
SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
OPTIKAI ÉS KVANTUMELEKTRONIKAI TANSZÉK

SZAKDOLGOZAT

Lakhatóság és lakhatósági zónák a Naprendszerben
és más bolygórendszerekben

Habitability and habitable zones in the Solar system and in other
planetary systems

Murvai Adrián Csaba
Fizika BSc

Témavezető:
Dr. Szalai Tamás
tudományos munkatárs

Szeged
2019

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	2
2. Elméleti áttekintés	2
2.1. Lakhatóság	2
2.1.1. Vízkészlet	2
2.1.2. Dinamikai környezet	3
2.1.3. Mágneses tér	3
2.2. Lakhatósági zóna	4
2.2.1. Klasszikus lakhatósági zóna	4
2.2.1.1. Csillagtípusok	4
2.2.1.2. Egyensúlyi hőmérséklet	7
2.2.2. Folytonos lakhatósági zóna	8
2.2.3. Galaktikus lakhatósági zóna	8
2.3. Hőháztartás	9
2.3.1. Üvegházhatás	9
2.3.2. Karbonát-szilikát ciklus	9
2.4. A lakhatóságot befolyásoló, egyéb tényezők	10
2.4.1. Lemeztektonika	10
2.4.2. Egy hold jelenléte	11
2.5. Feltételes lakhatóság	11
2.5.1. Esetleges bioszférák	12
2.6. A Nap és a Föld sorsa	13
3. Lakhatóságizóna-kalkulátor	15
3.1. Kétpaneles ábrázolóprogram - a CHZ kalkulálása és ábrázolása	15
3.2. Tízpaneles ábrázolóprogram - a CHZ időbeli fejlődése	16
3.3. Folytonos lakhatósági zónákat ábrázoló program	19
3.4. Gyakorlati alkalmazások	20
Összefoglalás	21
Köszönetnyilvánítás	21
Függelék	22
A Nap paramétereinek időbeli fejlődését ábrázoló szkript	24
Az egyszerű lakhatóságizóna-kalkulátor	24
A lakhatósági zóna fejlődését szemléltető szoftver	26
A folytonos lakhatósági zónát megjelenítő kód	29

1. Bevezető

Mindig is érdekelték a földöntúli étellel kapcsolatos kérdések, számomra ez a csillagászat legérdekesebb területe a kolonizálás, a terraformálás, valamint az idegen világok kérdésköre mellett. Mivel a szakdolgozatot érdemes személyes érdeklődés által vezérelve elkészíteni, ezen az útvonalon haladtam. Jelentős előrelépést jelentett kisebb részt a fizika BSc keretei között megszervezett szakmai gyakorlat, nagyobb hangsúllyal pedig a projektmunka-dolgozat. Utóbbival szignifikáns információmennyiségre tehettem szert, amely sokat segített a szakdolgozatom témájának és céljának megvalósításában.

Fő feladatomban az volt, hogy megismerkedjek a Python programnyelvvél, továbbá, hogy a megszerzett tudással hasznos ábrázolószoftvereket készítssek. A kódok írására a Python 3.7 alapsomagot használtam IDLE környezetben, s egy-két hónap gyakorlás után elkezdtem a szkriptek készítését. Szakdolgozatom szempontjából összetett, interaktívan paraméterezhető ábrák készítésére alkalmas programokat írtam, amik a projekt munkámban felvezetett elméletre alapulnak, mint például a lakhatósági zónák helyzete, az egyensúlyi hőmérséklet értéke egyes csillagok körül keringő bolygók esetén. A fő szoftvereim működését és fejlesztését a 3. fejezetben részletezem, illetve az egyes részekhez tartozó kódblokkokat a Függelék részleghez csatolom.

2. Elméleti áttekintés

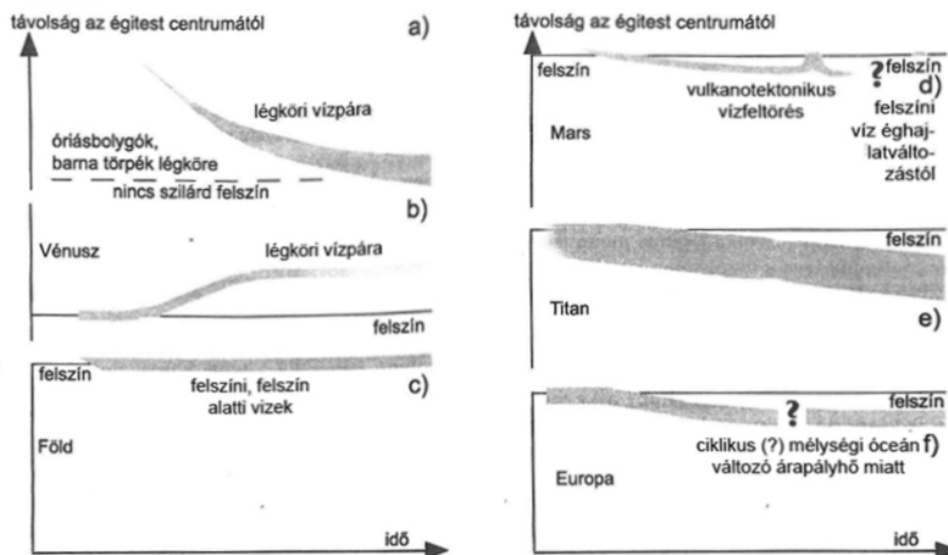
2.1. Lakhatóság

A csillagászatban használt lakhatóság (*habitability*) fogalma igen gyengén definiált, főként a földi élet alapján tudunk feltételeket szabni. Legjobban talán úgy lehet meghatározni az utóbbi fogalmat, hogy 'az a hely, ahol minden feltétel adott legalább egy ismert organizmus aktív jelenlétére'. Aktív alatt érthetünk metabolikusan aktív életformát, amely fogalom szerint a környezet biztosítja az organizmusok számára a lebontó anyagcserét, teret nyit a fejlődésre, illetve lehetőséget ad az ott élő egyedek fejlődésére, szaporodására. Az egyes égitesteken legalább egy ilyen környezet szükséges az élet kialakulására, egyébként nem teljesülhet a reprodukció. Számos körülmény szerepet játszhat a lakhatóság kialakításában, s ezek alapvetően három csoportba sorolhatóak: bolygószerű, központi csillagtól függő, galaktikus elhelyezkedés alapján meghatározott tényezők. Ebben a fejezetben egyelőre csak az elsőt tárgyaljuk, viszont néhány jelenséget külön szekcióban részletezünk, mint például a karbonát-szilikát körforgás, vagy egy hold jelenléte.

2.1.1. Vízkészlet

A lakhatóság vizsgálatának egyik kiinduló támpontja a folyékony víz stabil jelenléte. Utóbbi számos módon rendelkezésre a Naprendszer különféle égitestjein (bolygók, de leginkább holdak), akár felszínen, felszín alatt, fagyott tengerek mélyén, légkörökben, stb. (lásd 1.ábra)

A vízkészlet egy fontos forrása a külső égitestekkel, űrbéli objektumokkal való kontaktus. Vegyük példának az üstökösöket. Legtöbbjük jégből, kondenzálódott porból áll, egy jelentősebb tömegű égitest könnyen darabjaira szakíthatja gravitációs hatása által. Földünk esetében az űrből érkező víznek csak 10%-a üstökös eredetű (Morbidelli et. al. 2000), ugyanis a Jupiter jelenléte zavart kelt az egyes nagy excentricitású égitestek pályáiban, melyek élettartama 1 millió évet is elérhet így. Ha a Naprendszer nem rendelkezne egy viszonylag nagyméretű gázbolygóval, akkor kevesebb üstökös mag szóródna ki, így több H₂O érkezne planétánkra. Éppen emiatt érdekesek az olyan rendszerek, melyekben kisebb gázóriások vannak, vagy akár egyáltalán nincsenek. Visszatérve, mivel viszonylag kevés üstökös jutott el hozzánk a bolygóképződés, illetve a korai szakaszok alatt, vízkészletünk egy nagyobb hányadát (kisbolygóöv külső térségéből érkező) nagyobb objektumok hozták becsapódások árán a bennük lévő hidratált anyagokkal. Ezek alapján is látható, hogy az adott planéta elhelyezkedésétől függetlenül véletlenszerű események (ütközések) is befolyásolják a lakhatóságot.



1. ábra. Egyes égitesteken található vízforrások az idő múlásával. [1]

2.1.2. Dinamikai környezet

Naprendszerünk bolygóinak pályái 0,1-nél kisebb excentricitásúak (a Merkúr kivételével), tehát közelítőleg kör alakú pályán keringenek Napunk körül. Akadnak ugyanakkor olyan exobolygórendszerek, melyekben a planéták útvonala igencsak elnyúlt. Ilyenek a rezonáns rendszerek, melyekben az égitestek keringési idejei egymáshoz kis egész számok hányadosaiként aránylanak. A túlságosan elnyúlt pályán mozgó bolygók periodikusan túl közel, vagy túl távol lehetnek a központi égitesthez képest, ez pedig kártékony hatással bírhat a lakhatóság szempontjából.

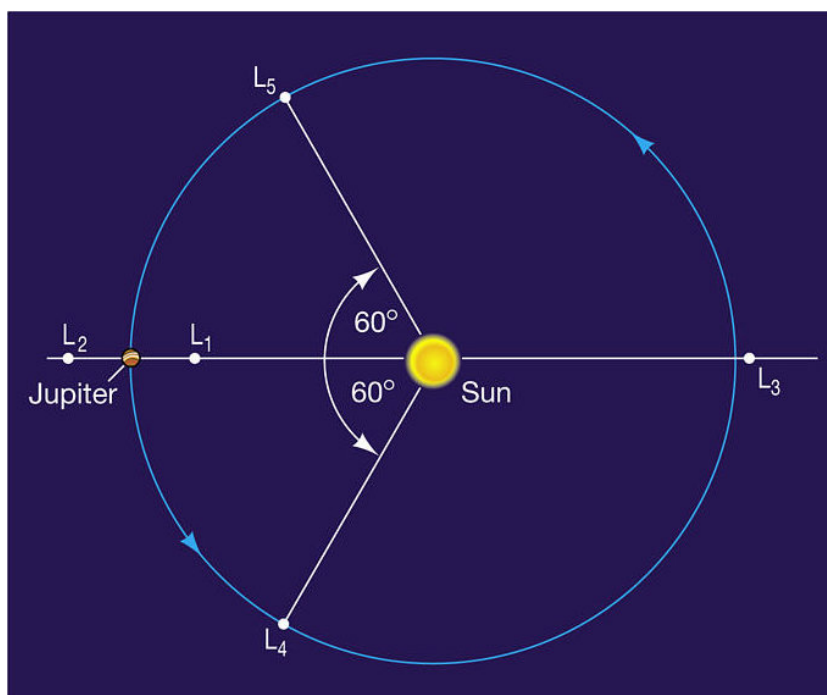
Ha egy rendszer gázbolygóval rendelkezik, annak elhelyezkedésére négy lehetőség van:

1. az óriásbolygó nagyon közel helyezkedik a csillaghoz, különféle hatással nincs a lakhatósági zónára, s a benne lévő, stabilan keringő bolygókra;
2. az óriásbolygó viszonylag távol kering a csillagtól, nincs számottevő hatása az esetleges belső bolygókra;
3. az óriásbolygó a lakhatósági zónában kering, s ha előbbin nem is túl valószínű az élet, holdjai igen érdekes célpontok lehetnek;
4. az óriásbolygó a lakhatósági zónában kering, s a trójai kisbolygókhoz hasonlóan az L_4 és L_5 Lagrange-pontok körül elhelyezkedő égitestek követik. (lásd 2.ábra)

A lakhatósági zóna bővebb tárgyalására a következő alfejezetben térünk rá.

2.1.3. Mágneses tér

Egy bolygó mágneses tere jelentős védelmet biztosít főként a központi csillagból érkező töltött részecskékkel szemben. Földünk a magja körül áramló olvadt vasanyag által generált erős mágneses mezővel rendelkezik, amely óv minket a Nap aktivitásától, mely alatt a Napból áramló, nagy energiájú töltött részecskék záporát értjük. A beérkező részecskék a mágneses erővonalak mentén spirálozó mozgást végeznek és elvezetődnek a mágneses pólusok felé. A részecskék a légkörbe érve magasabb energiaállapotra gerjesztik az ottani elemeket, amelyek a számukra kedvező alapállapotukba visszatérve fényt emittálnak, ennek a jelenségnek köszönhető az északi és déli sarki fény (*Aurora Borealis* és *Aurora Australis*). Viszont nem minden égitest rendelkezik kellően erős mágneses térrel (lásd 2.4.1. fejezet), ebben számos faktor szerepet játszik, amiket a későbbiekben sorra veszünk.



2. ábra. A Nap-Jupiter rendszer Lagrange-pontjai. [2]

2.2. Lakhatósági zóna

A bolygó eddig említett "adottságaira" jelentős hatással van a központi csillag, illetve hatással lehetnek kozmikus események. Ebben a fejezetben megpróbáljuk különféle módokon definiálni a lakhatósági zónát, továbbá az úrbéli környezet lehetséges hatásáról értekezünk, illetve bevezetjük az egyensúlyi hőmérséklet fogalmát, mellyel az egyes zónahatárok kiszámíthatóvá válnak.

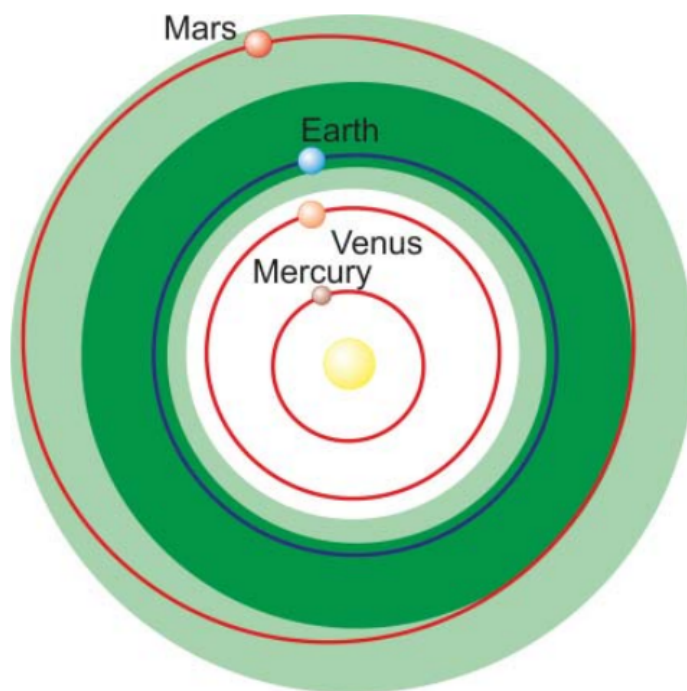
2.2.1. Klasszikus lakhatósági zóna

A csillagköri lakhatósági zónát (*Circumstellar Habitable Zone, CHZ*) abban a tartományban definiáljuk, ahol a víz folyékony állapotban létezhet a bolygó felszínén, tehát ahol a planéta egyensúlyi hőmérséklete 0 és 100°C közé esik. Természetesen ez nem azt jelenti, hogy a lakhatósági zónán kívüli égitesten nem jöhet létre élet, hiszen a felszíni víz halmazállapota jelentős mértékben függ a légköri nyomástól, mely a legtöbb bolygón más és más.

A zóna belső határán túl a H₂O a tropopauzán át a légkör felső rétegeibe áramlik, ahol az ottani hőmérséklet hatására az elemekre bomlik. A másik véglet, tehát a külső határ pedig a légköri széndioxid kifagyásával jár. Naprendszerünkben a CHZ a Nap körüli 0,95-1,37AU tartományon húzódik. (lásd 3.ábra) Láthatjuk, bolygónk a zóna belső felén helyezkedik el, felszíni átlaghőmérséklete közel 14°C, mely a légkörnek, így az üvegházhatásnak köszönhető (lásd 2.3.1. fejezet). A CHZ-ra jelentős hatással van a központi csillag spektráltípusa, avagy olyan tulajdonságok, mint a hőmérséklete, mérete, légköri aktivitása.

2.2.1.1 Csillagtípusok

A bolygók lakhatósága szempontjából igen nagy faktor a csillag színképtípusa, ugyanis egy bolygó egyensúlyi hőmérséklete függ egyrészt a központi objektum hőmérsékletétől, sugarától, illetve a planéta pályájának félnagy tengelyétől, vagyis a fényforrástól vett távolságtól. A Hertzsprung-Russell diagram (HRD) szerint a nagy tömegű csillagok energiakibocsátása igen magas, cserébe életük viszonylag rövid (néhány tízezertől néhány millió évig), míg a kistömegű csillagok energiakibocsátása alacsonyabb, viszont akár több milliárd évet tölthetnek a HRD fő sorozatán (azaz magbéli H-fúzióval működve, lásd 5. ábra).

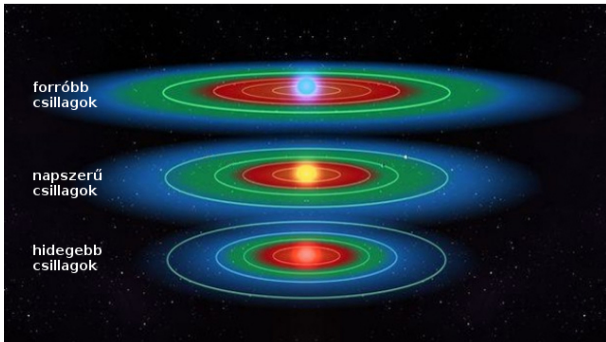


3. ábra. Naprendszerünk klasszikus lakhatósági zónája. [3]

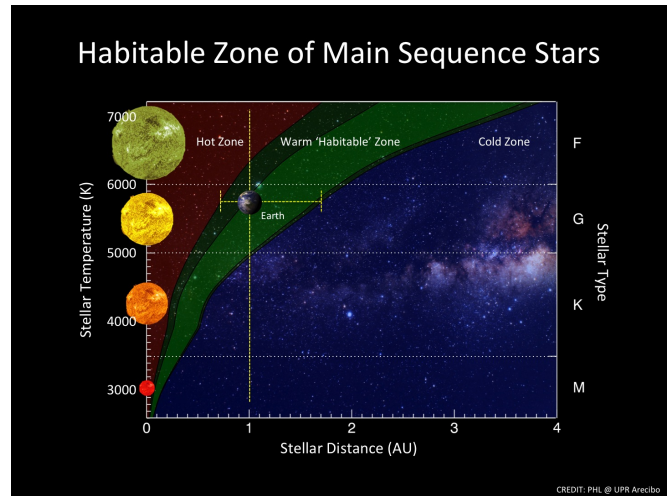
Tehát a centrumban lévő objektum fényteltjesítményének növekedésével magasabb lesz a bolygókra jutó energia, így kitolódik az élet számára kedvező zóna. Lehetnek szélsőséges esetek, de leginkább a Napunkhoz hasonló gázóriások környezetében remélhetjük a legoptimálisabb körülményeket. Vegyük először az M típusú csillagokat, melyeknél a lakhatósági zóna, tekintettel az alacsony luminozitásra, igen közeli és vékonyabb is (lásd 4. ábra). Két jelentősebb probléma is fennáll ezen esetekben. A csillaghoz közel lévő bolygók egy bizonyos határon belül kötött keringést végeznek. Ez azt jelenti, hogy az ilyen planéta keringési periódusa megegyezik a forgási periódusával, tehát a csillag felé mindig ugyanazt az oldalát mutatja, aminek hőmérséklete így több száz fokkal is eltérhet a napfény elől takarásban lévő részekétől, ahol az atmoszféra valószínűleg egyszerűen megfagyna. Ennek ellenére modellekkel kimutatták azt, hogy légkörzés által juthat hő a napos oldalról a fagyott részekre [4]. Ilyen planétákon a félárnyékban lévő területeken lehet érdemes az élet után való kutatás, habár a lassú forgás miatt hiányozhat a mágneses tér, ami által az esetleges atmoszféra ki van téve a második jelentős faktornak, a kistömegű csillagokra jellemző erős légköri aktivitásnak, aminek következtében a közeli bolygók felszínét valószínűleg folyamatos, intenzív részecskezápór éri [5]. Mindezek ellenére adott a lehetőség az élet kialakulására, mivel az M típus az egyik legjellemzőbb (75%), igen hosszú, több száz milliárd éves élettartammal is bírhatnak [6].

A K típusú csillagok már ritkábbak (15%), viszont még azok is 10-20 milliárd évig képesek fúziójukat végezni, ami bőven elég az intelligens élet kialakulásához, akár csak saját esetünkben, ahol a G2 V típusú Nap mellett minden feltétel adott volt számunkra.

Az F, A, O típusú csillagok egyrészt igen magas UV sugárzást bocsátanak ki, ami a bolygók légkörben elnyelődhet, illetve felszínükről visszaverődhet. A nagyobb probléma a rövid, maximum néhány milliárd éves élettartam. A földi élet kialakulásához négy milliárd év kellett, majd további 600 millió év, hogy utat törjön az intelligencia fejlődése. Az ilyen nagy tömegű csillagok körüli exobolygókon is alakulhat ki élet, ha a planéták olyan kondíciókkal rendelkeznek, amik lehetővé teszik a felgyorsult evolúciót.

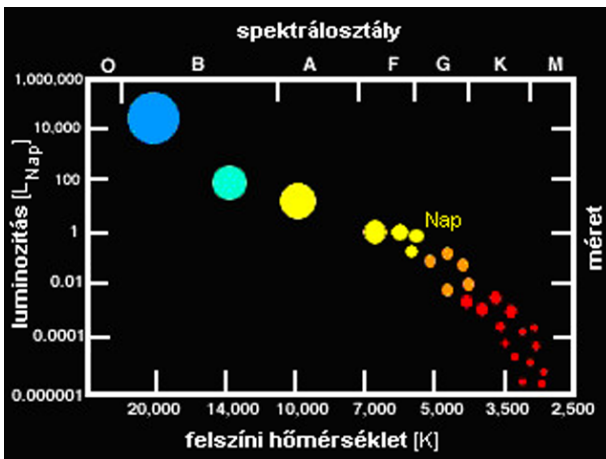


(a) Különböző csillagok lakhatósági zónái. A kedvező, zöld terület a csillag méretétől, fényteljesítményétől függ. [7]

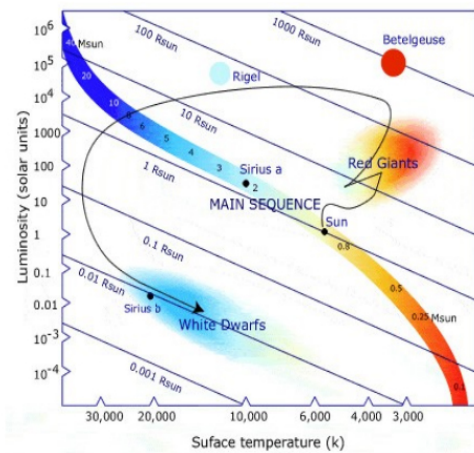


(b) A lakhatósági zóna elhelyezkedése csillagtípusonként. [8]

4. ábra. A csillag típusa és a CHZ elhelyezkedése közti kapcsolat.



(a) A HRD-n ábrázolt fősozatonon láthatjuk a csillagok méretét, illetve számosságát a többihez képest, valamint leolvashatóak az egyes spektráltípusok. Egy napluminositás-egység $3,84 \cdot 10^{26} W$ -nak felel meg. [9]



(b) A különböző ágakat bemutató HRD, vízszintes tengelyén a hőmérséklet, függőleges tengelyén a fényteljesítmény, továbbá látható még az egyes sugarak és tömeg szerinti felosztás. [10]

5. ábra. A Hertzsprung-Russell diagram különféle ábrázolásai, más-más szemléletes információval.

2.2.1.2 Egyensúlyi hőmérséklet

A megfelelő hőmérséklet elengedhetetlen az élet kialakulásához és fenntarthatóságához. A víz folyékony halmazállapotban normál légköri nyomáson 0 és 100°C között fellelhető, viszont magas sótartalom mellett -20°C alatti, magas nyomás mellett pedig akár 120°C feletti tartományokon is lehetséges a megléte. Ilyen módokon a H₂O a természetben is előfordul. Ez megfelelő alapot biztosít a további elméleteknek, melyekkel idegen világokat vizsgálhatunk. Egyik legfontosabb egyenlet a témakörben az, mely a bolygó egyensúlyi hőmérsékletét írja le.

Egy planéta anyacsillagától energiát nyel el, majd kibocsátja azt feketetestként, így adva az egyensúlyi hőmérsékletet, melyet számolni is tudunk. Mivel az atmoszféra bonyolítja a helyzetet, első körben légkör nélküli esetre tudjuk kiszámolni, hiszen az számos egyéb faktort adna a számításokhoz. Az abszorbeált energia kiszámítható, ha ismerjük a bolygó r sugarát és pályájának a félnagy tengelyét, valamint a csillag T_* hőmérsékletét. Tekintsük előbb a központi csillagot, melynek egyik legfőbb jellemzője az időegységként kisugárzott energia, avagy az L luminozitás. Utóbbira fennáll a Stefan-Boltzmann törvény:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_*^4 \quad (1)$$

Itt R a csillag sugara, T_* a csillag effektív felszíni hőmérséklet, σ pedig a Stefan-Boltzmann állandó. Ez a kisugárzott energia gömbfelületen terjed, viszont megadható felületelemre is a bolygó a távolságában:

$$S = \frac{4\pi R^2 \sigma T_*^4}{4\pi a^2} = \left(\frac{R}{a}\right)^2 \sigma T_*^4 \quad (2)$$

Itt S a napállandó, mely az adott felületelemre egységnyi idő alatt érkező energiát adja meg. A Föld esetében ez (a légkör tetején mérve) $S = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

A bolygó által abszorbeált P_{abs} energia πr^2 felületre érkezik, tehát ezt megszorozva a napállandóval, illetve az elnyelt hányaddal:

$$P_{abs} = S\pi r^2(1 - A) \quad (3)$$

Itt az $(1 - A)$ faktor azt mutatja, hogy a beérkező energia hány százalékát nyeli el az égitest, ugyanis valamennyi visszaverődik a felhőzet és a felszín által. Az A mennyiség albedóként ismeretes, mely a visszavert sugárzás mennyiségét adja meg. Földünk esetén $A = 0,37$, viszont ez függ a felhőtakarótól, esetleges földi porviharoktól.

A planéta az elnyelt sugárzást feketetestként ki is bocsátja (P_{em}), amelyre újra felírható a Stefan-Boltzmann törvény:

$$P_{em} = 4\pi r^2 \sigma T_e^4, \quad (4)$$

ahol T_e az egyensúlyi (*equilibrium*) hőmérséklet.

Feltételezve, hogy a beérkező és kisugárzott energia egyensúlyban van, a keresett mennyiség:

$$T_e = \left(\frac{S(1 - A)}{4\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

Így jutunk el az egyensúlyi hőmérséklet kiszámításának képletéhez. Felmerülhet azonban a kérdés, hogy hogyan számoljuk ki az adott bolygó számára kedvező zóna határait. Ha a (3) egyenletbe behelyettesítjük a (2) egyenletet, majd egyenlővé tesszük a (4)-kel, akkor a -ra rendezve megkapjuk a következőt:

$$a = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{T_*}{T_e}} \sqrt{1 - A} \quad (6)$$

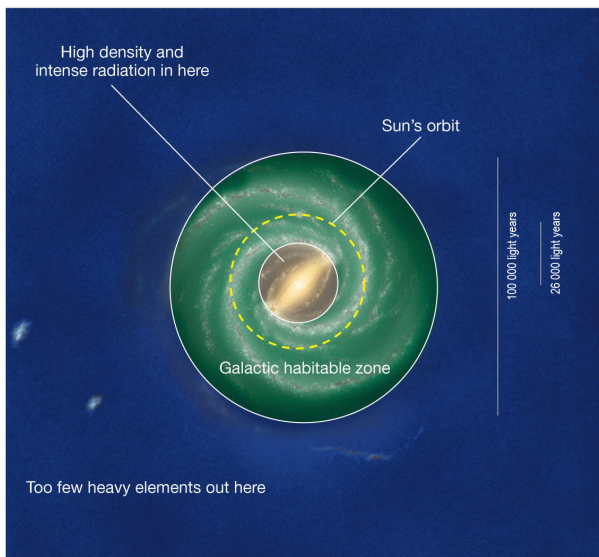
T_e helyére 0 és 100 Celsius fokot beírva megkaphatjuk az említett zóna külső és belső határát.

2.2.2. Folytonos lakhatósági zóna

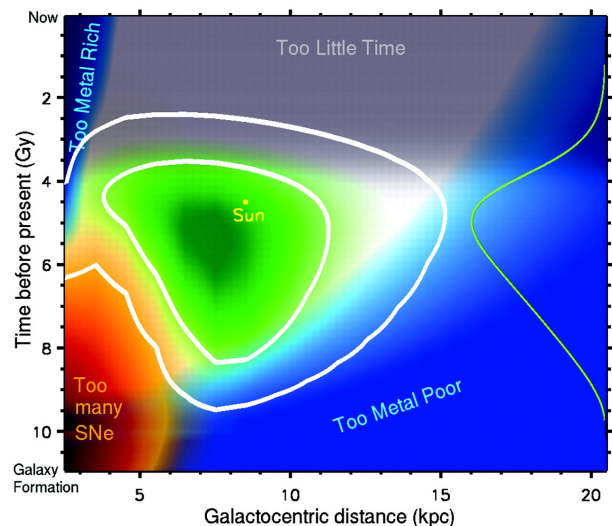
Egy bolygó szempontjából érdekes koncepció az úgynevezett folytonos lakhatósági zóna. Ezen csillagköri területen a planéta annak élettartama során fenntarthatja a folyékony halmazállapotú víz meglétét. A csillag idősödésével járó luminozitásnövekedéssel a klasszikus CHZ távolodik a központi objektumtól. Utóbbiból következik, hogy a folytonos HZ vékonyabb szélességű lesz, mint a CHZ, s dimenziói, határai a csillag paramétereitől függenek. Ez egy jó megközelítés afelé, hogy melyik csillag környezetében érdemes keresni planétákat, ugyanis, ha ezen adott térrészen belül egy bolygó szükségszerűen elég ideig tartózkodik, akkor többmilliárd éves evolúció is lejátszódhat rajta.

2.2.3. Galaktikus lakhatósági zóna

Mégha az életre minden feltétel adott is a planéta és a teljes bolygórendszer szintjén, fontos, hogy galaktikus környezet is kedvező, veszélyektől mentes legyen. Ezen célból definiáljuk a galaktikus lakhatósági zónát (*Galactic Habitable Zone, GHZ*). A galaxis centrumához közeli csillagok igen sűrűn helyezkednek el, nagyrészt csillaghalmazokban, így az ottani élet gyakori szupernóva-robbanásoknak, erős gravitációs perturbációknak, s egyéb űrbéli veszélyeknek lehet(ne) kitéve. A csillagsűrűség olyan magas, hogy évmillióként számítani lehet valamilyen ütközésre, közeli szupernóva-robbanásokra vagy gamma-kitörésre, mely az életformákra végzetes hatással bírhat. A galaxisunk középpontjában egy szupermasszív fekete lyuk (Sagittarius A*) található, melynek régiójában nincs is csillagképződés.



(a) A zöld régió a GHZ, amitől beljebb túl magas a sűrűség és túl intenzív a sugárzás. A GHZ-n kívüli terület valószínűleg túlságosan szegény nehezebb elemekben az (összetett) életformák kialakulásához. [11]



(b) Az élet kialakulásához elegendő mennyiségű idő telt el a Naprendszer létrejötté óta, illetve az se túl közel (szupernóvákban gazdag régió), se túl messze (fémszegény terület) nincs a galaktikus centrumtól. [12]

6. ábra. A galaktikus lakhatósági zóna szemléltetése a galaktikus centrumtól való távolság és az eltelt idő függvényében. Sárga jelöléssel a Nap elhelyezkedése is megfigyelhető.

Eltávolodva a centrumtól, a perifériákon alacsony fémtartalmú égitestek találhatóak. Ez azt jelenti, hogy az egyes csillagok főként hidrogénből és héliumból állnak, a csillagászatban minden további elemet fémeknek nevezünk. Ezen tulajdonságuk miatt elemekben nem túl változatosak, ami pedig szükséges lenne az élet felépítéséhez. Hogy a csillag elemdiverzitása megfelelő legyen, továbbá viszonylag csendes környezettel rendelkezzen, hozzávetőleg a centrumtól mért 15 000 - 38 000 fényéves tartományba kell esnie. Tejútrendszerünk sugara 50 000 fényév, mi pedig a megfelelő tartományba tartozunk az Orion-Cygnus spirálkarban, hiszen Naprendszerünk a középponttól 26 000 fényévre található (lásd 6. ábra). További pozitívum, ha egy csillagrendszer a galaxis korotációs zónájában fekszik, ahol az égitestek

keringési sebessége közel egyenlő a spirálkarok körfordulási sebességével, vagyis ritkán kereztezi az adott gázkar útja a csillagbölcsőket.

2.3. Hőháztartás

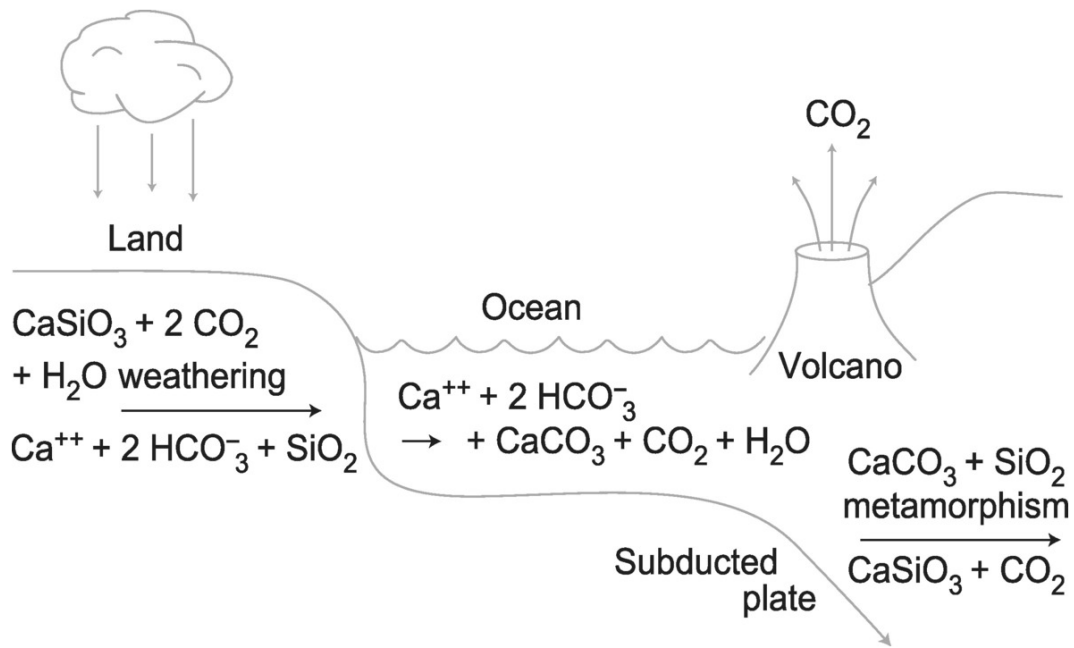
Mint azt már említettük, az élet kialakulásához elengedhetetlen, hogy a víz folyékony halmazállapotban fellelhető legyen. Ez 1atm nyomáson 0 és 100°C között lehetséges, viszont tárgyaltunk már extrémebb esetekről is (lásd 2.2.1.2. fejezet). A klasszikus lakhatósági zónán kívül eső égitesteken is létrejöhet azonban az élet, ha azt az adott légkör az üvegházhatásnak nevezett jelenséggel támogatja.

2.3.1. Üvegházhatás

Az effektív hőmérséklet tárgyalásánál már szó esett a feketetest-sugárzásról. Érdekes viszont azt is figyelembe venni, hogy a bolygó, melyre a hó áramlik, sokkal hidegebb feketetest, mint a forrás. Ennek köszönhetően a visszavert sugárzás a hosszabb hullámhossztartomány felé tolódik (láthatóból az infravörösbe). Itt is közrejátszik az atmoszféra, hiszen olyan gázok, mint H_2O , CO_2 , CH_4 és NH_3 áteresztőek kisebb hullámhosszakon, míg hosszabb hullámhosszakon úgymond átlátszatlanok, tehát a befelé érkező sugárzást nem akadályozzák, a visszavert, eltolódott sugárzást viszont bent tarthatják, így az energia csapdába esik a bolygón. Ez az üvegházhatás, mely a Földön is jelentkezik, s körülbelül 30K-nel megemeli a felszíni átlaghőmérsékletet. A legfontosabb üvegházhatású gázok a vízgőz és a szén-dioxid, nélkülük megfagyna a földi élet. Légkör nélkül nem lép fel ez az effektus, erre példa a Merkúr és a Hold esete. A másik véglet, hogy a felszíni hőmérséklet olyan magas, hogy folyékony halmazállapotú víz nem lehetséges. Ilyenkor lép fel a lakhatósági zóna belső határán lévő, úgynevezett fékevesztett üvegházhatás (*runaway greenhouse effect*), mely egy pozitív visszacsatolású folyamat, s a Vénusznál is tapasztalható. Az effektus olyan erős, hogy a hőmérsékletet hozzávetőleg 500K-nel megemeli, elzárva az általunk ismert élet kialakulásának lehetőségét. Az elpárolgó víz alkotóelemeire esik szét, melyekből a hidrogén kiszökik az világűrbe, az oxigén pedig rekombinálódás során oxidokat alkot a planétán.

2.3.2. Karbonát-szilikát ciklus

Bolygónk egyik legfontosabb szabályozó rendszere a karbonát-szilikát ciklus (lásd 7. ábra), ami a szén-dioxid mennyiségéhez kötődik. Az atmoszférában fellelhető CO_2 az esővízzel vegyülve szénsavat (H_2CO_3) hoz létre, mely gyenge savként enyhén erodálja a szilikáttartalmú kőzeteket, melyekből kationok válnak ki, például Mg^{2+} és Ca^{2+} , s folyókban, folyamokban szállítódnak tovább. Folyó- és állóvizekben az említett kationok rekombinálódhatnak bikarbonátokkal (HCO_3^-) karbonátokká (CaCO_3), melyek a vizek aljára süllyednek, hogy a lemezt tektonikával idővel újra felszínre kerülhessen a légkörből elnyelt szén-dioxid. A tengerek, óceánok fenekén lévő rétegek a szárazföldi lemezek alá buknak, ezáltal hó keletkezik a karbonátok számára (szilikátokkal való metamorfizmus), továbbá a CO_2 visszakerül az atmoszférába vulkanikus tevékenységek által. Így a szén-dioxid körforgásban van, s ezen folyamat valójában kétirányú negatív visszacsatolás. Ha a CO_2 mennyisége megnövekszik, akkor az üvegházhatásnak köszönhetően emelkedik a hőmérséklet, mely által több kémiai reakció fog bekövetkezni a kőzetekkel. Utóbbi miatt több CO_2 "vész el" a reakciókban, vagyis csökken a légkörbeli koncentrációja, akárcsak az üvegházhatás és a globális hőmérséklet. A folyamat ugyanilyen módon működik a CO_2 mennyiségének növekedésekor. Ezen körforgás hatással van a klímaváltozásra (jégkorszakok, olvadások).



7. ábra. A karbonát-szilikát ciklus szemléletes ábrája. [13]

2.4. A lakhatóságot befolyásoló, egyéb tényezők

Eddig tisztáztuk, mit is takar a lakhatóság és a lakhatósági zóna. A legtöbb szabályozó tényezőről szó esett, ám bár akadnak még olyan jelenségek, melyek részletezése további alfejezeteket kíván. Ebben a fejezetben kitérünk a lemeztectonikára és a kísérő(k) okozta hatásokra.

2.4.1. Lemeztectonika

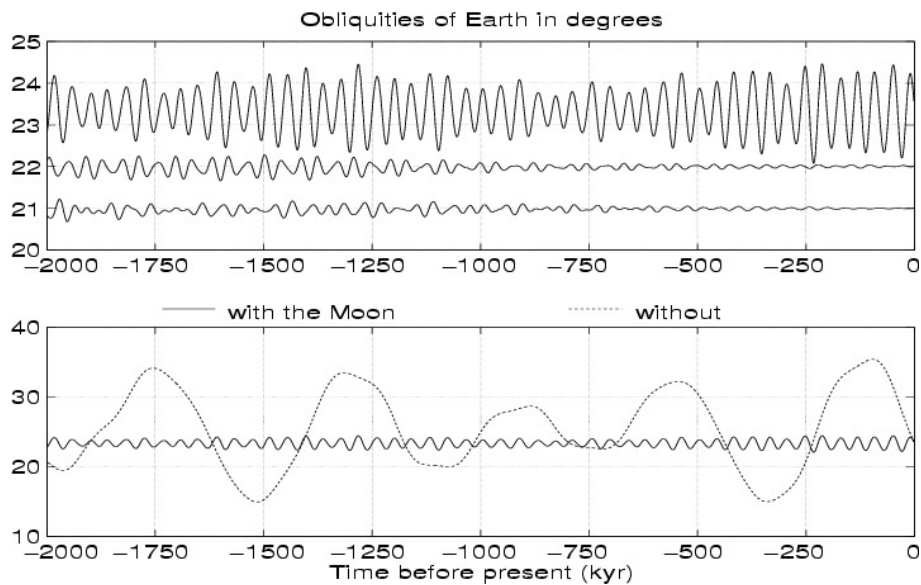
A 2.3.2. fejezetben már láthattuk, hogyan vesz részt a lemeztectonika a karbonát-szilikát körforgásban, vagyis hogyan segít visszajuttatni a légkörbe a felhasznált CO_2 -t. A lemezek mozgása mindemellett segít fenntartani egyéb elemek, mint például a kén és a vas különféle állapotainak cirkulációját is, avagy újrahasznosítja az élethez szükséges erőforrásokat.

A lemeztectonikához elengedhetetlen egy bizonyos kenőanyag, mellyel a rétegek kellően deformálódni képesek a mozgáshoz, lesüllyedéshez. Az említett anyag Földünk esetében a víz, mely elengedhetetlen a lakhatóság szempontjából. További szerepe van még a lemeztectonikával együtt a kontinensek létrejöttében is, illetve a köpeny belsejében lévő konvekcióban. A lemezek mozgásával a köpenybe leáramló víz csökkenti a viszkozitást, mellyel megnő a cirkuláció aránya, mely által jelentősebb lesz a hőcsere a magnetoszféra létrejöttéért, fenntartásáért felelős külső, folyékony maggal. Tehát láthatjuk, hogy a lemeztectonika, a folyékony víz, illetve a mágneses mező kapcsolatban állnak egymással, egy rendszerként működnek. A kis méretű bolygók nem tudnak megfelelő mértékű lemezmozgást fenntartani, így mágneses mezejük védelmére sem számíthatnak, ilyenre példa a szomszédos Mars. További érdekes eset a Vénusz, mely elhelyezkedése miatt nem rendelkezik felszíni óceánokkal, így kérge merev, nem hajlékony, akár a földi. Az utóbbi tényezők megakadályozzák a lemeztectonikát, mely jelenség így kártékony hatással van a magnetoszférára.

2.4.2. Egy hold jelenléte

Mint azt tudjuk, a Föld körülbelül $23,5^\circ$ -os tengelyferdeséggel rendelkezik. Ennek köszönhető az évszakok megléte. Ez a tengely igen hosszú, 26 000 éves periódussal egy kúppalást mentén körbejár, precessziót végez. Holdunk jelenléte számos jelenséget eredményez (leginkább ismert az árapály), melyek közül az egyik legfontosabb az utóbbi tengely ingadozásának minimalizálása. Modellek alapján (lásd 8. ábra) arra lehet következtetni, hogy Holdunkkal a dőlésszög 20° és 25° között változik, míg nélküle akár 50° -os, extrém eseteket is elérhetne (mint ahogy a Mars esetében is ez a helyzet valószínűleg), ami drasztikus hatással lenne a klímára, s csak a legnagyobb tűrőképességű fajok lennének képesek az alkalmazkodásra, túlélésre.

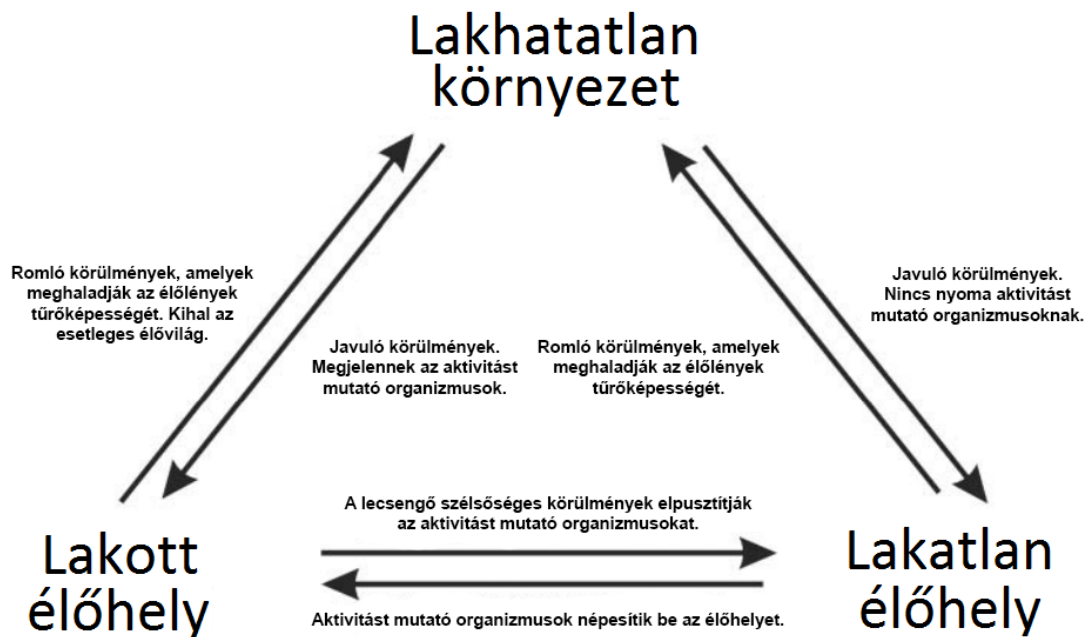
Az exoholdak keresése még igen új ága a csillagászatnak, viszont az ilyen kísérőkkel rendelkező bolygókön nagyobb esély lehet az élet kialakulására, szóval érdekes célpontokként szolgálnának.



8. ábra. A Föld tengelyferdeségének változása hosszasan visszanyúló időskálán. Az alsó ábrán látható a Hold jelenlétével és annak hiányával vizsgált eset. [14]

2.5. Feltételes lakhatóság

Általában, ha potenciálisan lakható bolygóról beszélünk, kényszerünk van azt gondolni, hogy az valóban lakott is, viszont óvatosan kell bánni az ilyen kijelentésekkel. A földi biológia tudásanyaga szerint mindig is volt kapcsolat a lakhatóság és az élet jelenléte között, habár ez az állítás idegen planétákon nem feltétlenül érvényes. Előfordulhat az az eset, miszerint bolygószínten minden feltétel adott az életre, viszont nem áll rendelkezésre semmi, ami magát az életet beindítsa (például transzfer étellel bíró égitestekről). Az ilyen környezeteket lakatlan élőhelyeknek nevezzük. Laboratóriumban lehetőségünk van előállítani egyes idegen világok körülményeit, s ezáltal megvizsgálni azokat lakhatóság szempontjából. Eddig szó esett lakott és lakatlan élőhelyekről (*inhabited*, ill. *uninhabited habitat*), viszont az ismert Univerzumban valószínűleg a leggyakoribb mégis a lakhatatlan környezet (*uninhabitable environment*). Ennek számos oka lehet. Az egyik leginkább számottevő, hogy planetáris szinten nincsenek meg a feltételek az élet kialakulására, fennmaradására. Vannak viszont olyan lakható világok, melyek elveszthetik lakhatóságukat egy bolygó- vagy csillagközi katasztrófa által. Láthatjuk, a három csoport egymással kapcsolatban áll. A környezet változása felelős azért, hogy az egyes égitesteket melyik kategóriába sorolhatjuk (lásd 9. ábra).



9. ábra. A fent említett három csoport közti összefüggések láthatóak az ábrán. Különböző folyamatok befolyásolják, hogy egy idegen világ melyik kategóriába sorolható. Legegyszerűbben azt mondhatjuk, hogy ez azon múlik, a környezet lakható-e, s ha igen, akkor lakott-e vagy sem. Az eredeti, angol nyelvű ábra nyomán. [15]

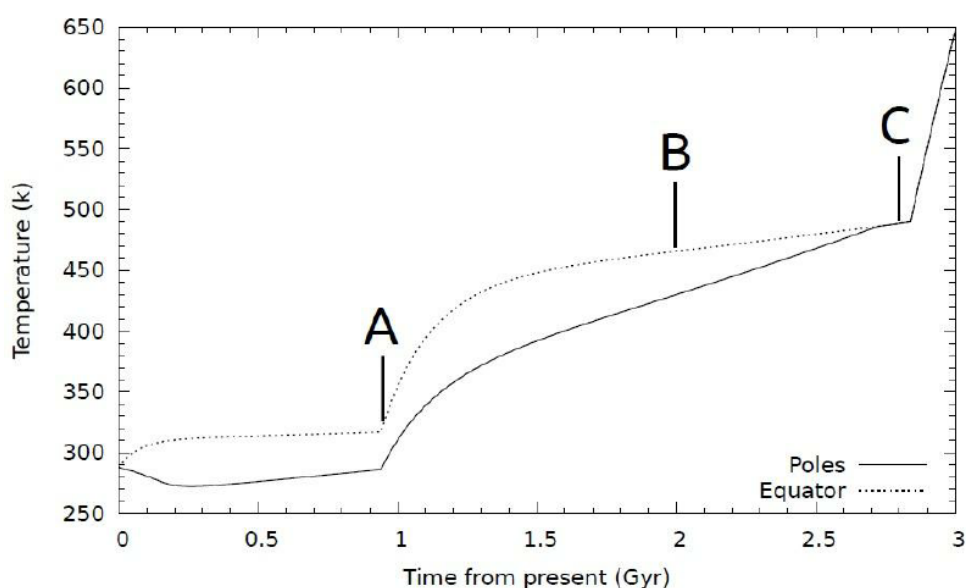
2.5.1. Esetleges bioszférák

Az idegen élet kutatása szempontjából érdemes lehet elrugaszkodnunk a földi körülményektől - akár széntől eltérő elemen alapuló életformákat is fontolóra véve. Mint arról már szó esett, gázóriások egyes holdjain a jégtakaró alatti óceánokban (ahol egyes tényezők engedik) létrejöhetett az élet. Ilyen megfontolásból ezek érdekes célpontok lehetnek, olyan jelöltekkel, mint a Jupiter Europa holdja, vagy a Szaturnusz egyik kísérője, az Enceladus. Sajnos a vastag jégtakaró miatt egyelőre nem tudunk sokat az ilyen környezetekről.

A másik lehetőség elgondolkodtató kérdéseket vet fel. Lehetséges az élet kialakulása a planéta atmoszférájában, ha maga a felszín lakhatatlan? Sagan és Saltpeter [16] elképzelései alapján a Jupiter légkörében létezhetnek fejlettebb életformák, melyek főleg napfényt és különféle molekulákat metabolizálnak. Egyes kutatók úgy vélik, hogy hasonló élőlények kialakulhattak a Vénuszon is, ahol körülbelül 50km-es magasságban a földihez hasonló körülmények (40°C hőmérséklet és 1atm nyomás) uralkodnak. Egyelőre vita tárgya még, hogy vajon képesek lennének-e egyes mikroorganizmusok az önfenntartásra az atmoszférában. Hogy az utóbbit megértsük, érdemes földi körülmények között vizsgálni az olyan kivételes lényeket, mint az extremofilek. Példának vehetjük a hóforrást a Yellowstone Nemzeti Parkban, melynek partját 71 °C-os vízében élő termofilek, baktériumok és algák teszik színessé. Az extremofil olyan élőlény, mely olyan szélsőséges fizikai vagy kémiai tulajdonságokkal bíró élőhelyekhez alkalmazkodott, melyben a földi létformák többsége azonnal elpusztulna. Előbbiek közül megkülönböztetünk olyanokat, melyek magas vagy alacsony hőmérsékleten, nagy nyomáson élnek, eltűrik a radioaktív sugárzást, vagy az extrém szárazságot, a savas vagy lúgos környezetet. Ezek nagy része mikroorganizmus. A legkülönlegesebb helyen képesek előfordulni, ahol meg sem fordulna a fejünkben biológiai aktivitás után kutatni (pl. a tengerek mélyén, vagy a földkéreg 2-3 km-es mélységében).

2.6. A Nap és a Föld sorsa

Annak ellenére, hogy bolygónk összetett védelemmel rendelkezik, úgymint a karbonát-szilikát-kör vagy a mágneses tér, a planétán fellelhető élet sorsa megpecsételt, hosszabb lefolyásban. Sokan a Föld végétének az Androméda-galaxissal való ütközést, vagy éppen a csillagunk halálát vélik, pedig jóval korábban bekövetkezik az elkerülhetetlen. A Napunk korosodásával úton van a vörösóriás-ág (*RGB, Red Giant Branch*) felé, s közben folyamatosan növekedik a luminozitása. Ha a jelenlegi érték 10%-kal megemelkedik, megkezdődik a felszíni vizek elpárolgása, amelyre megközelítőleg egymilliárd év múlva kerül sor. Ezen állapotában bolygónkon fokozatosan jelentkeznek a fékevesztett üvegházhatás jelensége, amely során a H_2O a sztratoszférába jutva elemeire bomlik, s az oxigén továbbra is az atmoszférában marad. Végül, mikor már a mikrobiális élet is megszűnik (hozzávetőleg 2,8 milliárd éves felső határral, lásd 10. ábra), a Föld a Vénuszhoz hasonló sorsra jut, teljesen elforrt óceánokkal, vastag felhőtakaróval. Érdekes kihívást jelent ez az ember számára (igaz, viszonylag még hosszú idő áll rendelkezésre, ha a környezetre káros tevékenységeket nem vesszük figyelembe), hiszen csak úgy tudjuk túlélni az említett katasztrófát, ha új otthont keresünk.

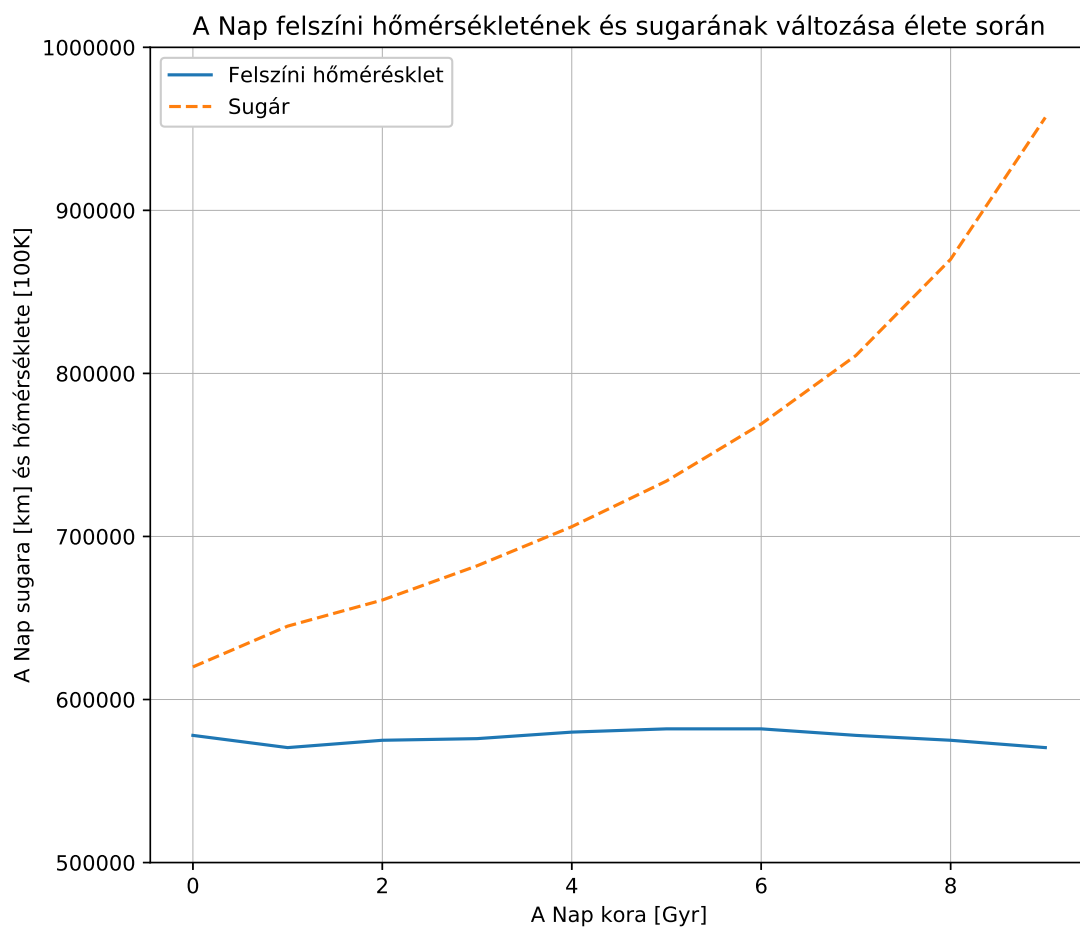


10. ábra. A földi hőmérséklet várható jövőbeli értéke. A: 330K, a légköri vízgőz mennyisége gyorsan növekedik. B: 420K, kihal a bolygón lévő élet. C: 480K, beáll a fékevesztett üvegházhatás. [17]

Csillagászati léptékekben viszonylag rövid életünk miatt igen nehéz a csillagok evolúciójára pontos modellt készíteni. Hozzávetőlegesen láthatjuk a csillagfejlődési stádiumokat a HRD-n, viszont a lakhatósági zónák időtállósága szempontjából fontos lenne pontosabb képet kapnunk az egyes mennyiségekről. I. Ribas cikkében szereplő első ábra által viszonylag jó becslést tehetünk a Nap egyes életszakaszaihoz tartozó felszíni hőmérséklet- és sugárértékekre, melyeket az 1. táblázatban láthatunk [18]. Az adatok kezeléséhez saját magam által írt szkript áll rendelkezésre, melyet a Függelék 1. pontjában találunk.

Kor[Gyr]	Sugár[km]	T_{eff} [K]
1	620000	5780
2	645000	5705
3	661000	5750
4	682000	5760
5	706000	5800
6	734000	5820
7	769000	5820
8	811000	5780
9	870000	5750
10	957000	5705

1. táblázat. A becsült sugár- és hőmérsékletértékek Napunk fejlődése során.

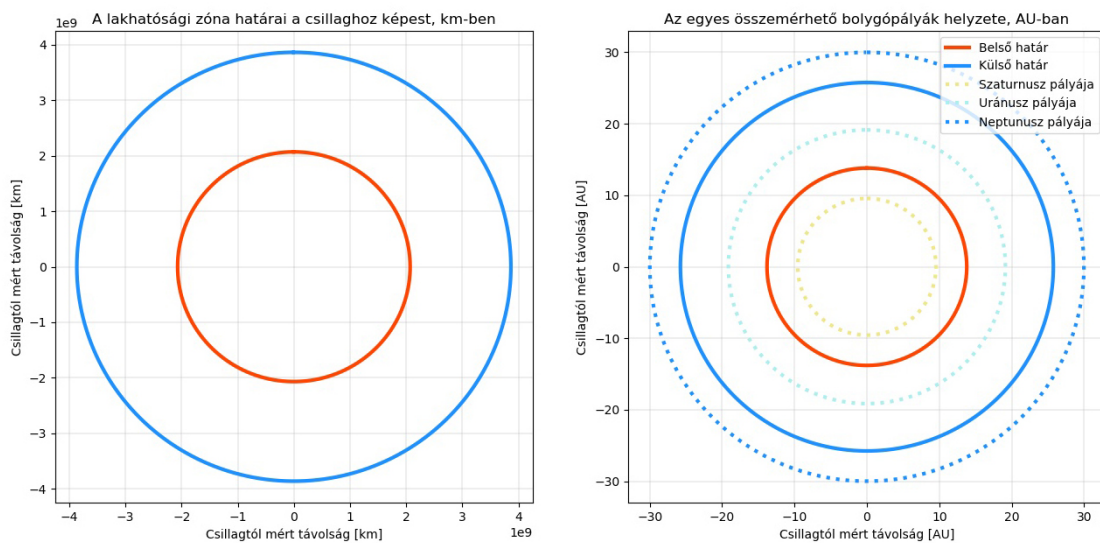


11. ábra. A Nap felszíni hőmérsékletének és sugarának alakulása - saját készítésű ábra I. Ribas cikkének nyomán. [18]

3. Lakhatóságizóna-kalkulátor

3.1. Kétpaneles ábrázolóprogram - a CHZ kalkulálása és ábrázolása

Programozási feladataim során gyakran visszatértem a megírt kódokhoz, hogy átdolgozzam és effektívebbé tegyem őket. Az alapgondolat abban merült ki, hogy egy olyan programot készítsék, mely néhány bemeneti adat alapján (a csillag sugara és felszíni hőmérséklete, a tekintett bolygó albedója) kiszámolja a kérdéses planéta számára alkalmas, az élet kialakulásához megfelelő zóna határait, majd azokat egy kétdimenziós grafikonon ábrázolja. A kód a már felvezetett (6) egyenletet használja. Paneles ábrák segítségével egy ábrapárt tudtam ábrázolni. Az első grafikon km-ben, a második grafikon csillagászati egységben (CsE, ill. AU, mint Astronomical Unit) mutatja az eredményt. Továbbá (hogy legyen viszonyítási alapunk), kiegészítettem az utóbbit egy bolygóosztállyal és egy függvénnyel, amely a számolt értékekkel összemérhető, konzekvens bolygópályákat jeleníti meg és írhatja ki a terminálban. A program második verziója minden kezdeti feladatot kielégített, az eredményét a 12. és 13. ábrákon láthatjuk, illetve a szkriptet a Függelék 2. pontja tartalmazza.



12. ábra. Az ábrázolószoftverem második verziójának végeredménye - a megjelenített ábrapár.

```
Ez a program a megadott paraméterek alapján kiszámolja és ábrázolja  
a lakhatósági zóna határait egy csillag körül.
```

```
Add meg a csillag sugarát km-ben: 20000000  
Add meg a csillag felszíni hőmérsékletét K-ben: 6000  
Add meg a bolygó albedóját: 0.36
```

```
A csillag sugara: 20000000 km  
A csillag felszíni hőmérséklete: 6000 K  
A bolygó albedója: 0.36
```

```
A lakhatósági zóna külső határa: 3864267600.53 km = 25.762 AU  
A lakhatósági zóna belső határa: 2070021347.10 km = 13.800 AU  
A lakhatósági zóna közepe: 2967144473.81 km = 19.781 AU
```

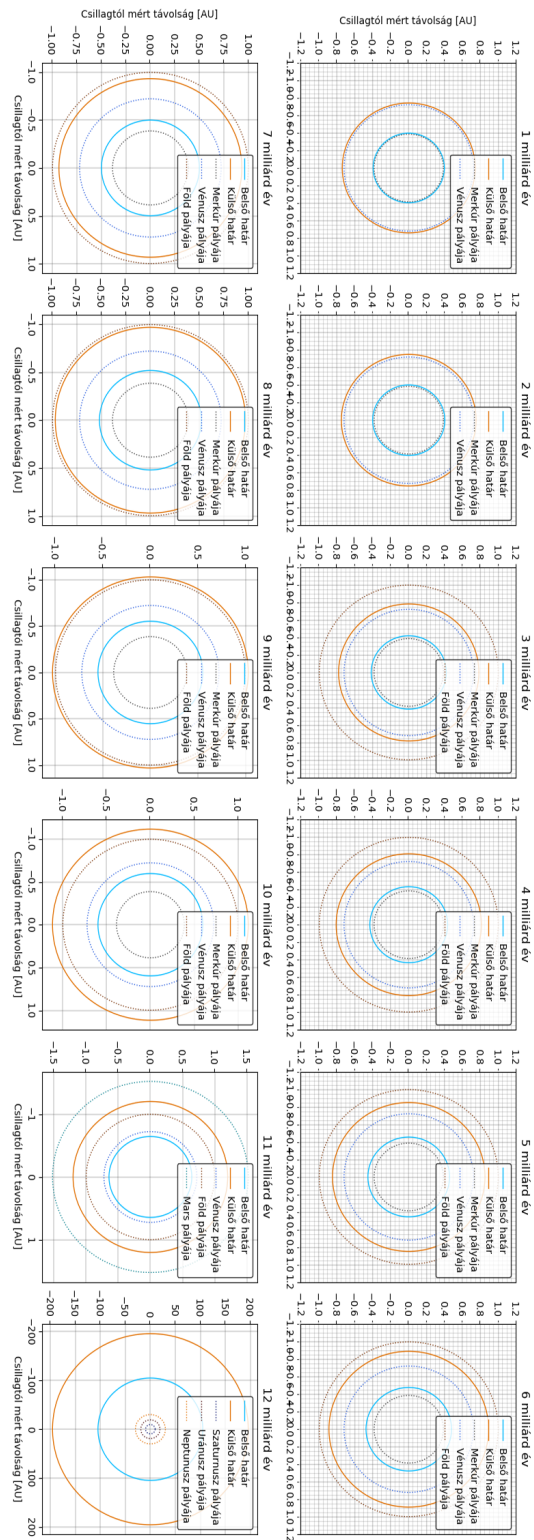
```
A(z) Szaturnusz félnagy tengelyének nagysága: 1433400000.00 km = 9.556 AU  
A(z) Uránusz félnagy tengelyének nagysága: 2870970000.00 km = 19.140 AU  
A(z) Neptunusz félnagy tengelyének nagysága: 4498200000.00 km = 29.988 AU
```

13. ábra. Az ábrázolószoftverem második verziójának végeredménye - a bemeneti és kimeneti adatok.

3.2. Tízpaneles ábrázolóprogram - a CHZ időbeli fejlődése

Több ötlet közül a legígéretesebb annak a programnak az elkészítése volt, mely segítségével nyomon tudjuk követni egy lakhatósági zóna alakulását a központi csillag fejlődésén keresztül. Az előző verzió után 2 helyett 12 (későbbiekben 10) képkocka elkészítése volt a cél. Az egyes alábrák a csillag bizonyos stádiumait jelentik meg. A 2.6. fejezetben már bemutattam azt az adatsort, melyet használunk is a program működése során. A második verzióhoz hasonlóan itt is ábrázolásra kerülnek a konzekvens bolygópályák, képkockánként eltérően, mindig az adott sugárértékek által meghatározva. Minden információt megtalálunk a terminálban, hiszen a program alábránként kiírja az adott sugarakat km-ben és csillagászati egységben. Egy hónapnyi munkával elértem egy megfelelő minőségi szintet a szoftverrel, viszont továbbra is volt min javítani, hiszen a kód közel 3000 sort tartalmazott, az egész ismétlődött 1-től 12-ig. Ez már az ötödik változat volt, s az ekkor elért eredmény a 14. ábrán, a kiíratott információ egy része pedig a 15. ábrán látható. A 14. ábra nem az egzakt plotot mutatja, hiszen ekkor fekete alappal kísérleteztem, melyen élénkebbnek látszanak a koncentrikus körök, viszont nyomtatás szempontjából a fehér alap takarékosabb, így inverz képet illesztettem be. A felső sorban lévő, sűrű rácsháló a folyamatos tesztek eredménye, viszont ezt a verziót nem folytattam tovább.

Következő célok közé tartozott a szöveg- és adatfájlok kezelése (ezek után tudtam elkészíteni az 5.1. fejezetben lévő szkriptet), a tengelyek egységesítése, hogy tisztább képet kaphassunk, illetve a zóna színnel való kitöltése, mivel túl sok kör ábrázolása zavaróvá válhat. További gyakorlás után sikeresen lerövidítettem a szkriptet 300-400 sorra for ciklusok segítségével, így sokkal kényelmesebb használat és átláthatóság vált lehetővé, valamint elsajátítottam a fájlkezelés eszközeit, amivel már képes voltam szöveges dokumentumokkal dolgozni. Utóbbi először for ciklusokkal oldottam meg és listákba szedtem az adatokat, melyeket újabb ciklus segítségével könnyedén tudtam ábrázoltatni. Mivel egy ábráról beszélünk, az ábrázolásnál egységesítettem a tengelyeket, hogy azok fixek legyenek és jobban nyomon követhessük a zóna változását. A területek kitöltése volt az egyik legnehezebb feladat, viszont hosszas böngészés után ezt is sikerült megoldani.



14. ábra. Az ábrázolószoftverem ötödik verziójának végeredménye - az ábrázolt képsorozat. Az itt látható értékek teszt jellegűek, csupán durva becslések, hogy láthassuk a program működését.

```

A lakhatósági zóna külső határa: 112669329.39 km = 0.751 AU
A lakhatósági zóna belső határa: 60355011.90 km = 0.402 AU
A lakhatósági zóna mediánja: 86512170.64 km = 0.577 AU
A(z) Merkúr félnagytengelyének nagysága: 57910000.00 km = 0.386 AU
A(z) Vénusz félnagytengelyének nagysága: 108200000.00 km = 0.721 AU

A lakhatósági zóna külső határa: 117292932.95 km = 0.782 AU
A lakhatósági zóna belső határa: 62831796.39 km = 0.419 AU
A lakhatósági zóna mediánja: 90062364.67 km = 0.600 AU
A(z) Merkúr félnagytengelyének nagysága: 57910000.00 km = 0.386 AU
A(z) Vénusz félnagytengelyének nagysága: 108200000.00 km = 0.721 AU
A(z) Föld félnagytengelyének nagysága: 149600000.00 km = 0.997 AU

A lakhatósági zóna külső határa: 121440637.60 km = 0.810 AU
A lakhatósági zóna belső határa: 65053650.07 km = 0.434 AU
A lakhatósági zóna mediánja: 93247143.83 km = 0.622 AU
A(z) Merkúr félnagytengelyének nagysága: 57910000.00 km = 0.386 AU
A(z) Vénusz félnagytengelyének nagysága: 108200000.00 km = 0.721 AU
A(z) Föld félnagytengelyének nagysága: 149600000.00 km = 0.997 AU

```

15. ábra. Az ábrázolószoftverem ötödik verziójának végeredménye - a terminálban megjelenített információ egy része.

Egyéb ötlet volt még az egyes ábrapanelek összetolása, esztétikai okokból, a tengelyfeliratok alsó sorban és bal oldalt való megjelenítése, valamint az egyes ábrákhoz tartozó korok bal fent való megjelenítése, hogy megspórolhassuk az alábrák címeinek fenntartott helyet a sűrítéshez. Egyéb gondot jelentett a jelmagyarázatban szereplő címkék ismétlődése, de ezt is sikerült megoldani, így egyetlen szövegdobozban megtekinthető az összes szükséges felirat. Előrelépést jelent még a szoftver kapcsán, hogy indítás után bekér egyes adatokat, mint például azt, hogy km-ben vagy napsugárban van-e megadva a sugár, hasonlóan a korról, ezenkívül lekérdezi az albedót és a beolvasni kívánt fájlt. Ha a bemeneti paraméterek nem megfelelőek, hibaparancsot kapunk a terminálban, s újra beírhatjuk a választ, vagyis a program nem omlik össze egy véletlen melléütés eredményeképpen. A kezelt fájl itt is három oszlop-ból kell, hogy álljon: kor, sugár, felszíni hőmérséklet, a sorrendet figyelembe véve. Ha mindent helyesen adtunk meg, a program lefut, megkapjuk az ábrákat és az információkat a terminálban. A végeredmény a 16., 17., 18. és 19. ábrán látható. A teljes programot a Függelékben, pontosan annak 3. pontjában találhatjuk.

```

Murvai Adrián
2019, Szeged
BSc Szakdolgozat
Lakhatóság és lakhatósági zónák a Naprendszerben és más bolygórendszerekben

A program egy 3-oszlopos fájlt tud beolvasni, melynek sorra tartalmaznia kell:
csillag kora, csillag sugara, csillag felszíni hőmérséklete.

Gyr-ben/Milliárd évben van megadva a kor? (I/N) I
Km-ben van megadva a sugár? (I/N) I
Mekkora az albedó értéke? 0.36
Melyik fájlt olvassa be a program?star_par.txt

1 620000 5780
2 645000 5705
3 661000 5750
4 682000 5760
5 706000 5800
6 734000 5820
7 769000 5820
8 811000 5780
9 870000 5750
10 957000 5705

```

16. ábra. Az ábrázolószoftverem hetedik verziójának végeredménye - a bemeneti értékek.

```

=====
Kor: 2Gyr
Sugár: 645000km
Hőm: 5705K

A lakhatósági zóna belső határa: 60355011.90 km = 0.402 AU
A lakhatósági zóna külső határa: 112669329.39 km = 0.751 AU
A lakhatósági zóna közepe: 86512170.64 km = 0.577 AU

A(z) Merkúr félnagytengelyének nagysága: 57910000.00 km = 0.386 AU
A(z) Vénusz félnagytengelyének nagysága: 108200000.00 km = 0.721 AU

=====

Kor: 3Gyr
Sugár: 661000km
Hőm: 5750K

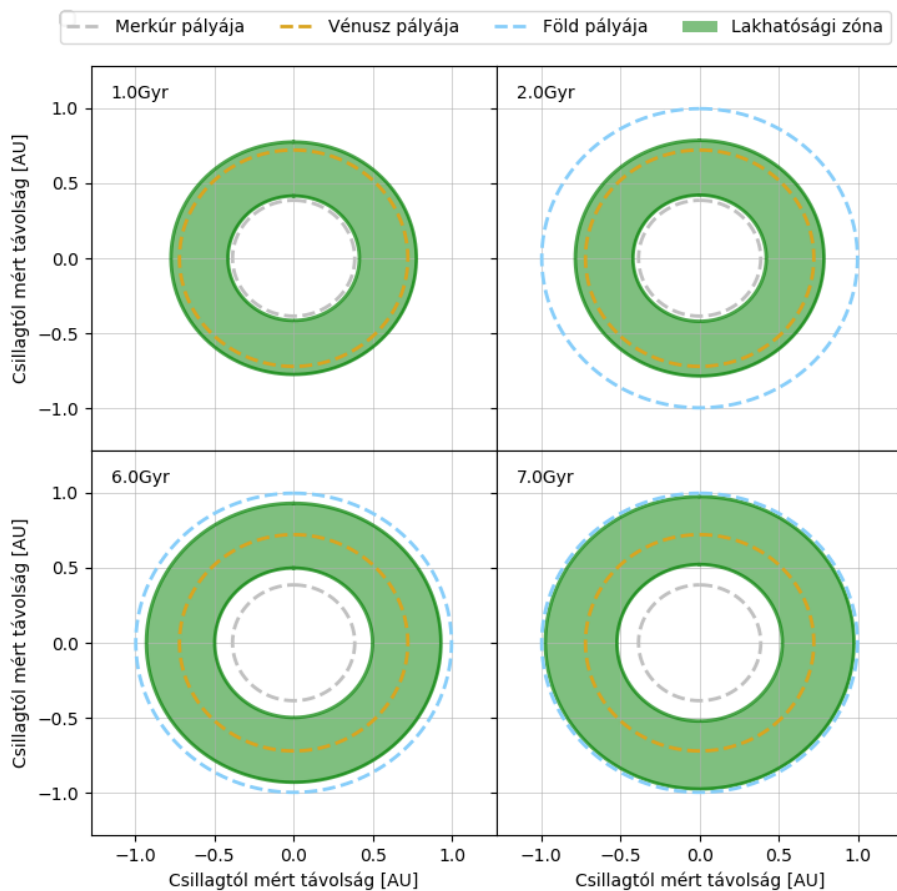
A lakhatósági zóna belső határa: 62831796.39 km = 0.419 AU
A lakhatósági zóna külső határa: 117292932.95 km = 0.782 AU
A lakhatósági zóna közepe: 90062364.67 km = 0.600 AU

A(z) Merkúr félnagytengelyének nagysága: 57910000.00 km = 0.386 AU
A(z) Vénusz félnagytengelyének nagysága: 108200000.00 km = 0.721 AU
A(z) Föld félnagytengelyének nagysága: 149600000.00 km = 0.997 AU

=====

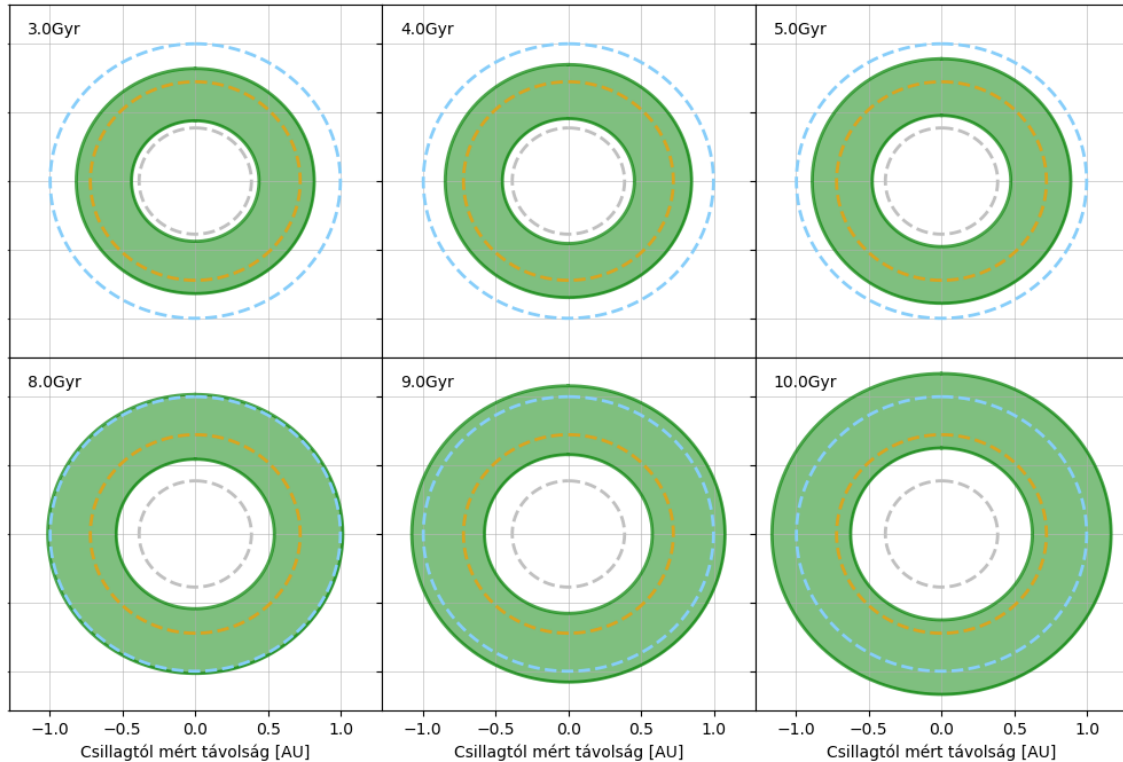
```

17. ábra. Az ábrázolószoftverem hetedik verziójának végeredménye - a terminálban megjelenített információ egy része.



18. ábra. Az ábrázolószoftverem hetedik verziójának végeredménye - az ábrázolt ábrásor bal oldala.

Az adott csillag lakhatósági zónája fejlődése során, az összemérhető bolygópályákkal ábrázolva



19. ábra. Az ábrázolószoftverem hetedik verziójának végeredménye - az ábrázolt ábrásor jobb oldala. Mivel összefügg a 18. ábrával, jelmagyarázatuk és címük megegyezik.

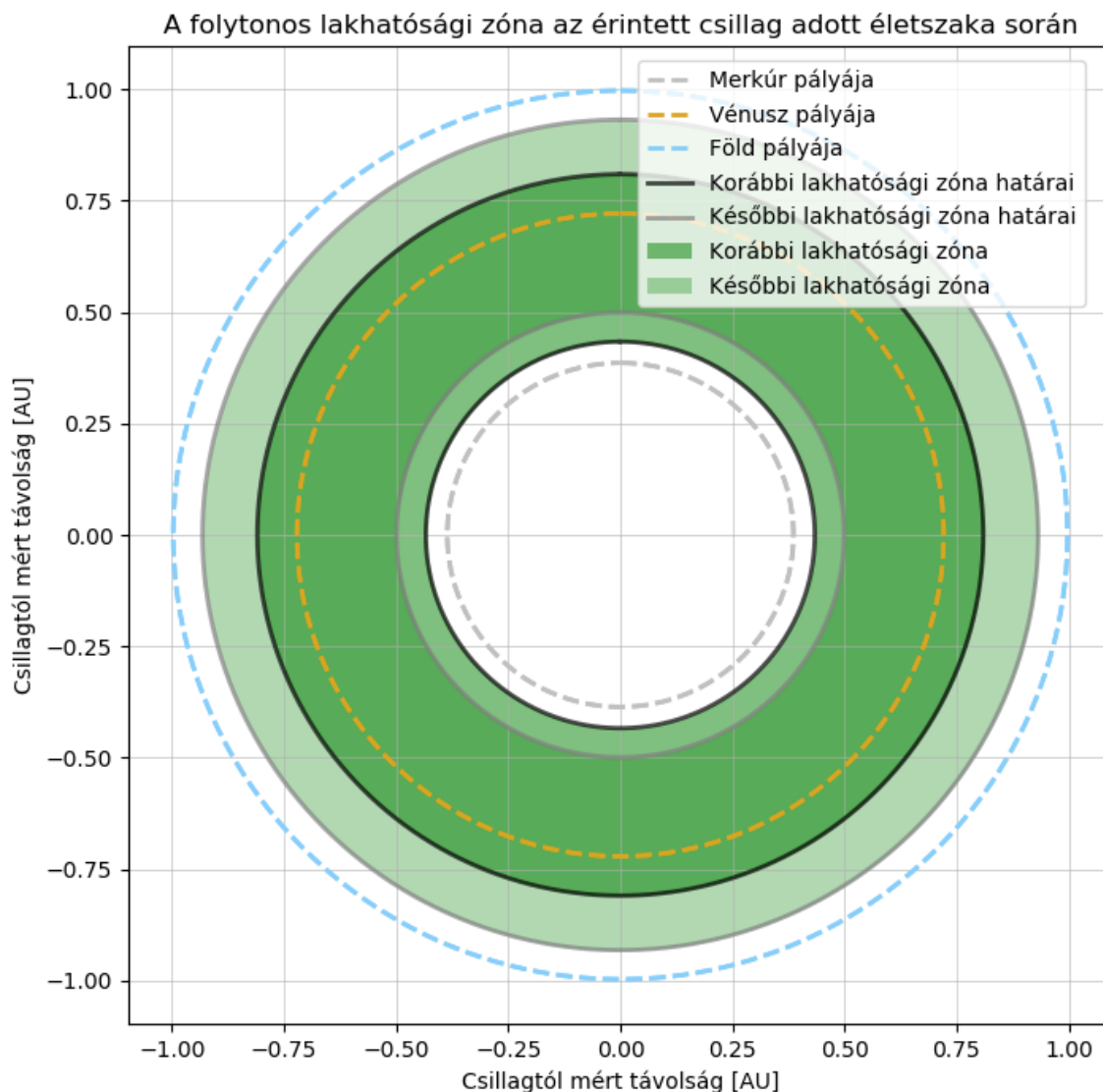
3.3. Folytonos lakhatósági zónákat ábrázoló program

A 2.2.2. fejezetben néhány mondatban már részleteztem a folytonos lakhatósági zóna mibenlétét. Újabb ötletként merült fel az, hogy ha már van egy idősorunk több állapothoz tartozó CHZ-val, elkészíthető lenne egy olyan program, amely összehasonlítja kettőt. Legújabb, egyben szakdolgozatom során utolsóként kifejlesztett szoftverem hasonlóan működik, mint az eddigiek: bekér egy fájlt, lekérdezi a mennyiségeket. Ezen felül meg kell még adnunk, hogy az adatfájlunk mely két sorával kívánunk dolgozni, vagyis hogy melyik két állapotot szeretnénk összehasonlítani. Természetesen, ahogyan az az előző verziókban volt, itt sem lehet bármilyen inputot megadni, kizárólag az adott sorszám tartományon értelmezett számot fogad el a futó szkript. Ezek figyelembe vételével, helyes paraméterezés után egyetlen ábrát láthatunk a csillag két különböző fejlettségi állapotához tartozó CHZ-val, melyek metszete megadja a folytonos lakhatósági zónát. Ez a kód is megtalálható a Függelékben 4. pontjában, továbbá az adatsorunk 4. és 7. sorának összevetését a 21. ábrán láthatjuk.

```
Melyik sor legyen a kezdeti állapot? utolsó
Adj meg egy valós értéket! 11
Adj meg egy valós értéket! 10
Melyik sor legyen a végső állapot? 3
A későbbi nem lehet hamarabb a korábbinál!

Melyik sor legyen a kezdeti állapot? 4
Melyik sor legyen a végső állapot? 7
```

20. ábra. A program bemeneti ellenőrzésének bemutatása a tízsoron adatfájlban.



21. ábra. A program által kiszámolt és megjelenített zónák különbsége: a folytonos lakhatósági zóna.

3.4. Gyakorlati alkalmazások

Fontos kitérni arra is, hogy miért és miképpen hasznosak az eddig részletezett programok. Először is lehetővé válik a felhasználónak, hogy jobban átláthassa a lakhatósági zónákkal kapcsolatos fogalmakat. A kétpaneles kalkulátor három bemeneti értékkel működik, így nagyon egyszerűen lehet kísérletezni azzal, hogy adott paraméterű csillagok körül milyen területen is érdemes az exobolygók tüzesebb vizsgálata. A kód használatával tisztább képet kaphatunk az egyensúlyi hőmérséklet mibőléről. Az tízpaneles ábrázolóprogram egy tíz soros adatfájlból dolgozik, melyben az értékek lehetnek empirikusak, kevésbé valószínűek. A szoftver célja, hogy a központi csillag luminozitás-változásával járó lakhatóságizóna-vándorlást szemléltesse, akár becsült mennyiségek alapján. A folytonos lakhatósági zónát megjelenítő program elviekben ugyanúgy működik, mint az előbbi. Ellenben nem tíz ábrát láthatunk, hanem egyet, amin az adatfájlból tetszőlegesen kiválasztott két adathármashoz tartozó értékek különbségét figyelhetjük meg. A szóban forgó szoftver használata szemléletesebb eredményt ad, ha azt a területet akarjuk vizsgálni/bemutatni, ahol hosszú távon fennmaradhat az esetleges élet.

Az általam írt kódok főként az oktatásban és bemutatók során lehetnek hasznosak, remek szemléltetőeszközként szolgálhatnak előadások alkalmával is. További fejlesztések árán akár a tudományos szinten is megállhatják a helyüket, valamint hasznos segítséget nyújthatnak egyes vizsgálatokban is.

Összefoglalás

Szakedolgozatom során elmélyítettem az egyes lakhatósággal kapcsolatos fogalmakat és információkat, a kitűzött célokat sikeresen elértem. Megtanultam elfogadható szinten programozni python nyelven, emellett még további motivációt szereztem, hogy megismerkedjek egyéb nyelvekkel, pl. C#. Számos, témám szempontjából viszonylag hasznos programot sikerült megírnom, amelyeket akár tudományos munkához, akár bemutatókhoz és előadásokhoz is fel lehet használni. Mindenképp megérné még a továbbiakban folytatnom az egyes szoftverek fejlesztését egyéb faktorok implementálásával, pl. a légköri összetétel hatásai. Úgy vélem, megtaláltam azt az útvonalat, amit a későbbiekben követni szeretnék.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék ezúton is köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Szalai Tamásnak a sok javaslatért és segítségért, valamint a folyamatos lektorálásért. Továbbá köszönöm Dobos Verának, az MTA CSFK Csillagászati Intézet tudományos munkatársának a szakmai tanácsokat.

Függelék

A legtöbb kódban szereplő bolygóosztály és függvény(ek) és blokk(ok):

```
# megjelenítendő bolygók paramétereire hivatkozó függvény
def planets(d_med_AU):
    if d_med_AU <= 0.4:
        d_in = mercury.d
        d_mid = 0
        d_out = 0
        lab_in = mercury.name
        lab_mid = ""
        lab_out = ""
        col_in = mercury.color
        col_mid = "white"
        col_out = "white"
        is_orb_1 = False
        is_orb_2 = False
    elif 0.4 < d_med_AU <= 0.60:
        d_in = mercury.d
        d_mid = venus.d
        d_out = 0
        lab_in = mercury.name
        lab_mid = venus.name
        lab_out = ""
        col_in = mercury.color
        col_mid = venus.color
        col_out = "white"
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = False
    elif 0.60 < d_med_AU <= 0.9:
        d_in = mercury.d
        d_mid = venus.d
        d_out = earth.d
        lab_in = mercury.name
        lab_mid = venus.name
        lab_out = earth.name
        col_in = mercury.color
        col_mid = venus.color
        col_out = earth.color
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = True
    elif 0.9 < d_med_AU <= 1.5:
        d_in = venus.d
        d_mid = earth.d
        d_out = mars.d
        lab_in = venus.name
        lab_mid = earth.name
        lab_out = mars.name
        col_in = venus.color
        col_mid = earth.color
        col_out = mars.color
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = True
    elif 1.5 < d_med_AU <= 2:
        d_in = earth.d
        d_mid = mars.d
        d_out = 0
        lab_in = earth.name
        lab_mid = mars.name
        lab_out = ""
        col_in = earth.color
        col_mid = mars.color
        col_out = "white"
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = False
    elif 2 < d_med_AU <= 2.5:
        d_in = earth.d
        d_mid = mars.d
        d_out = jupiter.d
        lab_in = earth.name
        lab_mid = mars.name
        lab_out = jupiter.name
        col_in = earth.color
        col_mid = mars.color
        col_out = jupiter.color
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = True
    elif 2.5 < d_med_AU <= 5:
        d_in = mars.d
        d_mid = jupiter.d
        d_out = 0
        lab_in = mars.name
        lab_mid = jupiter.name
        lab_out = ""
        col_in = mars.color
        col_mid = jupiter.color
        col_out = "white"
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = False
    elif 5 < d_med_AU <= 7:
        d_in = mars.d
        d_mid = jupiter.d
        d_out = saturn.d
        lab_in = mars.name
        lab_mid = jupiter.name
        lab_out = saturn.name
        col_in = mars.color
        col_mid = jupiter.color
        col_out = saturn.color
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = True
    elif 7 < d_med_AU <= 9:
        d_in = jupiter.d
        d_mid = saturn.d
        d_out = 0
        lab_in = jupiter.name
        lab_mid = saturn.name
        lab_out = ""
        col_in = jupiter.color
        col_mid = saturn.color
        col_out = "white"
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = False
    elif 9 < d_med_AU <= 14:
        d_in = jupiter.d
        d_mid = saturn.d
        d_out = uranus.d
        lab_in = jupiter.name
        lab_mid = saturn.name
        lab_out = uranus.name
        col_in = jupiter.color
        col_mid = saturn.color
        col_out = uranus.color
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = True
    elif 14 < d_med_AU:
        d_in = saturn.d
        d_mid = uranus.d
        d_out = neptune.d
        lab_in = saturn.name
        lab_mid = uranus.name
        lab_out = neptune.name
        col_in = saturn.color
        col_mid = uranus.color
        col_out = neptune.color
        is_orb_1 = True
        is_orb_2 = True
    plist = {"d_in":d_in, "d_mid":d_mid, "d_out":d_out,
            "lab_in":lab_in, "lab_mid":lab_mid,
            "lab_out":lab_out, "col_in":col_in,
            "col_mid":col_mid, "col_out":col_out,
            "is_orb_1":is_orb_1, "is_orb_2":is_orb_2}
    return plist
```



```

# bolygók osztályba sorolása, paraméterezése
class planet():

    def __init__(self, name, d, color):
        self.name = name
        self.d = d
        self.color = color

mercury = planet("Merkúr", 57910000, "silver")
venus = planet("Vénusz", 108200000, "goldenrod")
earth = planet("Föld", 149600000, "lightskyblue")
mars = planet("Mars", 227900000, "salmon")
jupiter = planet("Jupiter", 778500000, "sandybrown")
saturn = planet("Szaturnusz", 1433400000, "khaki")
uranus = planet("Uránusz", 2870970000, "paleturquoise")
neptune = planet("Neptunusz", 4498200000, "dodgerblue")

# maximális T_e függvény
def eq_temp_max(alb, rad_km, temp_K):
    global isKm
    eq_temp_max = 373
    if not isKm:
        rad_km = rad_km*695000
    d_min = (temp_K/eq_temp_max)**(2) * math.sqrt(1-alb) * rad_km / 2
    d_min_AU = d_min/150000000
    print("A lakhatósági zóna belső határa: " + "%.2f" % d_min + " km = " + "%.3f" % d_min_AU + " AU")
    return d_min

# minimális T_e függvény
def eq_temp_min(alb, rad_km, temp_K):
    global isKm
    eq_temp_min = 273
    if not isKm:
        rad_km = rad_km*695000
    d_max = (temp_K/eq_temp_min)**(2) * math.sqrt(1-alb) * rad_km / 2
    d_max_AU = d_max/150000000
    print("A lakhatósági zóna külső határa: " + "%.2f" % d_max + " km = " + "%.3f" % d_max_AU + " AU")
    return d_max

# ábrázoláshoz szükséges koordináták kiszámítása
t = arange(0,2*pi,.01)
# első bolygó km
x_in = d_in*sin(t)
y_in = d_in*cos(t)
# első bolygó AU
x_in_AU = d_in_AU*sin(t)
y_in_AU = d_in_AU*cos(t)
# második bolygó km
x_mid = d_mid*sin(t)
y_mid = d_mid*cos(t)
# második bolygó AU
x_mid_AU = d_mid_AU*sin(t)
y_mid_AU = d_mid_AU*cos(t)
# harmadik bolygó km
x_out = d_out*sin(t)
y_out = d_out*cos(t)
# harmadik bolygó AU
x_out_AU = d_out_AU*sin(t)
y_out_AU = d_out_AU*cos(t)
# benti
x_min_AU = d_min_AU*sin(t)
y_min_AU = d_min_AU*cos(t)
# kinti
x_max_AU = d_max_AU*sin(t)
y_max_AU = d_max_AU*cos(t)

```


A Nap paramétereinek időbeli fejlődését ábrázoló szkript

```
import math
import numpy as np
import pylab as pl

datafile = input("Beolvasni kívánt fájl: ")
##datafile = "star_par.txt"

sed = np.loadtxt(str(datafile), unpack=True)
fig = pl.figure(figsize=(8,7))
rad = sed[1]
temp = sed[2]*100
age = sed[0]
for rad in sed[2:]:
    pl.plot(temp, label = "Felszíni hőmérséklet")
for rad in sed[1:2]:
    pl.plot(rad, label = "Sugár", linestyle = "--")

pl.ylabel("A Nap sugara [km] és hőmérséklete [100K]")
pl.xlabel("A Nap kora [Gyr]")
pl.title("A Nap felszíni hőmérsékletének és sugarának változása élete során")
pl.grid(linestyle = '-', linewidth = 0.3)
pl.ylim(500000,1000000)
pl.legend()

##pl.yscale('log')
pl.savefig("sunEvolution.eps")
pl.savefig("sunEvolution.jpg")
pl.show()
```

Az egyszerű lakhatóságizóna-kalkulátor

```
import math
from numpy import *
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pylab

##rad_km = 20000000
##temp_K = 6000
##alb = 0.36

# input adatok
print("Ez a program a megadott paraméterek alapján kiszámolja és ábrázolja\n
a lakhatósági zóna határait egy csillag körül.\n")
rad_km = int(input("Add meg a csillag sugarát km-ben: "))
temp_K = int(input("Add meg a csillag felszíni hőmérsékletét K-ben: "))
alb = float(input("Add meg a bolygó albedóját: "))
print()
print("A csillag sugara: " + str(rad_km) + " km")
print("A csillag felszíni hőmérséklete: " + str(temp_K) + " K")
print("A bolygó albedója: " + str(alb) + "\n")

#távolságok
d_max = eq_temp_min()
d_min = eq_temp_max()
d_max_AU = d_max/150000000
d_min_AU = d_min/150000000
d_med = (d_min + d_max)/2
d_med_AU = (d_max_AU + d_min_AU)/2
print("A lakhatósági zóna közepe: " + "%.2f" % d_med + " km = " + "%.3f" % d_med_AU + " AU")

# átváltás AU-ba
d_in_AU = d_in/150000000
d_mid_AU = d_mid/150000000
d_out_AU = d_out/150000000
```

```

print("\nA(z) " + str(lab_in) + " félnagytengelyének nagysága: "
      + "%.2f" % d_in + " km = " + "%.3f" % d_in_AU + " AU")

# középső bolygó?
if is_orb_1 == True:
    orb_1 = " pályája"
    print("A(z) " + str(lab_mid) + " félnagytengelyének nagysága: "
          + "%.2f" % d_mid + " km = " + "%.3f" % d_mid_AU + " AU")
else:
    orb_1 = ""

# külső bolygó?
if is_orb_2 == True:
    orb_2 = " pályája"
    print("A(z) " + str(lab_out) + " félnagytengelyének nagysága: "
          + "%.2f" % d_out + " km = " + "%.3f" % d_out_AU + " AU")
else:
    orb_2 = ""

## plot
fig = plt.figure(figsize=(15.5,7))

## jobb oldali ábra
plt.subplot(122)
# bemenő AU
plt.plot(x_min_AU,y_min_AU, color = "orangered", label = "Belső határ", linewidth = 3)
plt.plot(x_max_AU,y_max_AU, color = "dodgerblue", label = "Külső határ", linewidth = 3)
# bolygók AU
plt.plot(x_in_AU,y_in_AU, color = col_in, label = lab_in + " pályája", linewidth = 3, linestyle = ":")
plt.plot(x_mid_AU,y_mid_AU, color = col_mid, label = lab_mid + orb_1, linewidth = 3, linestyle = ":")
plt.plot(x_out_AU,y_out_AU, color = col_out, label = lab_out + orb_2, linewidth = 3, linestyle = ":")
pylab.legend(loc='upper right')
plt.xlabel("Csillagtól mért távolság [AU]")
plt.ylabel("Csillagtól mért távolság [AU]")
plt.title("Az egyes összemérhető bolygópályák helyzete, AU-ban")
plt.grid(linestyle = '--', linewidth = 0.3)

## bal oldali ábra
plt.subplot(121)
# bemenő km
plt.plot(x_min,y_min, color = "orangered", linewidth = 3)
plt.plot(x_max,y_max, color = "dodgerblue", linewidth = 3)
plt.xlabel("Csillagtól mért távolság [km]")
plt.ylabel("Csillagtól mért távolság [km]")
plt.title("A lakhatósági zóna határai a csillaghoz képest, km-ben")
circle1 = plt.Circle((0,0), 10, color = "blue")
plt.gca().add_artist(circle1)
plt.grid(linestyle = '--', linewidth = 0.3)

plt.show()

#400000 M
#410000-600000 M-V
#610000-900000 M-V-F
#910000-1500000 V-F-M
#1600000-2000000 F-M
#2100000-2500000 F-M-J
#2600000-5000000 M-J
#5100000-7000000 M-J-S
#7100000-9100000 J-S
#9200000-14100000 J-S-U
#14200000- S-U-N

```

A lakhatósági zóna fejlődését szemléltető szoftver

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math
import pylab
from numpy import *
from collections import OrderedDict

# bemutatkozás
print("Murvai Adrián\n2019, Szeged\nBSc Szakdolgozat\nLakhatóság és lakhatósági zónák  
a Naprendszerben és más bolygórendszerekben\n")
print("A program egy 3-oszlopos fájlt tud beolvasni, melynek sorra tartalmaznia kell: \n  
csillag kora, csillag sugara, csillag felszíni hőmérséklete.\n")

# mértékegységek és albedó lekérdezése
inAge = input("Gyr-ben/Milliárd évben van megadva a kor? (I/N) ")
isAge = False
while not isAge:
    if inAge == "I":
        lbAge = "Gyr"
        isAge = True
    elif inAge == "N":
        inAge = input("Myr-ben/Millió évben van megadva a kor? (I/N) ")
        while not isAge:
            if inAge == "I":
                lbAge = "Myr"
                isAge = True
            elif inAge == "N":
                inAge = input("Évben van megadva a kor? (I/N) ")
                while not isAge:
                    if inAge == "I":
                        lbAge = "yr"
                        isAge = True
                    elif inAge == "N":
                        print("Egyéb mennyiséggel nem számol a program!")
                        exit()
                    else:
                        inAge = input()
                else:
                    inAge = input()
        else:
            inAge = input()
    else:
        inAge = input()

inRad = input("Km-ben van megadva a sugár? (I/N) ")
isRad = False
while not isRad:
    if inRad == "I":
        lbRad = "km"
        isKm = True
        isRad = True
    elif inRad == "N":
        inRad = input("Napsugárban van megadva a sugár? (I/N) ")
        while not isRad:
            if inRad == "I":
                lbRad = "R_Nap"
                isKm = False
                isRad = True
            elif inRad == "N":
                print("Egyéb mennyiséggel nem számol a program!")
                exit()
            else:
                inRad = input()
        else:
            inRad = input()
    else:
        inRad = input()
```

```

alb = input("Mekkora az elbedő értéke? ")
isAlb = False
while not isAlb:
    try:
        alb = float(alb)
        if alb > 1 or alb < 0:
            print("Helytelen érték!")
            alb = input("Mekkora az elbedő értéke? ")
        elif 1 >= alb >= 0:
            isAlb = True
    except ValueError:
        print("Helytelen érték!")
        alb = input("Mekkora az elbedő értéke? ")

# fájl beolvasása
isFile = False
while not isFile:
    try:
        fileName = input("Melyik fájlt olvassa be a program? ")
        file = open(fileName)
        isFile = True
    except:
        print("Helytelen fájlnev!")

lines = file.readlines()
age = []
radi = []
temp = []
for i in lines:
    age.append(i.split(' ')[0])
    radi.append(i.split(' ')[1])
    temp.append(i.split(' ')[2])
print()

for i in range(len(age)):
    print(age[i] + " " + radi[i] + " " + temp[i])
file.close

# ábrázolás megkezdése
fig, abra = plt.subplots(2,5,figsize=(21,8), sharex = True, sharey = True)
t = arange(0,2*pi,.01)

# for ciklus az egyes adatokra, melyeket keresztülmennek a definiált függvényeken
for i in range(10):
    a = 0
    b = i
    if i > 4:
        a = 1
        b = i-5
    ag = age[i]
    print("\n=====\n")
    print("Kor: " + str(ag) + lbAge)
    rad_km = int(radi[i])
    print("Sugár: " + str(rad_km) + lbRad)
    temp_K = int(temp[i])
    print("Hőm: " + str(temp_K) + "K")
    print("")
    d_min = eq_temp_max(alb,rad_km,temp_K)
    d_max = eq_temp_min(alb,rad_km,temp_K)
    d_max_AU = d_max/150000000
    d_min_AU = d_min/150000000
    d_med = (d_min + d_max)/2
    d_med_AU = (d_max_AU + d_min_AU)/2
    print("A lakhatósági zóna közepe: " + "%.2f" % d_med + " km = " + "%.3f" % d_med_AU + " AU")

```

```

plist = planets(d_med_AU)
d_in = plist["d_in"]
d_mid = plist["d_mid"]
d_out = plist["d_out"]
lab_in = plist["lab_in"]
lab_mid = plist["lab_mid"]
lab_out = plist["lab_out"]
col_in = plist["col_in"]
col_mid = plist["col_mid"]
col_out = plist["col_out"]
is_orb_1 = plist["is_orb_1"]
is_orb_2 = plist["is_orb_2"]
d_in_AU = d_in/150000000
d_mid_AU = d_mid/150000000
d_out_AU = d_out/150000000

# zóna kitöltése
fig.subplots_adjust(wspace=0)
fig.subplots_adjust(hspace=0)
inner = d_min_AU
outer = d_max_AU
x = np.linspace(-outer,outer,2000,endpoint=True)
y0 = outer*np.sin(np.arccos(x/outer))
yI = inner*np.sin(np.arccos(x/inner))
yI[np.isnan(yI)] = 0.
abra[a,b].fill_between(x, yI, y0, color = "green", alpha = 0.5, linewidth = 0, label = "Lakhatósági zóna")
abra[a,b].fill_between(x, -y0, -yI, color = "green", alpha = 0.5, linewidth = 0)

# határok és pályák plottolása
abra[a,b].plot(x_min_AU,y_min_AU, color = "green", linewidth = 2, alpha = 0.7)
abra[a,b].plot(x_max_AU,y_max_AU, color = "green", linewidth = 2, alpha = 0.7)

abra[a,b].plot(x_in_AU,y_in_AU, color = col_in, label = lab_in + " pályája",
              linewidth = 2, linestyle = "--")
abra[a,b].plot(x_mid_AU,y_mid_AU, color = col_mid, label = lab_mid + orb_1,
              linewidth = 2, linestyle = "--")
abra[a,b].plot(x_out_AU,y_out_AU, color = col_out, label = lab_out + orb_2,
              linewidth = 2, linestyle = "--")

abra[a,b].grid(linestyle = '-.', linewidth = 0.4)

# lebelezés
if i == 0:
    abra[a,i].set_ylabel("Csillagtól mért távolság [AU]")
if i == 5:
    abra[a,i-5].set_ylabel("Csillagtól mért távolság [AU]")
if i > 4:
    abra[a,b].set_xlabel("Csillagtól mért távolság [AU]")

handles, labels = plt.gca().get_legend_handles_labels()
by_label = OrderedDict(zip(labels, handles))
fig.legend(by_label.values(), by_label.keys(),
          loc = "upper left",
          ncol = 6, bbox_to_anchor=(0., 1.18, 1., .102), borderaxespad=20)

left, width = .05, .9
bottom, height = .05, .9
right = left + width
top = bottom + height

abra[a,b].text(left, top, str(float(ag))+lbAge, horizontalalignment='left',
              verticalalignment='top',transform=abra[a,b].transAxes, fontsize = 10)

fig.suptitle("Az adott csillag lakhatósági zónája fejlődése során, az összemérhető bolygópályákkal ábrázolva",
            x=0.9, y=.925, horizontalalignment = "right")
plt.show()

```

A folytonos lakhatósági zónát megjelenítő kód

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math
import pylab
from numpy import *
from collections import OrderedDict

# bemutatkozás
print("Murvai Adrián\n2019, Szeged\nBSc Szakdolgozat\n
      Lakhatóság és lakhatósági zónák a Naprendszerben és más bolygórendszerekben\n")
print("A program egy 3-oszlopos fájlt tud beolvasni, melynek sorra tartalmaznia kell:
      \ncsillag kora, csillag sugara, csillag felszíni hőmérséklete.\n")

# mértékegységek és albedó lekérdezése
inAge = input("Gyr-ben/Milliárd évben van megadva a kor? (I/N) ")
isAge = False
while not isAge:
    if inAge == "I":
        lbAge = "Gyr"
        isAge = True
    elif inAge == "N":
        inAge = input("Myr-ben/Millió évben van megadva a kor? (I/N) ")
        while not isAge:
            if inAge == "I":
                lbAge = "Myr"
                isAge = True
            elif inAge == "N":
                inAge = input("Évben van megadva a kor? (I/N) ")
                while not isAge:
                    if inAge == "I":
                        lbAge = "yr"
                        isAge = True
                    elif inAge == "N":
                        print("Egyéb mennyiséggel nem számol a program!")
                        exit()
                    else:
                        inAge = input()
                else:
                    inAge = input()
        else:
            inAge = input()
    else:
        inAge = input()

inRad = input("Km-ben van megadva a sugár? (I/N) ")
isRad = False
while not isRad:
    if inRad == "I":
        lbRad = "km"
        isKm = True
        isRad = True
    elif inRad == "N":
        inRad = input("Napsugárban van megadva a sugár? (I/N) ")
        while not isRad:
            if inRad == "I":
                lbRad = "R_Nap"
                isKm = False
                isRad = True
            elif inRad == "N":
                print("Egyéb mennyiséggel nem számol a program!")
                exit()
            else:
                inRad = input()
        else:
            inRad = input()
    else:
        inRad = input()
```

```

alb = input("Mekkora az elbedő értéke? ")
isAlb = False
while not isAlb:
    try:
        alb = float(alb)
        if alb > 1 or alb < 0:
            print("Helytelen érték!")
            alb = input("Mekkora az elbedő értéke? ")
        elif 1 >= alb >= 0:
            isAlb = True
    except ValueError:
        print("Helytelen érték!")
        alb = input("Mekkora az elbedő értéke? ")

# fájl beolvasása
isFile = False
while not isFile:
    try:
        fileName = input("Melyik fájlt olvassa be a program? ")
        file = open(fileName)
        isFile = True
    except:
        print("Helytelen fájlnev!")

lines = file.readlines()
age = []
radi = []
temp = []
for i in lines:
    age.append(i.split(' ')[0])
    radi.append(i.split(' ')[1])
    temp.append(i.split(' ')[2])
print()

for i in range(len(age)):
    print(age[i] + " " + radi[i] + " " + temp[i])
file.close

a = 0
b = len(age)-1

isTrue = False
while not isTrue:
    a = input("\nMelyik sor legyen a kezdeti állapot? ")
    try:
        a = int(a)
        a -= 1
    except: ValueError
    while a not in range(0,len(age)):
        a = input("Adj meg egy valós értéket! ")
        try:
            a = int(a)
            a -= 1
        except: ValueError

    b = input("Melyik sor legyen a végső állapot? ")
    try:
        b = int(b)
        b -= 1
    except: ValueError
    while b not in range(0,len(age)):
        b = input("Adj meg egy valós értéket! ")
        try:
            b = int(b)
            b -= 1
        except: ValueError
    if b > a:
        isTrue = True
    if b < a:
        print("A későbbi nem lehet hamarabb a korábbiánál!")

```

```

ag = age[a]
print("\n=====\\n")
print("Kor: " + str(ag) + lbAge)
rad_km = int(radi[a])
print("Sugár: " + str(rad_km) + lbRad)
temp_K = int(temp[a])
print("Hőm: " + str(temp_K) + "K")

d_min = eq_temp_max(alb,rad_km,temp_K)
d_max = eq_temp_min(alb,rad_km,temp_K)
d_max_AU = d_max/150000000
d_min_AU = d_min/150000000
d_med = (d_min + d_max)/2
d_med_AU = (d_max_AU + d_min_AU)/2
print("A lakhatósági zóna közepe: " + "%.2f" % d_med + " km = " + "%.3f" % d_med_AU + " AU")

plist = planets(d_med_AU)
d_in = plist["d_in"]
d_mid = plist["d_mid"]
d_out = plist["d_out"]
lab_in = plist["lab_in"]
lab_mid = plist["lab_mid"]
lab_out = plist["lab_out"]
col_in = plist["col_in"]
col_mid = plist["col_mid"]
col_out = plist["col_out"]
is_orb_1 = plist["is_orb_1"]
is_orb_2 = plist["is_orb_2"]
d_in_AU = d_in/150000000
d_mid_AU = d_mid/150000000
d_out_AU = d_out/150000000

print("\nA(z) " + str(lab_in) + " félnagy tengelyének nagysága: "
      + "%.2f" % d_in + " km = " + "%.3f" % d_in_AU + " AU")

# középső bolygó ábrázolva?
if is_orb_1 == True:
    orb_1 = " pályája"
    print("A(z) " + str(lab_mid) + " félnagy tengelyének nagysága: "
          + "%.2f" % d_mid + " km = " + "%.3f" % d_mid_AU + " AU")
else:
    orb_1 = ""

# külső bolygó ábrázolva?
if is_orb_2 == True:
    orb_2 = " pályája"
    print("A(z) " + str(lab_out) + " félnagy tengelyének nagysága: "
          + "%.2f" % d_out + " km = " + "%.3f" % d_out_AU + " AU")
else:
    orb_2 = ""

fig = plt.figure(figsize=(8,8))

# zóna kitöltése
inner = d_min_AU
outer = d_max_AU
x = np.linspace(-outer,outer,2000,endpoint=True)
y0 = outer*np.sin(np.arccos(x/outer))
yI = inner*np.sin(np.arccos(x/inner))
yI[np.isnan(yI)] = 0.
plt.fill_between(x, yI, y0, color = "green", alpha = 0.5, linewidth = 0, label = "Korábbi lakhatósági zóna")
plt.fill_between(x, -y0, -yI, color = "green", alpha = 0.5, linewidth = 0)

# határok és pályák plottolása
plt.plot(x_in_AU,y_in_AU, color = col_in, label = lab_in + " pályája", linewidth = 2, linestyle = "--")
plt.plot(x_mid_AU,y_mid_AU, color = col_mid, label = lab_mid + orb_1, linewidth = 2, linestyle = "--")
plt.plot(x_out_AU,y_out_AU, color = col_out, label = lab_out + orb_2, linewidth = 2, linestyle = "--")
plt.plot(x_min_AU,y_min_AU, color = "black", linewidth = 2, alpha = 0.7, label = "Korábbi lakhatósági zóna határai")
plt.plot(x_max_AU,y_max_AU, color = "black", linewidth = 2, alpha = 0.7)

plt.grid(linestyle = '-.', linewidth = 0.4)
plt.ylabel("Csillagtól mért távolság [AU]")
plt.xlabel("Csillagtól mért távolság [AU]")
plt.title("A folytonos lakhatósági zóna az érintett csillag adott életszaka során")

```



```

ag = age[b]
print("\n=====\n")
print("Kor: " + str(ag) + lbAge)
rad_km = int(radi[b])
print("Sugár: " + str(rad_km) + lbRad)
temp_K = int(temp[b])
print("Hőm: " + str(temp_K) + "K")
print("")

d_min = eq_temp_max(alb,rad_km,temp_K)
d_max = eq_temp_min(alb,rad_km,temp_K)
d_max_AU = d_max/150000000
d_min_AU = d_min/150000000
d_med = (d_min + d_max)/2
d_med_AU = (d_max_AU + d_min_AU)/2
print("A lakhatósági zóna közepe: " + "%.2f" % d_med + " km = " + "%.3f" % d_med_AU + " AU")

plist = planets(d_med_AU)
d_in = plist["d_in"]
d_mid = plist["d_mid"]
d_out = plist["d_out"]
lab_in = plist["lab_in"]
lab_mid = plist["lab_mid"]
lab_out = plist["lab_out"]
col_in = plist["col_in"]
col_mid = plist["col_mid"]
col_out = plist["col_out"]
is_orb_1 = plist["is_orb_1"]
is_orb_2 = plist["is_orb_2"]
d_in_AU = d_in/150000000
d_mid_AU = d_mid/150000000
d_out_AU = d_out/150000000

print("\nA(z) " + str(lab_in) + " félnagy tengelyének nagysága: "
      + "%.2f" % d_in + " km = " + "%.3f" % d_in_AU + " AU")

# középső bolygó ábrázolva?
if is_orb_1 == True:
    orb_1 = " pályája"
    print("A(z) " + str(lab_mid) + " félnagy tengelyének nagysága: "
          + "%.2f" % d_mid + " km = " + "%.3f" % d_mid_AU + " AU")
else:
    orb_1 = ""

# külső bolygó ábrázolva?
if is_orb_2 == True:
    orb_2 = " pályája"
    print("A(z) " + str(lab_out) + " félnagy tengelyének nagysága: "
          + "%.2f" % d_out + " km = " + "%.3f" % d_out_AU + " AU")
else:
    orb_2 = ""

inner = d_min_AU
outer = d_max_AU
x = np.linspace(-outer,outer,2000,endpoint=True)
y0 = outer*np.sin(np.arccos(x/outer))
yI = inner*np.sin(np.arccos(x/inner))
yI[np.isnan(yI)] = 0.
plt.fill_between(x, yI, y0, color = "green", alpha = 0.3, linewidth = 0, label = "Későbbi lakhatósági zóna")
plt.fill_between(x, -y0, -yI, color = "green", alpha = 0.3, linewidth = 0)

# határok és pályák plottolása
plt.plot(x_min_AU,y_min_AU, color = "gray", linewidth = 2, alpha = 0.7, label = "Későbbi lakhatósági zóna határai")
plt.plot(x_max_AU,y_max_AU, color = "gray", linewidth = 2, alpha = 0.7)

plt.plot(x_in_AU,y_in_AU, color = col_in, label = lab_in + " pályája", linewidth = 2, linestyle = "--")
plt.plot(x_mid_AU,y_mid_AU, color = col_mid, label = lab_mid + orb_1, linewidth = 2, linestyle = "--")
plt.plot(x_out_AU,y_out_AU, color = col_out, label = lab_out + orb_2, linewidth = 2, linestyle = "--")

handles, labels = plt.gca().get_legend_handles_labels()
by_label = OrderedDict(zip(labels, handles))
fig.legend(by_label.values(), by_label.keys(),
           loc = "upper right",
           ncol = 1, borderaxespad=7, bbox_to_anchor=(1,0.99))
plt.show()

```

Hivatkozások

- [1] Kereszturi Ákos (2011) *Asztrobiológia*, Magyar Csillagászati Egyesület, 72. ábra
- [2] <http://davidkeener.org/2012/03/lagrange-points-simplified/>
- [3] Charles S. Cockell (2015) *Astrobiology: Understanding Life in the Universe*, Wiley Blackwell, 16.1. ábra
- [4] Ashok K. Singal (2014) *Life on a tidally-locked planet*
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Habitability_of_red_dwarf_systems
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_classification
- [7] <https://www.csillagaszat.hu/hirek/asztrofizika-hirek/af-exobolygok/a-legtobb-csillag-korulkeringhet-lakhato-bolygo/>
- [8] <http://phl.upr.edu/library/notes/summarylimitsofthenewhabitablezone>
- [9] <http://mitsensk.info/main-sequence-stars-in-the-galaxy-hd.html>
- [10] <http://pinnacleeventswnc.com/stellar-evolution-diagram/stellar-evolution-diagram-marvelous-stellar-evolution/>
- [11] <https://pages.uoregon.edu/jimbrou/astr123/Notes/Chapter28.html#evol>
- [12] C.H. Lineweaver, Y. Fenner, B.K. Gibson (2004) *The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way*, *Science* 302, 59-62
- [13] Catling D., Kasting J. (2017) *Long-Term Climate Evolution. In Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless Worlds* (pp. 299-326)
- [14] Berger A., Loutre M.F. (1991) *Quat. Sci. Rev.* 10, 297
- [15] Charles S. Cockell (2015) *Astrobiology: Understanding Life in the Universe*, Wiley Blackwell, 16.6. ábra
- [16] Sagan C., Salpeter E.E. (1976) *Particles, environments and possible ecologies in the Jovian atmosphere*
- [17] https://www.researchgate.net/figure/Points-during-the-Earths-future-temperature-evolution-at-which-biosignature-gas-levels_fig1_258082161
- [18] I. Ribas (2009) *The Sun and stars as the primary energy input in planetary atmospheres*, 1. ábra

Nyilatkozat

Alulírott Murvai Adrián Csaba, Fizika BSc szakos hallgató (CTT50T), *Lakhatóság és lakhatósági zónák a Naprendszerben és más bolygórendszerekben* című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a 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.

Szeged,évhónap

.....
aláírás