévé tolódik el. Ennek a rendszeres elnyúlásnak egy sokkal enyhébb példájára a saját rendszerünkben is találunk példát. Saját bolygónk pályája is ismétlődően megnyúlik, a Jupiter és Szaturnusz hatásai miatt. Ezt hívják Milankovics ciklusnak. A kísérletek és a Naprendszerben észlelt eltérések oka az, hogy a próbarendszerekben közelebb voltak egymáshoz a bolygók, mint a Föld a két, fentebb említett gázóriáshoz. Jogos a kérdés, hogy akkor feltételezhetjük-e azt, hogy egy rendszer hosszútávon stabil tud-e maradni így, azonban az emberiség fedezett fel több olyan bolygórendszert is, amelyben a bolygók még a próbarendszerben levő bolygóknál is kisebb távolságban tartózkodnak egymástól. Erre példa a Trappist 1, a Kepler 90, vagy a Gliese 876 rendszerek.

Tehát, ha az emberiség felfedez egy rendszert, ahol egy bolygó kör alakú pályán kering, és a lakható zónában kering, akkor lehet, hogy csak látszólagos a lakhatósága, lehet, hogy egy ilyen ciklusnak épp két kevésbé lakható szakasza között van a pálya állapota egy bolygónak, amelyet felfedezünk. Ebből látszik, hogy nem mindegy, hogy milyenek egy bolygó tulajdonságai, fontos tényező magának, a bolygórendszernek a felépítése.

További célkitűzések

További kísérleteimben megpróbállok más eseteket is keresni arra, hogy a bolygórendszer tulajdonságai befolyásolják egy bolygó lakhatóságát. A vizsgált esettel kapcsolatban a további kutatás azt célozza meg, hogy bizonyos atmoszférák, vagy más tényezők változtatásával elkerülhetőek-e a szélsőséges körülmények. A Hycean bolygók ennek egy érdekes alpontjai lehetnek. Atmoszféráik tágulnak/sűrűsödnek a hőmérséklet emelkedése/csökkenése következtében. A nyomás, ennek következtében változik az év folyamán, azonban feltételezhető, hogy elég nagy marad, hogy egész évben elegendő belső hőt biztosítson a bolygó számára, fenntartva az életet a pálya hidegebb szakaszain. Ez, bár azt jelenti, hogy a hőmérsékletkülönbség ugyanakkora, csak a két szélsőség el van tolva, azonban azt is feltételezhetjük, okkal, hogy vannak olyan baktériumok, amelyek képesek nagy hőmérsékletváltozásokat túlélni, azonban akkor, ha a két szélsőség közül mindkettő forró. Másképp, ha van olyan baktérium, amely a hidegnek nehezen áll ellen, azonban két, viszonylag távol eső, és egyaránt forró hőmérsékleten megél, akkor Hycean bolygók Milankovics ciklusait átvészselhetik. Ez, azonban, ismét, csak feltételezés.

További kísérletek a szomszédos bolygó esetét is tárgyalhatják, ugyanis feltételezhető, hogy más tényezők is (például a rezonancia pontossága, tömegek), amelyek befolyásolhatják a végeredményeket.

Források

1. Robin Hanson: <https://philpapers.org/rec/HANTGF-2>
2. <https://www.khanacademy.org/test-prep/mcat/cells/viruses/a/are-viruses-dead-or-alive>
3. <https://www.biologyonline.com/dictionary/prion>
4. https://www.huffpost.com/entry/cell-mergers-evolution-life_b_1807742
5. <https://astrobites.org/2020/05/11/viability-of-inhabiting-the-galilean-moons/>
6. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/2601.pdf
7. <https://earthsky.org/space/hycean-planets-exoplanets-habitability/>
8. <https://science.nasa.gov/universe/exoplanets/flares-may-threaten-planet-habitability-near-red-dwarfs/>
9. David A. Minton, Renu Malhotra, (2009):
<https://www.eaps.purdue.edu/minton/docs/Nature%202009%20Minton.pdf>
10. <https://www.space.com/25716-alien-life-hotter-stars.html>