

Szegedi Tudományegyetem TTIK

Kísérleti Fizikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

**Az élet kialakulásának kozmikus feltételei**

Készítette: Nagy Andrea

Fizika BSc szakos hallgató

Témavezető: Dr. Szatmáry Károly

habil. egyetemi docens

Szeged

2010

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés</b>	<b>3</b>
<b>1. Bolygószerke kialakulás modellje</b>	<b>4</b>
1.1. A Naprendszer kialakulása és szerkezete	4
1.2. Exobolygó rendszerek	8
1.2.1. Exobolygók	8
1.2.2. Exobolygók felfedezésének módszerei	9
1.2.3. "Új Naprendszerek"	11
1.2.4. Föld típusú exobolygók, és szuperföldek	12
<b>2. Az élet kialakulásának kozmikus feltételei</b>	<b>14</b>
2.1. Mi az élet?	14
2.1.1. Az evolúció	15
2.2. A lakhatósági zónák szerepe az élet kialakulásában	17
2.2.1. Galaktikus élelzóna	17
2.2.2. Élelzóna kettőscsillagok körül	19
2.2.3. Lokális élelzóna	20
2.3. A kozmikus környezet hatásai	22
2.3.1. A központi égitest kémiai összetételének hatása	22
2.3.2. Egy közeli szupernóva robbanás hatásai	23
2.3.3. Egy a rendszerhez közeli csillagelhaladás, mint befolyásoló tényező	24
2.4. A bolygó fizikai paramétereinek befolyásoló szerepe	24
2.4.1. A bolygó holdjának hatása	25
2.4.2. A forgástengely szerepe az élet kialakulásában	27
2.4.3. A tömeg, mint meghatározó paraméter	27
<b>3. Élet a Naprendszerben</b>	<b>28</b>
3.1. Bolygónk a Föld	28
3.2. A Mars és a Vénusz biológiai potenciája	29
3.3. Óriásbolygók és holdjaiknak biológiai potenciálja	30
<b>4. Az élet kialakulásának valószínűsége</b>	<b>32</b>
4.1. Drake egyenlet	32
4.2. Fermi-paradoxon	34
4.3. Élet a Földön kívül, a szupercivilizációk	35
4.4. SETI (Search for Extraterrestrial Intelligences - Földön kívüli értelem keresése)	38
4.5. A kapcsolatteremtés és a kommunikáció problémái	38
<b>Gondolataim a témában</b>	<b>43</b>
<b>Felhasznált irodalom</b>	<b>44</b>

## Bevezetés

Napjainkban a csillagászati megfigyelés technika fejlődésének következtében egyre több Naprendszeren kívül bolygót fedezünk fel, és talán már a közeljövőben megtaláljuk a Föld "ikertestvéreit" is a nemrég felbocsátott CoRoT (2006) és Kepler (2009) űrtávcsövek segítségével. Egy ilyen jellegű felfedezés tükrében újra előtérbe kerülhet tudományos körökben is a Földön kívüli élet kialakulásának és keresésének problémája.

"Más világok" keresésének és felfedezésének kérdése nem új keletű. Már az ókori görögök - Démokritosz és Epikurosz - is felvetették, mint elméleti lehetőséget. Munkásságuk számtalan középkori filozófust is gondolkodásra ösztönzött. A XVI. század végén Itáliában Giordano Bruno a lakható világok sokaságáról prédikált, és *„Párbeszéd a végtelenről, a világ egységéről és a világokról”* című művében teológia, filozófia és geometria érveket használva azt hirdette, hogy mind a „napokat”, mind a bolygókat élőlények népesítik be. A Jupiter körül felfedezett négy Galilei-hold Kepler számára is azt bizonyította, hogy a Jupiter bolygónak lakói vannak (Koestler, 1959). Ugyanezen témában íródott 1686-ban Fontenelle: *Értekezések más világok létezéséről*, illetve 1880-ban Flammarion: *Népszerű csillagászat* című könyve, melynek főszereplői a vénusz - lakók és a marslakók. Az első kísérleti „bizonyítékot” a XIX. század végén Schiaparelli Mars csatornákra vonatkozó felfedezése szolgáltatta. Ennek a megfigyelésnek a következtében általánossá vált az a nézet, hogy a Marson technikai civilizáció létezik. Ez az elképzelés egészen a XX. század közepéig tartotta magát.

1959-ben Cocconi és Morrison felhívta a figyelmet az élet, pontosabban a magasan fejlett technikai civilizációk keresésének rádiócsillagászati módszereire, és a hasonló elven működő esetleges információcsere, illetve kommunikáció lehetőségeire is. Ennek következtében alakult meg a SETI program, mely a mai napig működik, bár eddig nem sikerült detektálnia egyetlen fejlett civilizációt sem.

Ebből látszik, hogy a földönkívüliek utáni kutatás az évszázadok alatt mit sem veszített varázsából. Dolgozatomban éppen ezért igyekeztem egy összefoglalást adni egy a földihez hasonló élet kialakulásához szükséges fizikai feltételekről, áttekintve a galaktikus és lokális környezet, valamint a bolygó fizikai paramétereinek befolyásoló hatását. Ezen kívül megpróbáltam összegyűjteni saját Naprendszerünkben az élet számára potenciálisan kedvező előfordulási helyeket, és foglalkoztam a SETI programmal, beleértve a kapcsolatteremtési problémáikat is.

# 1. Bolygószerke kialakulás modellje

Jelenleg számos űreszköz végez megfigyeléseket a csillagképződéssel és bolygórendszerek kialakulásával kapcsolatban, melyek azt igazolják, hogy a csillagképződés elég gyakori folyamat az Univerzumban. Ilyen megfigyeléseket végzett például a Hubble-űrteleszkóp is, és számos protocsillagot mutatott ki, mely körül anyagkorong figyelhető meg.

A megfigyelésekből az is kiderült, hogy a Világegyetemben nem ritkák a többes bolygórendszerek sem.

## 1.1. Naprendszer kialakulása és szerkezete

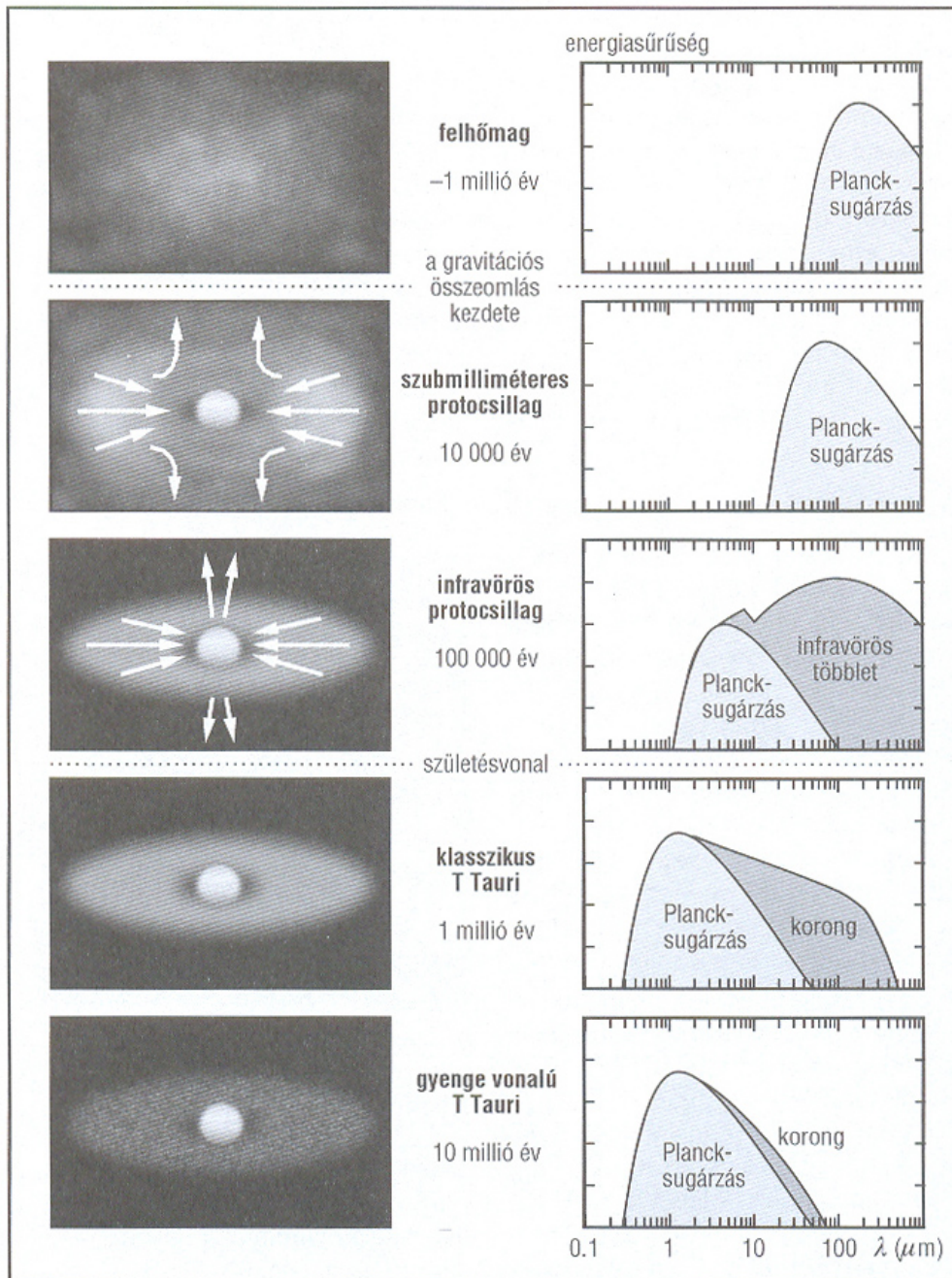
A Naprendszer kialakulásának magyarázatára több modell is létezik, ezek mindegyikétől elvárjuk, hogy a Naprendszer bizonyos alapvető tulajdonságainak magyarázatát adják. Ezek a tulajdonságok a következők (Balázs, 1996):

1. A centrális égitest (a Nap) 750-szer akkora tömegű, mint a Naprendszer összes többi égitestének tömege együttvéve.
2. A bolygók pályasíkja nagyjából egybeesik, illetve csak néhány fokkal tér el az ekliptikától. Tehát a Nap körül nyolc bolygó kering közel egy síkban és ugyanabban az irányban.
3. A Naprendszer összes impulzusmomentumának csak kb. az 1%-a esik a Napra, és ezért a Nap saját tengely körüli forgásának hossza a periódusideje.
4. A Naprendszer bolygói két egymástól jól megkülönböztethető típusba sorolhatók. A Föld-típusú bolygók kis tömegűek, nagy sűrűségűek és lassan forognak, ellentétben a Jupiter-típusú bolygókkal. A Jupiter-típusú bolygók kémiai összetétele nagyjából azonos a Napéval, míg a Föld-típusúak főleg nehezebb elemekből állnak.

A Naprendszer az elméletek szerint nagyjából 4,6 milliárd évvel ezelőtt alakult ki, egy csillagközi gáz- és porfelhőből jött létre.

A Naprendszer kialakulásánál először célszerű külön megvizsgálni a Nap, mint központi csillag kialakulását. Mivel a nap egy I. populációs csillag, ezért a gázfelhő, amiből keletkezett, nem csak hidrogént és héliumot, hanem kis mértékben, kb. 2%-ban, más kémiai elemeket (fémeket) is tartalmazott. Mivel a Naprendszerben az elemek egészen az uránig jelen vannak, okunk van arra gondolni, hogy a protoszoláris felhőt egy szupernóva-robbanás látta el nehezebb elemekkel, amelyek a környező gázköddel adiabatikus tágulás során összekeveredtek. A porfelhőkben általában nem teljesen homogén a sűrűségeloszlás (általában van, egy ún. központi mag). A felhőmagok jellemző mérete néhány tized parszek ( $\sim 10^{14}$  m), sűrűségük  $10^4$ - $10^5$  molekula  $\text{cm}^3$ -enként, hőmérsékletük 10-50 K körül van. Kismértékű iontartalmuk következtében gyenge mágneses térük is van. Elméleti megfontolások alapján ez a mágneses tér talán elég ahhoz, hogy meggátolja a magok gravitációs kollapszusát. Ezt a mérések alapján egyelőre nem lehet eldönteni, mivel ilyen gyenge mágneses tér nehezen és pontatlanul mérhető. Lehetséges, hogy nem a mágneses tér, hanem egyéb eredetű turbulens mozgások stabilizálják a felhőket. A molekulafelhők stabil képződmények: átlagos élettartamuk statisztikus becslések alapján  $4 \times 10^7$  év. Amikor a molekulafelhő mágneses tere, illetve a részecskék hőmozgása nem tud már egyensúlyt tartani a köd gravitációjának hatásával, akkor a molekulafelhő elkezd összehúzódni. Szigorú definíció szerint a protocsillag a

csillagközi anyagnak gravitációs kollapszus állapotában levő része (Kun, 1999). Ahogy a csillag a következő néhány millió éven át lassú összehúzódással a Hertzsprung-Russell-diagram (HRD) fősorozata felé fejlődik, az akkréciós korong is átalakul, ahogy ez az 1. ábrán látható.



1. ábra: Kis és közepes tömegű csillagok fősorozat előtti fejlődésének főbb fázisai (Ábrahám, Kóspál 2004)

Mivel a kezdeti felhő rendelkezett impulzusmomentummal, ezért az összehúzódás során a forgási szögsebesség növekszik, és az akkréciós korong lapultabbá válik. A lapultság mértéke a gáz- és porfelhő kezdeti perdületétől függ. Ha a protocsillag impulzusmomentuma túl nagy, akkor a fellépő centrifugális erő miatt nem képes elegendő anyagot gyűjteni ahhoz, hogy beinduljon a fúzió. Ezért a kialakulófélben lévő csillagnak perdületet kell veszítenie. Ez a folyamat kétféle képpen történhet, vagy kettészakad a protocsillag és így a perdület a keringésre és a forgásra együttesen oszlik el, vagy a

mágneses tér közvetítésével a protocsillag impulzusmomentumot ad át az akkréciós korongnak. Ez a folyamat úgy megy végbe, hogy az összehúzódás közben a felhő mágneses tere is összenyomódik, és a kezdeti gyenge teret a protocsillag differenciális rotációja felerősíti. A mágneses erővonalak a magnetohidrodinamika törvényei szerint mereven az egyre gyorsabban forgó protocsillaghoz kötődtek, és a kilökődött plazmában folytatódtak. Ez azért következik be, mert az erősen ionizált plazma nem mozoghat a mágneses erővonalaktól függetlenül, azaz az erővonalak „be vannak fagyva” az anyagba. A konvektív mozgások a teret nagy fluxussűrűségű erővonalcsövekbe sodorják, amelyek között mágneses tér gyakorlatilag nincs. A mágneses tér befagyása miatt a protocsillag gyorsan forgó felszínét és a lassan keringő plazmát összekötő erővonalcsövek „megnyúlnak”, és a bennük ébredő Maxwell – feszültség pedig lassítja a csillag forgását, és a protocsillag folyamatosan impulzusmomentumot ad át a kiáramló gáznak. (Cserepes – Petrovay, 2002)

A HRD-re történő ráfejlődés során a forgástengely irányából rendkívül erős csillagszél kezd fújni, miközben az egyenlítői tartományokban továbbra is anyagot vesz fel a csillag. A protocsillagból akkor válik csillag, amikor a gravitáció hatására olyan mértékben megnő a belső nyomás, hogy a magban megindul a H-He fúzió. A gravitációs összehúzódás hatására a protocsillag magjában a hőmérséklet is erőteljesen növekszik, míg eléri a kb. 15 millió K-t, amelyen már a fúziós energiatermelés stabilná válik, és a csillag fényleni kezd (Balázs, 1996).

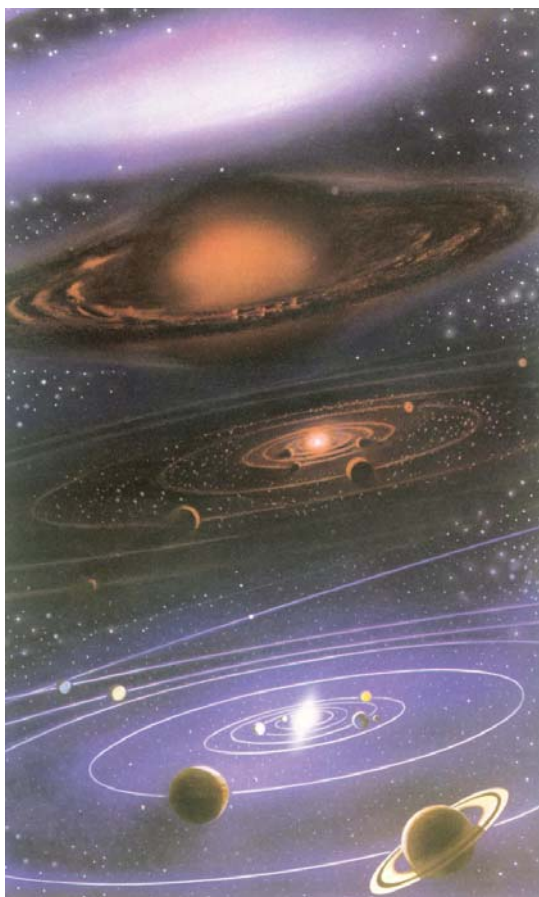
A bolygók kialakulására jelenleg több elképzelés is van, ám ezek mindegyike modellszámításon alapul. A legvalószínűbb elképzelés az, hogy a bolygók kialakulása közvetlenül a Nap kialakulása után kezdődött. A keringő anyag belső súrlódása és a csillagszél hatására egy akkréciós korong alakult ki a gyorsan forgó csillag egyenlítői síkjában, a csillagkeletkezés során visszamaradt gáz- és poranyagból. Kezdetben ez az anyagkorong igen forró, amikor azonban a csillag a főszorozatra kerül, fokozatosan hűlni kezd. Miközben hűl, a korong hőmérsékletének megfelelően különböző kémiai elemek és vegyületek kondenzálódnak. Először az óriásbolygók alakultak ki a Nap sugárzása által a rendszer külső részébe fújt gázból, nagyjából 2–3 millió év alatt. Az apró kondenzálódott részecskék fokozatosan összetapadnak és csomósodások jönnek létre az akkréciós korongban. A leggyorsabban gyarapodók gravitációjukkal magukhoz vonzzák a kisebbeket. Végül mire a korong kihűl egyes testek akkorára nőnek, hogy már planetézimáloknak, azaz bolygócsíráknak nevezzük őket. A bolygócsírák folyamatosan ütköznek, egymáshoz tapadtak, és egyesek egyre nagyobbá nőttek a kisebb sebességű ütközések során (Rees, 2006). A kezdeti időkben több száz 100–1000 kilométeres planetézimál jött létre, amelyek folyamatos ütközései alakították ki a ma ismert bolygókat. A bolygók tisztára söpörték a pályájuk mentén az űrt. Az ütközések energiája megolvastotta a kialakuló bolygókat, amelyeken belül megindult a radioaktív fűtés is, ezzel még tovább emelve a testek hőmérsékletét, az így teljesen olvadt anyag gömb alakba rendeződhetett a gravitáció hatására. A kőzetbolygók keletkezése egy nagyságrenddel több idő alatt ment végbe, mint az óriásbolygóké, néhány tízmillió évet véve igénybe.

A napszél és a sugárnyomás a csillag közeléből a könnyű elemeket kijebb sodorja. Ebből következik, hogy a Naphoz közelebbi bolygók nehezebb elemekből alakultak ki, valamint a hidrogén és a hélium hiánya magyarázza a belső bolygók viszonylag magas sűrűségét is.

	Merkúr	Vénusz	Föld	Mars	Jupiter	Szaturnusz	Uránusz	Neptunusz
Pálya félnagy tengely (Cs.E.) (millió km)	0,387 57,9	0,723 108,2	1,000 149,6	1,524 227,9	5,203 778,3	9,537 1429,4	19,191 2871,0	30,069 4504,3
Pálya lapultság	0,2056	0,0068	0,0167	0,0934	0,0484	0,0542	0,0472	0,0086
Pályahajlás (fok)	7,00	3,39	0	1,85	1,31	2,48	0,77	1,77
Átlagos pályamenti sebesség (km/s)	47,87	35,02	29,79	24,13	13,06	9,66	6,80	5,44
Keringési idő (év) (nap)	0,24 87,97	0,62 224,7	1 365,26	1,88 686,98	11,86 4332,71	29,46 10759,5	84,01 30685	164,79 60190
Egyenlítői sugár (km)	2440	6052	6378	3397	71492	60268	25559	24766
Tömeg (kg) (földtömeg)	$3,30 \times 10^{22}$ 0,055	$4,87 \times 10^{24}$ 0,82	$5,97 \times 10^{24}$ 1	$6,42 \times 10^{23}$ 0,11	$1,90 \times 10^{27}$ 318	$5,68 \times 10^{26}$ 95,2	$8,68 \times 10^{25}$ 14,5	$1,02 \times 10^{26}$ 17,1
Sűrűség (g/cm <sup>3</sup> )	5,43	5,24	5,52	3,93	1,33	0,69	1,32	1,64
Felszíni gravitációs gyorsulás (földi g)	0,378	0,907	1	0,377	2,364	0,916	0,889	1,125
Szökési sebesség (km/s)	4,44	10,36	11,19	5,03	59,5	35,5	21,3	23,5
Lapultság ( $1-R_{\text{sark}}/R_{\text{egy}}$ )	0	0	0,00335	0,00519	0,06481	0,1076	0,030	0,026
Forgási periódus a csillagokhoz képest (nap)	58,65	-243,16	0,99	1,03	0,41	0,45	-0,72	0,67
Forgástengely hajlásszöge a pálysíkra mérőlegessel (fok)	0	177,36	23,45	25,19	3,13	26,73	97,86	29,60
Légkör fő alkotói	-	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Ar	H <sub>2</sub> , He	H <sub>2</sub> , He	H <sub>2</sub> , He, CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , He, CH <sub>4</sub>
Légköri nyomás (atm)	0	93	1	0,007				
Felszíni hőmérséklet (°C)	-180 +430	+460	-70 +56 átlag +15	-120 +10 átlag -32	-130	-180	-210	-220
Geometriai albedo (0: mindent elnyel, 1: mindent visszaver)	0,11	0,65	0,30	0,15	0,52	0,47	0,51	0,41
Napsugárzás fluxusa (Földnél=1)	6,68	1,91	1	0,43	0,04	0,011	0,0027	0,0011
Mágneses télerősség (gauss, min- max)	0,0033 0,0066	0,000003	0,24 0,68	0,00064	3,2 14,3	0,18 0,84	0,08 0,96	0,1 0,7
Mágneses és forgástengely hajlásszöge (fok, polaritás az É-i félgömbön)	11 É	-	11,7 D	<15 É	9,6 É	0,0 É	58,6 É	47 É
Holdak száma	0	0	1	2	63	62	27	13

1. táblázat: A Naprendszer bolygóinak adatai (Szatmáry K.)

A folyamat végén a bolygók kérge lehül, majd megszilárdul. Ezt követően már csak a nagyobb becsapódások okozta kataklizmák és a kisebbek miatti erózió zajlott. Az egymással keringési rezonanciában levő bolygók túlélték az ütközéseket, mások előbb-utóbb megsemmisültek, beolvadtak valamelyik másik égitestbe (Balázs, 1996).



2. ábra: A Naprendszer kialakulásának fontosabb mozzanatai

A Naprendszer egy többes bolygórendszer, hiszen 8 bolygó kering a központi csillag körül. A bolygók két csoportba sorolhatók: van 4 kőzetbolygó és 4 óriásbolygó. A bolygók közel körpályán keringenek a Nap körül.

A megfigyelések alapján jelenleg úgy tűnik, hogy a Naprendszer felépítése elég különleges. Az eddig megfigyelt más bolygórendszerek jelentős részében ugyanis a csillag közvetlen közelében keringenek óriásbolygók. Ám más tekintetben vannak a Naprendszerhez hasonló bolygórendszerek is. Például az  $\epsilon$  Eridani K színektípusú törpecsillag körül a bolygókon kívül megfigyelhető egy a Naprendszer kisbolygó övezetéhez hasonló aszteroida öv is.

## 1.2. Exobolygó rendszerek

### 1.2.1. Exobolygók

Exobolygónak vagy extra szoláris bolygónak nevezzük azokat a planétákat, melyek egy a Naprendszeren kívüli csillag körül keringenek.

Létezésükre utaló nyomot a fiatal csillagok körüli porkorongok felfedezése, és azok spektroszkópiái vizsgálata adott.

Naprendszeren kívüli bolygókat a legkülönbözőbb típusú és korú csillagok körül találtak, ami arra utal, hogy a bolygókeletkezés erőteljes és viszonylag gyakori folyamat az



univerzumban. A legújabb eredmények alapján úgy tűnik, hogy a bolygókeletkezés meglepően gyors folyamat, találtak már 1 millió éves csillag körül is bolygót.

### 1.2.2. Exobolygók felfedezési módszerei

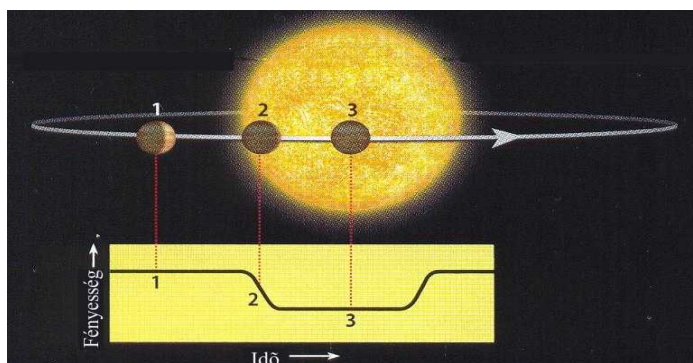
Közvetlenül, direkt módon nagyon nehéz kimutatni exobolygókat, mivel ezeknek az égitesteknek a fénye sok nagyságrenddel kisebb, mint a központi csillag fénye. Bár ez a módszer sem teljesen lehetetlen, hisz ha a bolygó kellően messze van a csillagtól, akkor az infravörös megfigyelési tartományban direkt módon is megfigyelhető úrtávcsövek segítségével. Valamint a csillaghoz közel keringő bolygó esetén a bolygó hőmérsékleti sugárzása hozzáadódik a csillag infravörös sugárzásához, ami szintén észlelhetővé válik (Szatmáry, 2006).

Ennek ellenére az esetek többségében a közvetett módszerek eredményesebbnek bizonyulnak, mint a közvetlen megfigyelés.

Indirekt módszerek:

#### 1. Fotometriai módszer:

A csillag fényességében megfigyelhető változás következik be, amikor a bolygó áthalad a csillag előtt és részlegesen elfedi azt. Persze ehhez az kell, hogy a bolygó csillag körüli keringési síkja közel essen a látóirányunkhoz. A fotometriai módszerrel főleg a csillaghoz közel keringő nagyméretű (ennek következtében nagy tömegű) bolygók mutathatók ki. Hiszen a fényesség csökkenés mértéke attól függ, hogy a bolygó a csillag felületének mekkora részét takarja ki, vagyis függ a bolygó és a csillag méretének arányától. Például ha egy külső szemlélő a Naprendszert figyelné meg ezzel a módszerrel a Jupiter átvonulása is csak 1%-os fényességcsökkenést eredményezne.



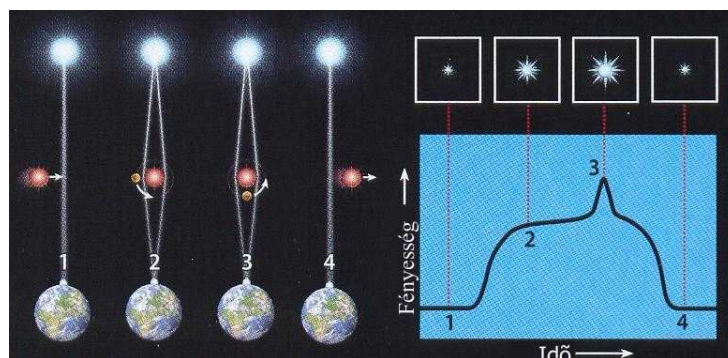
**3. ábra: A fotometria módszer elvi alapja**

#### 2. Asztrometriai módszer:

Az előbbi módszerhez hasonlóan, ebben az esetben is a nagytömegű forró Jupiterek hatása figyelhető meg. Ez esetben a csillag hullámos sajátmozgását figyelhetjük meg az éggömbön. Ez a jelenség abból adódik, hogy a csillag is a csillag-bolygó rendszer közös tömegközéppontja körül kering. Vagyis az elmozdulás annál nagyobb, minél nagyobb tömegű a bolygó, mivel ilyenkor a közös tömegközéppont messzebb helyezkedik el a csillag középpontjától, és így a csillag nagyobb sugarú pálya mentén kering.

#### 3. Gravitációs mikrolencse módszer:

Ez a módszer az általános relativitáselmélet által megjósolt gravitációs lencsehatáson alapul. Mivel a nagy tömeg görbíti a teret, ezért ha egy távoli objektum fénye elhalad egy csillag mellett a görbület hatására a fény elhajlik. Ha a csillagnak van bolygója a háttércsillag fénye a bolygó tömegének hatására is változik.



4. ábra: A mikrolencse módszer elvi alapja

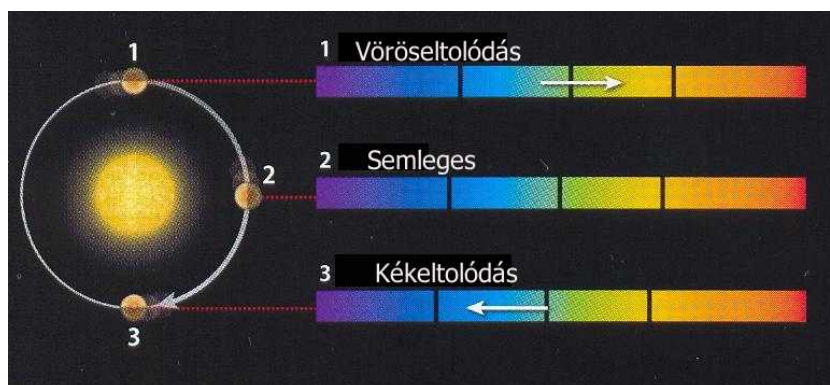
Az öt bolygómegfigyelő technika közül a Föld-méretű kőzetbolygók felfedezésére a gravitációs mikrolencse módszer a legalkalmasabb. Habár ilyen módszerrel kisméretű bolygókat is találhatunk, a mikrolencsésítés, mint esemény ritka és nem megismételhető. (Molaverdikhani – Tabeshian, 2009)

4. Pulsár jelek vagy más periodikus folyamat modulációján alapuló módszer:

Ez a módszer a pulzárok körüli bolygók kimutatására alkalmas. A pulzár egy olyan neutroncsillag, amely nagy sebességgel forog a saját tengelye körül és erős mágneses térrel rendelkezik. A pulzárokról érkező rádió tartományba eső sugárzás a Földről is megfigyelhető. Ha a pulzárnak van bolygója, akkor a látóirányú mozgása következtében a rádiófelvillanások közötti időtartam periodikusan változik.

5. Spektroszkópiai módszer:

Eddig ez a legsikeresebb bolygóutatási módszer a csillagászatban. A technika lényege az, hogy a csillagról érkező fény színeképvonalait vizsgáljuk. Ha a csillagnak van egy nagytömegű kísérője, akkor a csillag közös tömegközéppont körüli keringéséből adódóan, a csillag színeképvonalai periodikus vörös-, ill. kékeltolódást szenvednek. Ebben a jelenségben a Doppler-hatás érvényesül. Amikor a csillag hozzánk képest távolodik, akkor a színeképvonalak a vörös felé, amikor közeledik, akkor kék felé tolnak el.



5. ábra: A spektroszkópiai módszer elvi alapja

Ennek a módszernek a segítségével becslést tudunk tenni a csillag körül keringő égitest minimális tömegére, amennyiben ez az érték 13 Jupiter-tömegnél kisebbre adódik, akkor bolygóról van szó. Sok olyan csillag van, amely körül 2 vagy annál több bolygó is kering. Ebben az esetben a csillag látóirányú sebessége csak több periodikus függvény összegével írható le.

A csillag látóirányú sebességének változását jellemzi: a P periódus és a K amplitúdó, ami a színeképvonalak eltolódásából meghatározható.

Először a csillag színképből és luminozitásából becsült  $M_*$  tömege és a  $P$  periódus alapján Kepler III. törvénye megadja a bolygó  $r$  pályasugarát. Körpályát feltételezve a sugárból kapjuk a bolygó  $V$  pályamenti sebességét, majd az impulzus-megmaradás alapján a bolygó  $M_b \sin i$ , azaz a bolygó minimális tömege, ugyanis a látóirányunk és a bolygó keringési síkjára merőleges irány közötti szöget ( $i$ ) általában nem ismerjük.

$$r^3 = \frac{\gamma M_* P^2}{4\pi^2} \quad V_b = \sqrt{\frac{\gamma M_*}{r}}$$

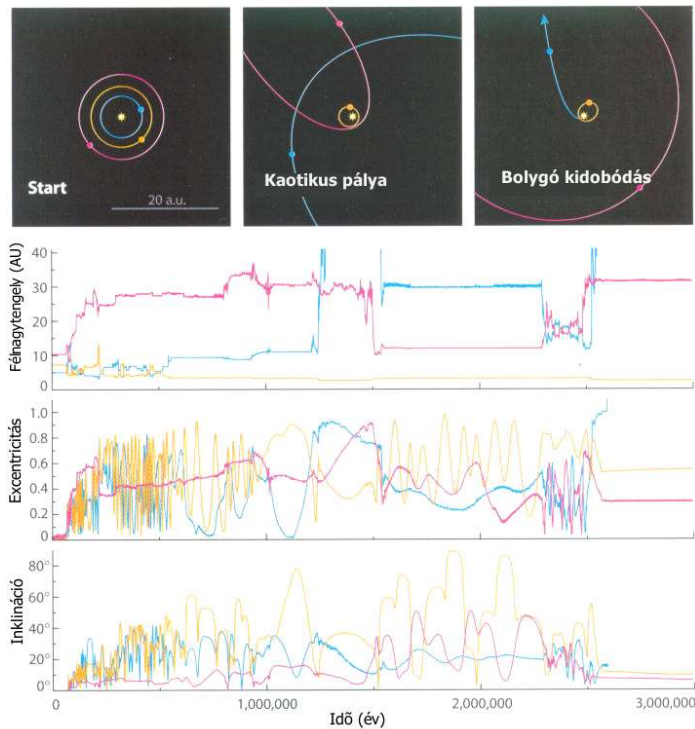
$$M_b = \frac{M_* V_*}{V_b} \quad M_b \sin(i) = M$$

### 1.2.3. Új „Naprendszerek”

A Naphoz hasonló csillagok körül is találtak már exobolygókat. Az eredmények azt mutatják, hogy a Naphoz hasonló, közeli csillagok több mint 10%-ának van legalább egy bolygója. Ám ezek többsége nagy tömegű óriásbolygó rövid keringési idővel, és ebből következően igen magas kb. 1100 K felszíni hőmérséklettel, éppen ezért nevezik őket forró Jupitereknek is. Ám ez nem azt jelenti, hogy csak ilyen típusú bolygórendszerek léteznek, hanem azt, hogy technikailag még csak ilyen bolygók kimutatására vagyunk képesek. Vagyis egyszerűbb nagy tömegű, csillagukhoz közeli bolygókat felfedezni, mint a kisebb földtípusúakat. Esetenként ezen óriásbolygók pályája jelentősen eltér a körpályától és erősen elnyúlt ellipszisek mentén keringenek a központi csillaguk körül.

A jelenlegi bolygórendszer kialakulását tárgyaló modellek szerint igen valószínűtlen, hogy ezek az óriásbolygók a csillaghoz ilyen közel alakuljanak ki, hisz a csillag hője és sugárnyomása minden gázt kisöpör a környezetéből. Ezért sokkal elképzelhetőbb, hogy a forró Jupiterek a csillagtól távol alakulnak ki és csak később migrálnak a csillag közelébe. A vándorlás magyarázatára több elképzelés is van. Az egyik szerint a kialakult bolygó folyamatosan veszít az energiájából, miközben a még meglévő akkréciós korong anyagával sűrűdik. Ennek a folyamatnak a következtében a planéta spirális pályán kezd mozogni a csillag körül, és így kerülhet egy belsőbb pályára.

Egy több bolygóból álló rendszer esetén bizonyos kezdeti állapotnál dinamikailag előfordulhat, hogy egyes bolygók kiperturbálódnak a rendszerből, míg más bolygók közelebb kerülnek a csillaghoz (6. ábra).



6. ábra: Szimuláció a bolygók perturbációjára

#### 1.2.4. Földtípusú exobolygók, és szuperföldek

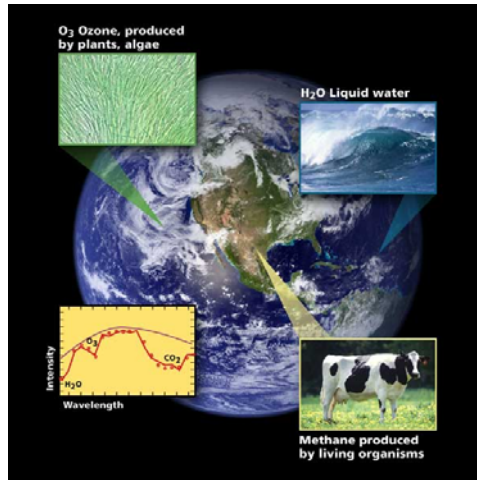
Ha létezik élet a világegyetemben a Földön kívül, akkor észszerű feltételezni, hogy egy a Földhöz hasonló égitesten alakulhat ki: egy főszorozati csillag körüli kőzetbolygón. Persze csak akkor, ha a földihez hasonló struktúrájú életet feltételezünk. Sok esetben találtak a csillagászok távoli, stabil, közel kör alakú pályán keringő exobolygókat, melyek egy része a csillag körüli belső zónában kering, viszonylag közel a csillag életzónájához.

A földtípusú bolygók bizonyos jól definiált tulajdonságokkal rendelkeznek, melyek meghatározása természetesen az egyetlen ismert és vizsgált bolygórendszer, azaz a Naprendszer megfigyelésein alapul. Földtípusú bolygónak nevezzük a csillaghoz közeli, kisméretű, vékony légkörrel rendelkező, nagy sűrűségű, lassú forgású égitestet, mely körül kevés hold kering.

Ha ismerjük egy bolygó tömegét és sugarát, akkor a sűrűsége is kiszámítható és a bolygó belső felépítése is modellezhető. A bolygó esetleges légkörére is információkat kaphatunk. Amikor a bolygó elhalad a csillaga előtt, annak fénye áthalad a bolygó légkörén, és ennek színe is hozzáadódik a csillag színehez. Ebből levonva a csillag színehez megkapjuk a bolygó légkörének spektrumát, és így a benne lévő kémiai elemek is azonosíthatóvá válnak. Az így kapott kémiai összetétel alapján következtethetünk az élet jelenlétére. Például ha jelentős mennyiségű oxigén van a légkörben, akkor valószínűsíthető fotoszintetizáló növényzet a felszínen. Ugyancsak erre utal, ha az infravörös tartományban nagy a bolygó fényvisszaverő képessége (Szatmáry, 2007).

Jelenlegi technikai szintünkön eddig csak néhány fedési exobolygó esetében sikerült közvetett módon felvenni a légkör spektrumát a Spitzer és a Hubble űrtávcsővel. Így egyes bolygók esetében következtetni lehetett már többek között szén-dioxid, oxigén és nátrium jelenlétére is. Az egyik ilyen bolygó a HD 189733b, melynek színeében kimutatható volt a szén-dioxidra jellemző infravörös sugárzás ([hirek.csillagaszat.hu/exobolygok.html](http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok.html)).



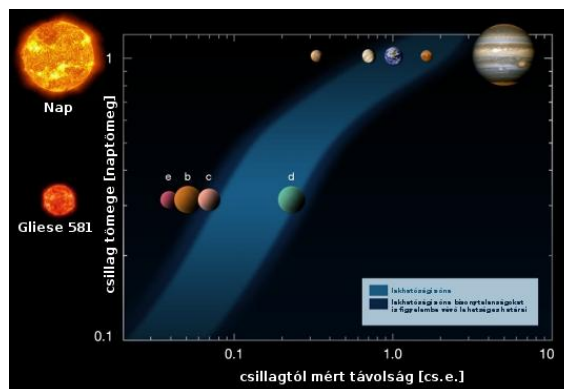


7. ábra: A földihez hasonló élet nyomjelző molekulái

A bolygó felszíni hőmérsékletét is megbecsülhetjük a csillag felszíni hőmérséklete és sugara, valamint a bolygópálya  $a$  fél nagytengelye és a bolygó fényvisszaverő képessége, az  $A$  albedó ismeretében:

$$T_{eff} \approx T_* \sqrt{\frac{R_*}{2a}} \sqrt{1-A}$$

A szuperföldek olyan exobolygók, melynek tömege nem éri el a 10 földtömeget. Jelenleg nagyságrendileg 30 szuperföldet ismerünk. Az első ilyen típusú bolygót 1991-ben fedezték fel a PSR B1257+12 jelű pulzár körül. Az első szuperföldet, amely főszorozati csillag körül kering, 2005-ben fedezték fel. 2007-ben fedezték fel az első olyan szuperföldet, a Gliese 581c -t, amely csillaga lakhatósági zónájában kering és tömege kb. 5 földtömeg. 2009-ben a Gliese 581 katalógusjelű vörös törpe negyedik bolygóját is azonosították. A Gliese 581e jellel ellátott planéta különlegessége, hogy tömege mindössze 1,9-szer nagyobb a Földénél, ezzel pedig jelenleg a legkisebb tömegű Naprendszeren kívüli bolygó cím tulajdonosa. Az újonnan felfedezett, tömege alapján minden valószínűség szerint kőzetbolygó 3,15 naponként kerüli meg központi csillagát. 2009 decemberében fedezték fel a GJ1214b jelű bolygót, mely mindössze 2,7-szerese a Földnek és a CoRoT-7b után a második szuperföld, amelynek a tömegét és átmérőjét is sikerült meghatározni. Így következtetéseket lehet levonni a szerkezetére vonatkozóan, illetve az első a bolygónknál csak néhányszor nagyobb exoplanéták között, melynél az atmoszféra létezése is valószínűsíthető. A GJ1214b tömege a Földének 6,5-szerese, s nagy részben vízből állhat.



8. ábra: A Gliese 581 rendszerének és a Naprendszernek az összehasonlítása az életzónában keringő bolygók alapján (ESO)

## 2. Az élet kialakulásának kozmikus feltételei

Mivel jelenleg csak egy technikailag fejlett fajt ismerünk, ezért nem tudhatjuk, hogy az alábbi szempontok közül melyek általános érvényűek. Vagyis a vizsgálataink során kimondatlanul is olyan paramétereket veszünk figyelembe, melyekről úgy gondoljuk, hogy elengedhetetlenek az ember kialakulásához. Az első ilyen megállapítás, hogy a csillag, ami körül az életnek teret adó bolygó kering, legyen Nap-típusú, több milliárd éves és rendelkezzen elegendően nagy fémtartalommal. Ezen kívül a csillag hosszú ideig legyen olyan helyen a galaxisban, ahol nem történnek közeli szupernóva robbanások, és nem túl nagy a csillagsűrűség sem. A csillag a galaxisban való keringés során ne haladjon át gyakran nagy porfelhőkön vagy spirálkarokon, azaz lehetőleg a korotációs zónában legyen. A csillagnak legyen bolygórendszere, vagyis a lakhatósági zónában keringő bolygón kívül legyenek üstökösök és kisbolygók is a rendszerben, mivel ezek az égitestek képesek vizet szállítani a bolygóra. A bolygó pályája közel kör alakú legyen és a pályaelemek, valamint a bolygó forgástengelyének dőlésszöge ne változzon jelentősen az idők során. A bolygó legyen megfelelő méretű, sűrűségű, anyagú és rendelkezzen részben szilárd felszínnel, valamint legyen rajta folyékony víz. A bolygónak legyen aktív magja, mely fenntartja a vulkanizmust és mágneses teret indukál. Legyen a bolygónak megfelelő hőmérsékletű, összetételű, áteresztésű, sűrűségű, nyomású légköre és rendelkezzen ózonpajzzsal is.

### 2.1. Mi az élet?

Ahhoz, hogy egy organizmust földi értelemben élőlénynek tekintsük, a következő feltételeknek kell egyszerre teljesülnie:

1. legyen közel (de nem abszolút) hibamentesen másolható örökítő anyaga, és képes legyen önmaga reprodukálására
2. határoló hártával (membránnal) függetlenedjen a környezetétől
3. legyen önszabályzó anyagcsere-rendszere
4. legyenek benne a kémiai folyamatokat gyorsító katalizátorok
5. képes legyen reagálni a külső vagy belső ingerekre
6. képes legyen alkalmazkodni a változó környezeti viszonyokhoz

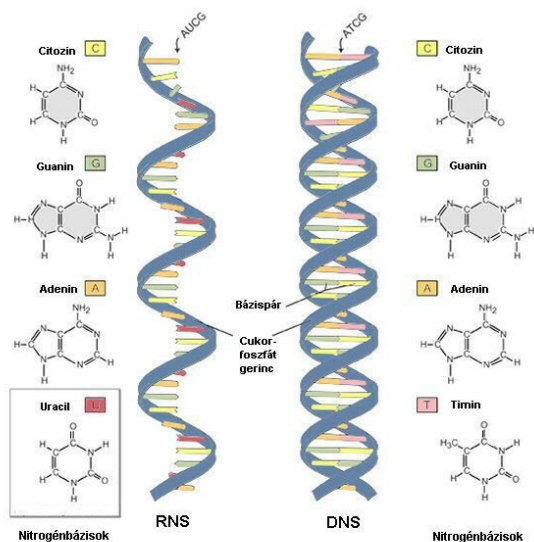
Ezek a feltételek a Földön már a legalacsonyabb szerveződési szinten, a prokariótáknál is teljesülnek, melyek a földi élőlények nagy részét képezik (Dorschner, 1975).

Az élet definiálása egy nagyon nehéz feladat, mivel jelenleg csupán egyetlen modell áll a rendelkezésünkre, és ez a földi élet, vagyis a biológia provinciális jellegű. Az élet fogalmának általános definiálásánál nehézséget okoz, hogy ne zárjunk ki bizonyos élő dolgokat, és definíciónk ne tartalmazzon nyilvánvalóan életteleneket sem (Davis, 2001).

Az élőlények növekedése alapvetően eltér az élettelen anyagétól. Az állatok a növények és más állatok megemésztése révén gyarapodnak. A növények növekedését a Nap energiájának feldolgozása teszi lehetővé. Az élő szervezetek tehát a környezet energiaforrásait veszik igénybe fejlődésükhöz. Az élet másik fontos ismertetője, hogy az élőlények képesek a szaporodásra, és ezáltal a fajfenntartásra. A földi élet megértéséhez nagyban hozzájárult Darwin evolúció elmélete, illetve Watson és Crick által beazonosított DNS jobbméretes kettőspirál szerkezete. Az evolúció alapelve a környezethez való alkalmazkodás, melynek hátterében a véletlenszerű mutációk és a természetes kiválasztódás áll. Az élőlények tehát a szaporodáson túl a fejlődés képességével is rendelkeznek (Brahic, 2001).

A Föld teljes élővilágának kémiai kiindulópontját a szén-alapú vegyületek adják, illetve a katalizátorként mindenhol megtalálható víz. Az élő sejteket alkotó aminosavakat,

nukleotidokat és molekulákat a szén különlegesen sokféle kémiai kapcsolódásai hozzák létre. A fehérjék közé tartoznak az ellenanyagok, az enzimek, a hormonok, a hírvívő fehérjék, a szerkezeti fehérjék és a transzportfehérjék. A fehérjék a nukleinsavak irányításával hajtják végre feladatukat, mivel ezek hordozzák a genetikai információt, de magukat a fehérjéket is nukleinsavak építik fel. Figyelemre méltó tény, hogy a nukleinsavak felépítésében csak öt különféle nukleotid vesz részt (az adenin, a citozin, a guanin, a timin és az uracil), a fehérjékben pedig mindössze húsz különböző aminosavat találunk.



9. ábra: A DNS kettősspirál szerkezete és az azt alkotó nukleotidok (origo.hu)

Az élő szervezet fenntartásához szükséges reakciók mindegyike vizes közegben zajlik, ami nem csoda, mivel a legtöbb élőlény testének legfőbb összetevője a víz.

Kémiai szempontból a szénhez legközelebbi elem a szilícium, ezért a szilícium-alapú összetett molekulák száma is hatalmas, azonban a szilíciumatomok kapcsolódási lehetőségei sokkal korlátozottabbak, mint a szénatomoké, illetve a szén világegyetem-szerte sokkal gyakoribb. Ezen kívül a szilícium igen reakcióképes vegyületeket hoz létre, melyek például levegőben meggyulladnak. Ennek a szilícium-szilícium kötés kis szilárdsága az oka. Szilíciumatomok között többszörös kötések nincsenek, tehát szilíciumgyűrűk sem alakulhatnak ki. A szilícium a szénnel ellentétben nitrogénnel vagy foszforral szinte semmilyen vegyületet nem alkot, oxigénnel azonban nagyon stabil kötést hoz létre. A szén-dioxiddal ellentétben a szilícium-dioxid gyakorlatilag nem oldódik vízben. A szilícium általában négy oxigénnel egyesül, mely gyakran láncokká, hálóká vagy háromdimenziós szerkezetekké egyesül. Ezek az  $\text{SiO}_4$  tetraéderek alkotják a szilikátásványokat, melyek igen gyakoriak a Földhöz hasonló bolygók litoszférájában. Ezen okok miatt nem tűnik nagyon valószínűleg a szilícium-vegyületeken alapuló élet.

### 2.1.1. Az evolúció

A földi élőlények között szoros kapcsolatot a közös evolúciós forma, és a közös biokémiai alapok (pl.: anaerob glikolízis) hoznak létre.

A biológiai evolúció fontos ismérve, hogy a fejlődés visszafordíthatatlan, ezt nevezik Dollo-törvényének, vagyis a bolygó keletkezése óta az anyag egyre bonyolultabb állapotba kerül (Mészáros, 2001). Ennek a törvénynek a következménye, hogy több kipusztult faj van, mint amennyi ma létezik.

Kezdetben az evolúció elmélet legnagyobb hiányossága az volt, hogy Darwin nem volt képes megmagyarázni, hogy miért működik a természetes kiválasztódás, ma viszont

már tisztában vagyunk vele, hogy a DNS nukleotid sorrendjének megváltozása mozgatja az evolúciót. Az ilyen változásokat mutációknak nevezzük, a mutációk az esetek többségében értelmetlen információt tartalmaznak, és károsak a következő nemzedékre nézve. Az evolúció titka tehát: az idő, mely kedvez az előnyös mutációk felhalmozódásának, és az elmúlás, mely helyet ad az új fajoknak (Sagan, 1980).

Az evolúciós vagy genetikus változások időegysége roppant hosszú. Egy új, fejlett faj valamely más fajtól való kialakulásának jellegzetes időtartama kb. 100 ezer év. Ennek szemléltetésére alkalmas az úgynevezett Kozmikus naptár, mely a Föld kialakulásától eltelt 4,5 milliárd évet egyetlen év időtartamába sűríti (Sagan, 1990).

Földi események valódi, illetve „naptári” kora, az életkort 1 évnek tekintve.

Esemény	Valódi kor	Naptári dátum
A Föld keletkezése	4 500 millió éve	Január 1, 00 óra
Legrégibb kőzetek	3 940 millió éve	Február 10
Legrégibb életformák	3 200 millió éve	Április 16
„Normális” óceán, légkör	1 000 millió éve	Október 1
Puhatestű állatok	800 millió éve	November 1
Szilárd vázas állatok	570 millió éve	November 12
Első szárazföldi növények	400 millió éve	November 28
Egyetlen szuperkontinens	250 millió éve	December 10
Dinoszauruszok kihalása	65 millió éve	December 26
Előember megjelenése	4 millió éve	December 31, 18 óra 00 perc
Az utolsó jégkorszak vége	13 ezer éve	December 31, 23 óra 56 perc
Jézus születése	2 ezer éve	December 31, 14 másodperccel éjfél előtt.

**10. ábra: A kozmikus naptár (Sagan, 1990)**

Az evolúció véletlenszerű és nem előrelátható, ezért az evolúció útjának más bolygókon a miénktől eltérő módon kell lezajlania, és szükségszerűen különbözőnek kell lennie, de ebből nem kell arra következtetnünk, hogy másutt, egy teljesen más felépítésű élőlényekből álló társadalom nem juthat el a miénktől teljesen eltérő úton a fejlettségben hozzánk hasonló szintre. A természet a Földön is produkált hasonló eseteket, amikor az evolúció során két különböző folyamatban szinte azonos eredmény jött létre. Erre példa a hólyagszem többszöri kialakulása az emlősöknél és a polipoknál, vagy az Ichtyosaurus és a delfin felépítésének hasonlósága is (Almár, 2004).

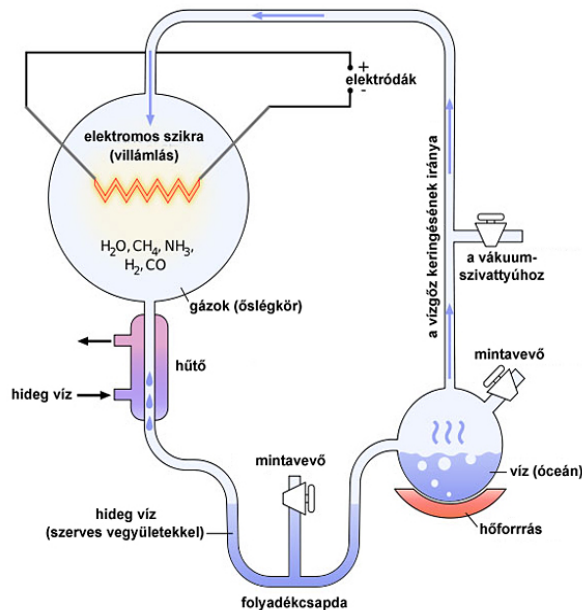


**11. ábra: Egy lehetséges törzsfjlődési út, ha a dinoszauruszok nem haltak volna ki (Ashpole, 1992)**



Az intelligencia kifejlődése alapvető lehet az Univerzumban, mert az okosabb organizmusok jobban képesek alkalmazkodni a környezethez, így nagyobb eséllyel élik túl és ezért több utódjuk lesz. Az intelligens faj egyik ismérve lehet az extra genetikai tanulási rendszer kifejlesztése, mivel a felhalmozott tudás ilyen fajta tárolása képes csak lépést tartani a fejlődő társadalom, környezet ütemével. Az emberi fajnál az extra genetikai tanulási rendszer részét képezi például az írás, a könyvek, vagy néhány évtizede az internet (Sagan, 1980).

Az evolúció elmélet másik problémáját az jelentette, hogy a szervetlen anyagokból milyen módon tud szerves anyag kialakulni. Ennek a kérdésnek a megválaszolására Miller és Urey 1952-ben egy lombikban szimulálta a földi őslégkört, mely főleg metánból, ammóniából, szén-dioxidból, vízgőzből és cianvegyületekből állt, és elektromos szikrák segítségével helyettesítette a villámokot. Tapasztalata szerint néhány hét alatt magasan szervezett molekulák, aminosavak alakultak ki.



12. ábra: A Miller és Urey által használt kísérleti elrendezés (origo.hu)

Egy másik lehetséges útja a földi élet kialakulásának az, ha ezek a szerves anyagok a világűrben kerültek az ősföld felszínére. Erre enged következtetni, hogy a rádiócsillagászati kutatások már több tucat szerves molekulát, köztük a legegyszerűbb aminosavat, a glicint is kimutatták a csillagközi térben.

## 2.2. A lakhatósági zónák szerepe az élet kialakulásában

A földihez hasonló élővilág kialakulásához az egyik alapvető feltétel az, hogy a bolygó mennyi fényenergiát kap a csillagtól, és hogy ez az energia mennyiség változik-e az időben. A bolygóra jutó fényenergia függ a csillag jellemzőitől és a bolygó csillagtól való távolságától. Ezen kívül fontos lehet még a bolygó mérete, tömege, fényvisszaverő képessége, légkörének összetétele, és az árapály erők miatt a bolygó holdjainak hatása is.

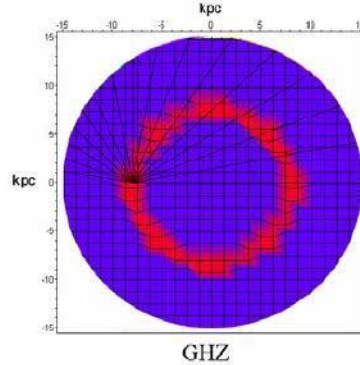
Vagyis megállapíthatjuk, hogy egy bolygónak az életzónában való elhelyezkedése a bolygó felszínén való élet létezésének csupán szükséges, de nem elégséges feltétele.

### 2.2.1. Galaktikus életzóna (Galactic Habitable Zone):

A spirálgalaxisokban a csillagok és a spirálkarok mozgása eltérő jellegű, a csillagok elmozdulnak a spirálkarokhoz képest, sőt időről időre át is haladnak rajtuk. Egyedül kivétel egy keskeny körgyűrű (mintegy 300 pc széles), amelyben a csillagok és a spirálkarok

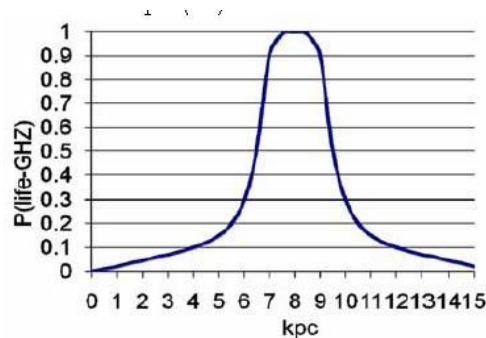
keringési sebessége azonos. Ez a helyzet a Tejútrendszer középpontjától mindegy 7-9 kpc-re következik be. Ezt az övezetet nevezzük galaktikus életzónának, mivel a spirálkarokon történő áthaladás veszélyekkel jár, például megnő a közeli szupernóva kitörések valószínűsége. Ez az élet fennmaradása szempontjából halálos veszélyt jelenthet.

Az elliptikus galaxisokban nem érdemes galaktikus életzónát definiálni, mivel az elliptikus galaxisokban kevés a csillagközi anyag.



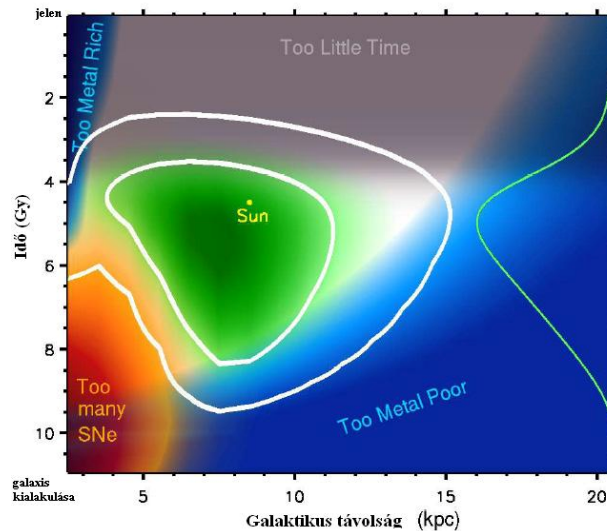
13. ábra: A galaktikus lakhatósági zóna elhelyezkedése (Molaverdikhani-Tabeshian, 2009)

A galaktikus életzóna méretét alapvetően két faktor határozza meg. A belső határt az ionizáló sugárzás (szupernóvák, gamma-kitörések), míg a külső határt a galaxis kémiai evolúciója, azaz a nehéz elemek aránya határozza meg. (Molaverdikhani-Tabeshian, 2009)



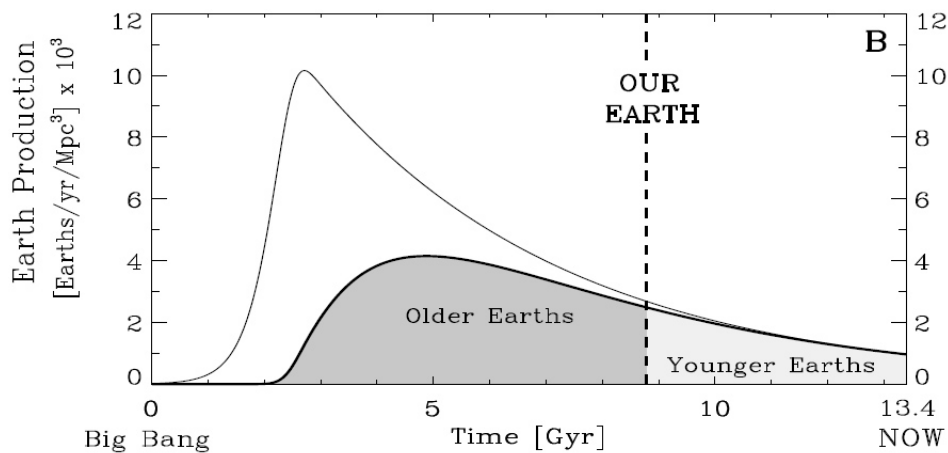
14. ábra: Az élet kialakulásának valószínűsége a galaxis középpontjától mért távolság függvényében (Molaverdikhani-Tabeshian, 2009)

A 15. ábra azt szemlélteti, hogy a galaxis középpontjától mért távolság és a galaxis kialakulásától eltelt idő hogyan befolyásolja az élet kialakulásának valószínűségét. Az ábrán a zölddel jelölt rész az, ahol kialakulhatott élet, azaz megfelelő a távolság a galaxis középpontjától és elegendő idő telt el a fémek felhalmozódásához és bolygórendszerek kialakulásához.



15. ábra: Az értelmes élet kialakulásának valószínűsége a Galaxisban

Meghatározhatjuk az Univerzum kőzetbolygóinak keletkezési rátáját, melyet a 16. ábra szemléltet. A sötétszürke rész mutatja a Földnél öregebb Föld-típusú bolygókat. Láthatjuk, hogy a bolygók kb.  $74 \pm 9\%$ -a öregebb, mint a Föld. A grafikonnál az is leolvasható, hogy feltehetőleg az első Föld-szerű bolygó úgy 11 milliárd évvel ezelőtt jött létre (Molaverdikhani-Tabeshian, 2009).



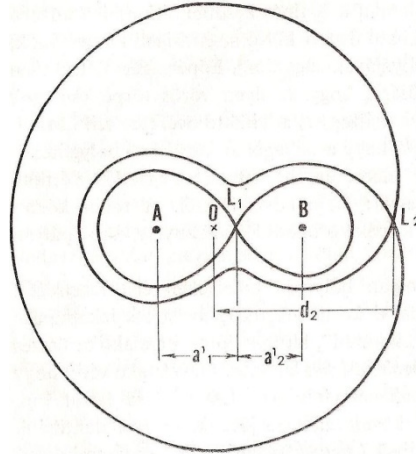
16. ábra: Kőzetbolygók keletkezési rátája az Univerzumban (Lineweaver, 2001)

### 2.2.2. Életzőna kettőscsillagok körül

A csillagok körülbelül 50-60%-a éli le az életét kettős rendszerben. A kettőscsillag körül keringő bolygó pályája hol az egyik, hol a másik csillag közelében van, és mivel általában a két csillag tömege és fényessége eltérő, a bolygó felszíni hőmérséklete széles határok között ingadozhat.

Ám egyes esetekben lehetőség van a bolygók periodikus pályákon való mozgására, amely mellett felületük hőmérséklete az élet fejlődése szempontjából megengedhető határok között fog változni. Ehhez az szükséges, hogy a csillagok egymáshoz viszonyított pályái közel álljanak a körpályához. A bolygónak az élet kifejlődését megengedő periodikus pályái vagy az  $L_1$ -en átmenő felületen belül, vagy az  $L_2$ -n átmenő felületen kívül helyezkednek el, ahol  $L_1$  és  $L_2$  a megfelelő Lagrange pontok. Ha a két csillag tömege azonos, az  $L_1$ -en átmenő felületen belül az élet kifejlődésére alkalmas pályák azzal a feltétellel létezhetnek, hogy a csillagok közötti távolság számértékileg

$a > 2\sqrt{l}$  (csillagászati egységben kifejezve), ahol  $l$  mindkét csillag luminozitása (Nap luminozitás egységeiben). Amikor  $a$  nagyobb lesz, mint  $13\sqrt{l}$ , a kettős rendszer mindkét komponense, az életréa szempontjából, magányos csillagnak tekinthető (Sklovskij, 1976). Következésképp, elvben egy kettős rendszer egymástól eléggé távoli, csaknem körpályán keringő komponensei körül lehetnek lakható bolygók.



17. ábra: Az életréa szerkezet kettőscsillagok körül (Sklovskij, 1976)

### 2.2.3. Lokális életréa (Circumstellar Habitable Zone):

Definíció szerint életréának vagy lakható zónának szokás hívni egy csillag körül azt az övezetet, ahol a csillagtól kapott fényenergia elegendő ahhoz, hogy a bolygón lévő hőmérséklet a vizet fagyás és forráspont között tartja. Ez nem feltétlenül 0 és 100 Celsius fok, mivel a víz halmazállapota erősen függ a légköri nyomástól is. Egy csillag körüli életréát első közelítésben úgy határozhatjuk meg, ha minden bolygó albedóját konstansnak tekintünk (ez a konstans a Föld átlagos fényvisszaverő képességével egyenlő, ami 0,39) és eltekintünk attól, hogy a bolygónak van légköre. Az életréa nagysága az alábbi képletek alapján könnyen meghatározható:

$$D_1 = \sqrt{\frac{R_*^2 T_*^4 (1 - A)}{4 T_1^4}}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{R_*^2 T_*^4 (1 - A)}{4 T_2^4}}$$

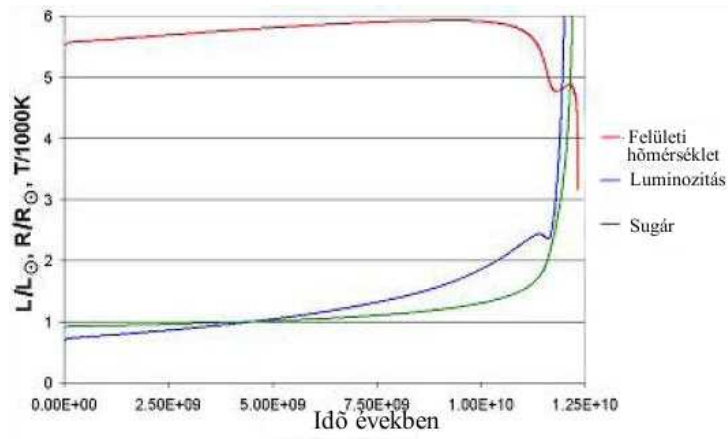
ahol  $T_1=273$  K,  $T_2=373$ K és  $\Delta D=D_1 - D_2$  megadja az életréa nagyságát.

Színképtípus	B	A	F	G	K	M
Közepes hőmérséklet (K)	30000	12000	8000	6500	5000	3500
Közepes sugár (napsugár)	3,6	2	1,3	1	0,7	0,4
$D_1$ (Cs.E.)	78,7	6,99	2,01	1,03	0,42	0,12
$D_2$ (Cs.E.)	42,1	3,75	1,08	0,55	0,23	0,06
$\Delta D$ (Cs.E.)	36,6	3,24	0,93	0,48	0,19	0,06

2. táblázat: Életréa mérete különböző típusú főszorozati csillagok esetén

Az életréa belső határán a magas felszíni hőmérséklet miatt egy Föld típusú bolygó vízkészlete a légkörbe párolog, erősítve az üvegházhatást. A zóna külső határán viszont az alacsony felszíni hőmérséklet miatt a bolygón lévő víz jéggé fagy.

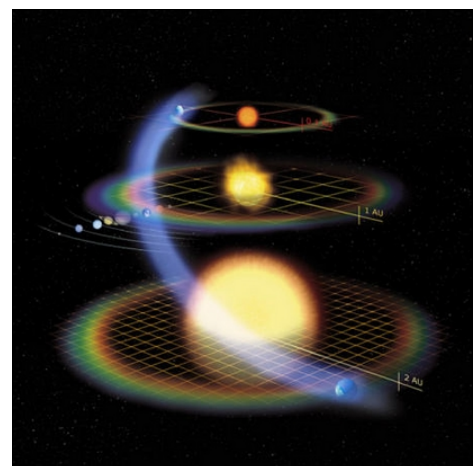
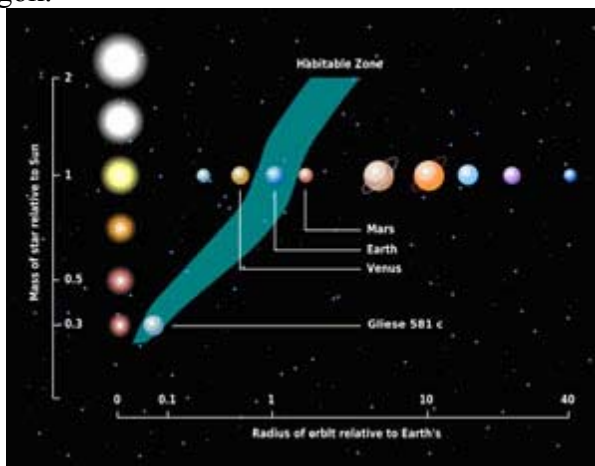
Az életréa helyzete és szélessége a központi csillag sugárzásától (luminozitásától) függ:  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ , ahol  $R$  a csillag sugara,  $T$  a csillag effektív hőmérséklete és  $\sigma$  a Stefan-Boltzmann állandó. Mivel egy csillag fejlődése során az energia kibocsátás növekszik, a lakhatósági zóna határai csillagászati időskálán nézve kifelé vándorolnak.



18. ábra: A Nap fizikai paramétereinek változása csillagászati időskálán

Az alacsony hőmérsékletű, halvány törpecsillagoknál a zóna közelebb helyezkedik el a központi csillaghoz és keskenyebb, mint a forró csillagoknál. Ezért kisebb a valószínűsége annak, hogy egy ilyen keskeny életréába éppen alkalmas bolygó keringjen. A nagy tömegű, forró csillagokkal más a probléma: a hatalmas energiatermelés miatt ezek a csillagok igen rövid életűek (néhány millió vagy tízmillió év), ami kedvezőtlen az élet évmilliárdokig tartó fejlődése szempontjából, ha az evolúció mindenütt a földihez hasonló sebességgel történik.

A kutatás szempontjából tehát maradnak az F, G és K színekposztályokba tartozó csillagok.



19.-20. ábra: A lokális életréa méretének változása a csillag tömegének függvényében (ESA)

Ugyancsak kedvezőtlen hatása lehet annak, ha a bolygórendszer központi csillaga kettős, vagy változtatja fényességét. Egyrészt kettőscsillagok körül nehezen alakul ki stabil bolygópálya. Másrészt, ha a fűtés ritmusa változik, mert a csillag pulzál, vagy egy csillagkísérő keringése okoz ingadozást a bolygó hőmérsékletében, az valószínűleg kedvezőtlen hatással van az élet fejlődésére.



A Nap sugárzásán kívül más energiaforrások is emelhetik egy égitest, bolygó hőmérsékletét. A bolygó vagy a hold anyagában előforduló radioaktív kémiai elemek bomlása során hő szabadul fel, többek között ezért olvadt a Föld belseje is. Másrészt az óriásbolygók holdjainál erős lehet az anyabolygó árapály hatása is (Brahic, 2001).

## 2.3. A kozmikus környezet hatásai

### 2.3.1. A központi égitest kémiai összetételének hatása

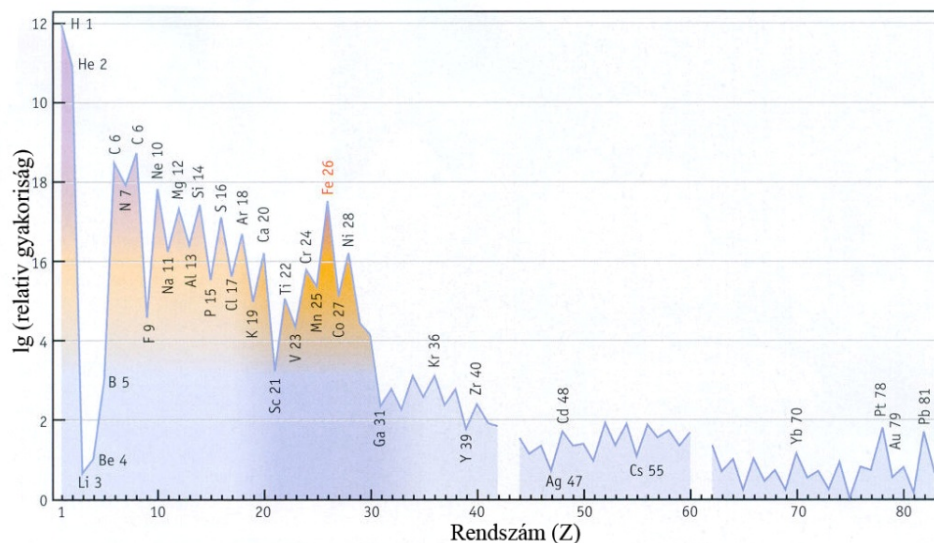
Valójában nem a csillag kémiai összetétele, hanem a molekulafelhő, amelyből a csillag és a bolygó létrejött, fémtartalma határozza meg, hogy az adott bolygón kialakulhat-e élet. Ha a molekulafelhő fémtartalma kicsi, akkor az élet számára elengedhetetlen kémiai elemek nem találhatók meg benne, vagy csak elenyésző mértékben (Balázs, 1996).

A földi élet különleges óriásmolekulákhoz kapcsolódik, melyeket szén, hidrogén, oxigén, nitrogén, foszfor, kén, vas és még néhány más elem alkot, ami egyáltalán nem meglepő, mivel ezek az Univerzumban leggyakrabban előforduló elemek. Vagyis az Univerzumban előforduló szűk 100 elem közül csupán tucatnyi játszik alapvető szerepet az élet kialakulásában, ezek a következők: H, He, O, Si, Fe, Mg, C, N, Na, K, S, P.

H 1												He 2					
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Ac 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Uub 112	Uut 113	Uuq 114	Uup 115	Uuh 116	Uus 117	Uuo 118
Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71				
Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103				

21. ábra: A periódusos rendszer és az élet

Az Univerzumban talált elemgyakoriságok karakterisztikusak, és elméleti úton jól megmagyarázható szabályszerűségeket mutatnak. Vagyis létezik egy általános kozmikus elemgyakoriság.



22. ábra: Kozmikus elemgyakoriság

A kozmikus elemgyakoriság tulajdonságai a következők:

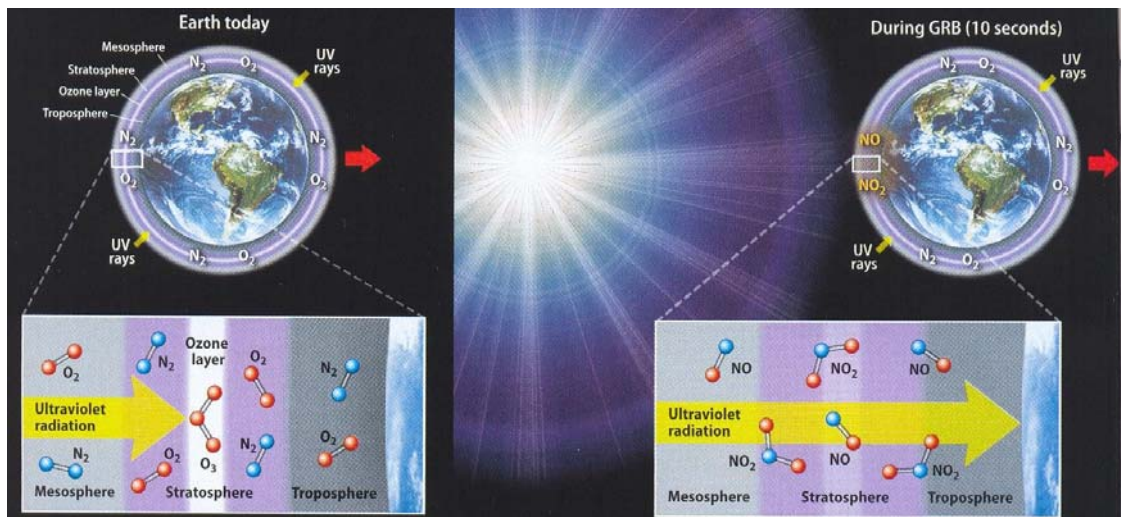
- a gyakoriság először gyorsan, később lassabban csökken, ahogy Z (a rendszám) nő
- Harkins-szabály: a páros rendszámú elemek gyakoribbak a páratlan rendszámúaknál
- az ún. mágikus számoknál (2, 8, 14, 20, 28, 50,...), amelyekhez zárt atommaghéjak tartoznak, helyi maximumok vannak
- a vasnál és az ólomnál különösen erős helyi maximum figyelhető meg.

Az egyes égitestek kémiai összetétele többé-kevésbé eltér az általános kozmikus elemgyakoriságtól. Lényegesen különböző, úgynevezett anomális elemgyakoriság azonban viszonylag ritkán fordul elő (Brahic, 2001).

Mivel a csillag többé-kevésbé megtartja kezdeti kémiai összetételét (valójában az égitestek kémiai összetétele életük folyamán nem állandó, mivel atomi reakciók játszódnak le a csillagok magjában, illetve fisszió figyelhető meg a csillagatmoszférában), ezért a csillag spektroszkópiai vizsgálata során megállapíthatjuk, hogy milyen arányban tartalmaz hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemeket, azaz fémeket.

### 2.3.2. Egy közeli szupernóva robbanás hatásai

Egy átlagos szupernóva néhány percen belül annyi energiát sugároz ki, mint amennyit a Nap 11-12 milliárd éves fősorozati élete alatt ad le. Ha a robbanás kb. 50 fényévnél közelebb zajlana le, akkor a nagyenergiájú elektromágneses sugárzás szinte azonnal elpusztítaná a föld felszínén az életet, ám a mélytengeri és a felszín alatt nagy mélységben élő állatok esetleg túlélhetnék a katasztrófát. A látható fényt kísérő nagyon intenzív röntgen- és gammasugarak nem tudnak elnyelődni a légkörben, hanem nagy részük akadály nélkül lejut a felszínre. A gammasugarak azon része, mely a földi légkört alkotó gázokkal (nitrogén, oxigén) kölcsönhatásba lépve elnyelődik, az N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> molekulák felhasadását eredményezi. Az így létrejött atomos nitrogén és oxigén már képes egymással kémiai kötést kialakítani, melynek következtében nitrogén-oxidok keletkeznek. A végtermékek közül a nitrogén-oxid (NO) bontja az ózon molekulát, míg a nitrogén-dioxid (NO<sub>2</sub>) az élőlények számára mérgező gázt alkot. Ezek a molekulák az idő előre haladtával lebomlanak, és a légkör kb. 15 év alatt képes visszanyerni eredeti állapotát.



23. ábra: Egy nagyenergiájú részecskesugárzás hatása a földi légkörre

Az UV sugárzás néhány nap alatt tönkretenné a Föld ózonrétegét azzal, hogy a nagyenergiájú részecskék elbontják az ózont atomos oxigénre. Ózonréteg hiányában az UV sugárzás akadály nélkül eléri a Föld felszínét. Ezen kívül a szupernóvából érkező kozmikus sugárzás töltött részecskéi hamar telítik a Föld Van Allen-övezetét, így látványos sarki fény kíséretében sok töltött részecske éri el a felszínt. A sugárfertőzés következtében az élőlények jó része elpusztulna, az életben maradt fajok a sugárzás hosszú távú következményeibe, a rákos megbetegedésekbe halnának bele, és ezáltal megszakad a tápláléklánc. A túlzott mértékű genetikai mutációk következtében létrejövő genetikai változás általában az állat vagy növény azonnali halálához vezet (Comins, 1994).

### 2.3.3. Egy a rendszerhez közeli csillagelhaladás, mint befolyásoló tényező

Közeli csillagelhaladás főleg akkor fordulhat elő, ha a Naprendszer áthalad a Tejútrendszer egyik spirálkarján. Közeli elhaladás esetén megváltoztathatná akár a Föld pályáját is, ennek módosulása elsősorban attól függ, hogy mekkora a Föld, a Nap és a csillag sebessége egymáshoz képest. Ha a Föld sebességvektora pont a csillag felé mutat, akkor rezonancia alakulhatna ki, aminek következtében a Föld felgyorsulna és eltávolodna a Naptól. A gravitációs hatás következtében földrengések, vulkánkitörések, cunamik, szökőárak alakulnának ki. Sok szén- és kén-dioxid, por, hamu kerül ennek hatására a légkörbe, ami jelentősen felerősíti az üvegházhatást. Az erőteljes vulkanikus tevékenység megváltoztatná a bolygó belső aktivitását, melynek hatására változna a mágneses tér iránya, ami megzavarja az állatok tájékozódási képességét. A mágneses tér változása miatt gyengül a Van Allen-öv, és több elektromágnes sugárzás éri el a felszínt. Az évszakok nem változnak jelentősen, mert az nem függ a Naptól való távolságtól. A gravitációs zavar miatt üstökösök indulnak el nagy számban a belső Naprendszer felé, ezzel megnövelve a becsapódások és az esetleges kihalások kockázatát. Sok terület lakhatatlanná válna, mert a tengerek elöntenek a part menti területeket, sok állatfaj kipusztulna és ezzel párhuzamosan vándorlások indulnának el. A népvándorlások is megindulnának a sok összedőlt város, a kevés élelmiszer, a rossz termés miatt (Comins, 1994).

### **2.4. A bolygó fizikai paramétereinek befolyásoló szerepe**

Az egymással rezonanciában keringő égitestek belseje az árapályhatás révén melegedhet, ami vulkáni tevékenységhez vezethet. Egy nagy hold csökkenti a bolygó forgástengelyének térbeli billegését, azaz stabilizálja az éghajlatot, emellett árapályhatása lassítja a bolygó tengelyforgását.



A bolygó saját tulajdonságai közül fontos a tömeg és a kémiai összetétel. A bolygó annál melegebb lesz, minél több a radioaktív izotóp a belsejében és minél nagyobb az átlagsűrűsége (egy adott tömeg mellett a nagyobb átlagsűrűség esetén kisebb a hővezető felszín).

Ha a bolygó magja vasat tartalmaz, a radioaktív hőtől megolvadt külső vasmagban mágneses tér alakulhat ki, ami védi a bolygó felszínét a napszállástól és a kozmikus sugárzástól. A belső hő nem csak radioaktív eredetű lehet, hanem származhat geokémiai folyamatokból, árapály-deformációból vagy belső differenciálódás során átalakuló helyzeti energiából.

A gravitációs kölcsönhatások kapcsán említhetők a becsapódások, amelyek három szempontból fontosak: kezdetben vizet és szerves anyagokat hoznak a bolygóra. Emellett a becsapódástól felszabadult vízgőz és szén-dioxid növeli a légkör mennyiségét, üvegházhatása pedig melegedést okoz. A kirepült és a légkörben lebegő por viszont kevesebb fényt enged a felszínre, ami lehűléssel jár (Balázs, 1996).

#### 2.4.1. A bolygó holdjának hatása

Egy a bolygóhoz viszonyítva nagyméretű hold hatását legkönnyebben a Föld – Hold rendszerrel szemléltethetjük. A továbbiakban azt feltételezzük, hogy a vizsgált bolygó minden más paramétere megegyezik a Földével.

A Föld a Hold nélkül keletkezett. Kialakulása után nem sokkal egy Mars-méretű égitesttel ütközött, az ennek során kidobódó anyag gyűrűt alkotott a Föld körül, és ebből alakult ki a Hold. Ez a becsapódás megváltoztatta a földkéreg jelentős részét. Ezen kívül sok szén-dioxid került az űrbe, ami a légkör fejlődésének megváltozását eredményezte, valamint megváltozott a Föld forgása és a Nap körüli pályája is.



24. ábra: Fantáziarajz a Hold keletkezéséről (origo.hu)

A Hold elsősorban gravitációs hatásával és a visszavert napfényvel hat a Földre. Az úgynevezett holdfény befolyásolja néhány állat evolúcióját, szaporodási ütemét is (Comins, 1994).

A gravitációs hatásnak tudható be, hogy a Föld forgása lelassult, melynek evolúciós hatása a növények és állatok életsiklusának kialakulásában van. Ennek a megfigyelésnek a magyarázata az, hogy a mechanika törvényei alapján a Hold nem a Föld középpontja körül kering, hanem a Föld - Hold rendszer közös tömegközéppontja körül. A Hold keringési periódusával megegyező periódussal a Föld is kering a rendszer tömegközéppontja körül.

A Hold a Föld tömegközéppontjára egy átlagerővel hat, ám a közvetlenül alatta lévő víztömeget erősebben vonzza, - az meg is emelkedik felé -, míg a túloldali vízréteget gyengébben.

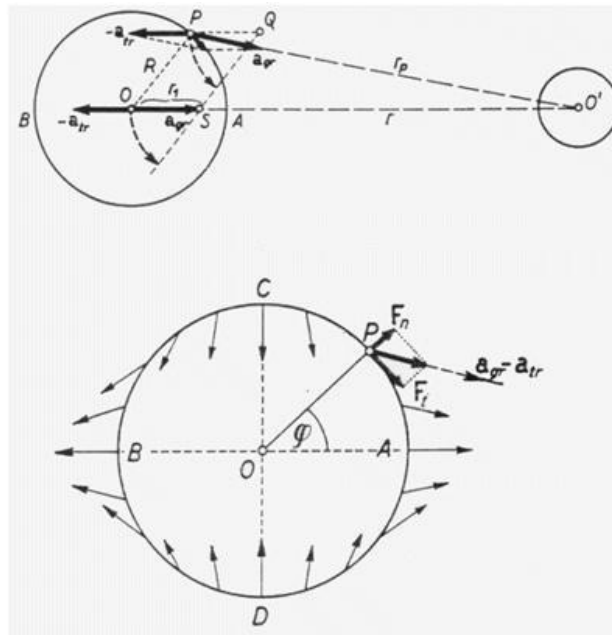
Ha  $R$  a Föld sugara, a két égitest tömegközéppontja,  $S$  a Föld  $O$  tömegközéppontjától  $r = \frac{3R}{4}$  távol van. Ha az első közelítésben merevnek gondolt Föld forgásától eltekintünk, akkor az  $O$  középponttal együtt a Föld bármely tetszőleges  $P$  pontja is körpályát ír le, azaz a Föld kör menti translációt végez  $a_{tr}$  gyorsulással.

$$a_{tr} = \frac{\gamma m_H}{r^2}$$

A  $P$  pontban a gravitációs gyorsulás:

$$a_{gr} = \frac{\gamma m_H}{r_p^2}.$$

Mivel a Föld középpontjában  $r = r_p$ , ezért a két erő eredője itt 0 lesz, máshol azonban ettől különbözik. Az ábra alsó felén az eredő erő  $F_t$  érintőirányú komponense kelti az árapályt. Az ábrán ezt több pontban meg is szerkesztették. A víztükör mindig merőlegesen igyekszik beállni a rá ható eredő erőre (ha a felszín még nem merőleges, az erőnek lesz rá ható vízszintes komponense is, ami a rétegeket addig csúsztatja el egymáson, míg az nem lesz), ezért a rajznak megfelelően  $A$  és  $B$  pontokban egy-egy dagálypúp keletkezik, míg  $C$ -ben és  $D$ -ben csökken a vízszint, vagyis ott apály alakul ki (Budó, 1992).



25. ábra: A Hold keltette árapály (Budó, 1992)

Vagyis a tengerek a Hold felé eső és a Holddal ellentétes részen kissé kidudorodnak. Ezek a dagály-hullámok, amelyek a Föld tengelykörüli forgása következtében végigvonulnak a Föld felszínén. A végigvonuló dagályhullámok a tengerpartokon lefékeződnek, és energiájukat átadják a szilárd felszínnek. Így állandóan egy forgatónyomaték lép fel, ami a Föld forgását lassítja, aminek következtében a napok hossza 0,0016 másodpercet növekszik 100 évenként, illetve a Holdat gyorsítják, ami így folyamatosan távolodik a Földtől (Balázs, 1996). Ennek következményeként Hold nélkül a Föld kevésbé lassult volna le ugyanannyi idő alatt, ezért a Földön a Coriolis erő miatt erősebb és tartósabb szelek lennének, melyek az egyenlítői vidéken rendszerint kelet nyugat irányba fújnának. Így a hegyek és más felszíni formák is jobban kopnának, ezért alacsonyabb lenne az átlagos tengerszint feletti magasság. A gyors forgás miatt a mágneses tér is erősebb lenne, vagyis kevesebb töltött részecske érné el a felszínre, ezáltal kevesebb lenne a spontán mutáció, aminek hatására lassulna az evolúció üteme és hosszabb ideig tartan az értelmes élet kifejlődése.

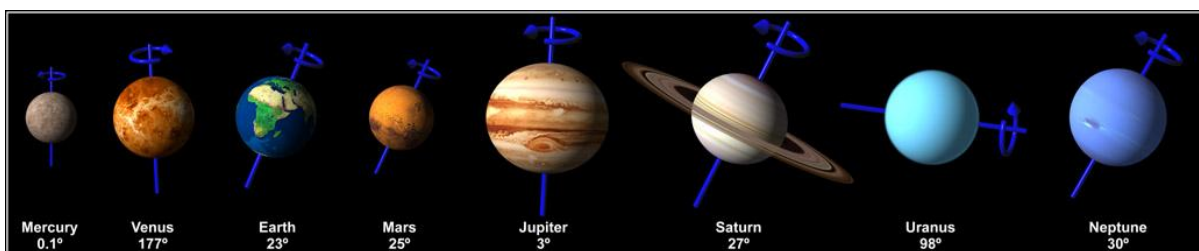
Ezen felül a Hold gravitációs hatása nélkül a dagályok kisebbek lennének, kb. 1/3-a a mainak, de nem szűnnének meg, mivel a Nap hatása is közrejátszik ebben a folyamatban. Hold hiányában az apály és a dagály közötti különbség egész évben ugyanakkora lenne, vagyis nem lenne szökőár illetve vakár (Comins, 1994).

#### 2.4.2. A forgástengely szerepe az élet kialakulásában

Két szélsőséges esetet vizsgálunk, természetesen az egyszerűség kedvéért itt is a Földön szemléltetve. Az első esetben a forgástengely merőleges a pályasíkra. Ilyenkor a Nap az év minden napján az Egyenlítő fölött lenne, vagyis ezen a területen minden nap napfényes lenne, melynek eredményeként a nappalok pontosan 12 órák lennének.

Ebben az esetben egy adott szélességi kör mentén a hőmérséklet nem változna évszakonként a napok hosszának és a Nap beesési szögének változása miatt. Kisebb hőmérsékletváltozások azonban bekövetkeznének a Nap - Föld távolság változása miatt.

A másik esetben a forgástengely egybeesik a pályasíkkal. Ilyen esetben az északi és a déli pólus egész évben ugyanabba az irányba mutat. A Hold két stabil pályán keringhetne, vagy az Egyenlítő fölött, vagy az Ekliptikában. Az Egyenlítő kivételével mindenütt lennének olyan időszakok az év során, amelyeket hosszan tartó sötétség vagy hosszan tartó világosság jellemez. Az ilyen szélsőséges időjárás a túlélés és alkalmazkodás szempontjából nem előnyös. Ezen kívül megnehezíti az élőlények biológiai órájának összehangolt működését (Comins, 1994).



26. ábra: A Naprendszer bolygóinak tengelyhajlása a pályasíkhöz (Calvin J. Hamilton)

#### 2.4.3. A tömeg, mint meghatározó paraméter

A bolygó gravitációja meghatározó lehet az élet kialakulása szempontjából. A gravitáció kisebb, ha ugyanakkora méret mellett kisebb a sűrűség, vagy ha ugyanakkora a sűrűség, de kisebb a méret.

Például csökkenne a Föld sűrűsége, ha változik a kémiai összetétele. Ha változik a kémiai összetétel más fajta élőlények alakulnak ki, ha egyáltalán kialakulnak. Ha a sűrűség változatlan, akkor a kisebb sugár következtében a belső szerkezeti részek is kisebbek,

ebben az esetben kisebb lenne a Föld magja is. A kisebb mag előbb kihűl, ennek következtében kevesebb lenne a vulkanikus és szeizmikus aktivitás, és kisebb lenne a mágneses mező is. Ha nincs lemeztektonika, akkor megszilárdul a kéreg, ami megakadályozza a sok különböző faj kialakulását és kevesebb új élőlény fejlődne ki, vagyis kevésbé változatos ökoszisztéma jönne létre.

Ha a tömeg változik, akkor a légkör egy része elszökik, mert alacsonyabb a szökési sebesség. Vagyis egy túl kicsi tömegű bolygón az élet számára fontos kémiai elemek elszöknek a légkörből. Ezen kívül a légkörnek fontos szerepe van még a bolygó energiagazdálkodásában is. A Nap energiája mozgási, kémiai és biológiai energiák formájában nyilvánul meg és a folyamatok végén termelődő hő sugárzódik vissza a térbe. A bolygót melegíti még a belső hő, ami egyrészt a kéregben lévő hasadó és radioaktív elemek bomlásakor szabadul fel, másrészt a lemeztektonika során fellépő súrlódás következménye.

Ha csak a tömegcsökkenés okozta változást nézzük, akkor egy adott tömeg mozgathatásához kisebb izomzat kell, amit könnyebb váz is elbír. Ennek következtében nagyobb lenne a legnagyobb szárazföldi állatok tömeghatára is. A Földön a határ jelenleg az elefánt. Viszont a kisebb sűrűségű levegőben a madarak nehezebben repülnének. A levegő oxigén tartalma is lecsökkenne, aminek következtében vagy nagyobb tüdőre vagy gyorsabb légzésre lenne szükség, ám mindkét eset erősen megterheli az izomzatot (Comins, 1994).

### **3. Élet a Naprendszerben**

#### **3.1. Bolygónk a Föld**

A kezdet kezdetén a Föld gravitációs összehúzóerőből és a bolygócsírák ütközéséből adódó hőmérséklete kb. 1000 fok lehetett, ami a természetes radioaktivitás hatására hamarosan elérte a vas olvadáspontját. A Föld ekkor gyakorlatilag egy nagy magma-golyó volt. A nehezebb elemek, mint például a vas és a nikkel, a bolygó belseje felé süllyedtek, míg a könnyebb elemek a felszín közelében halmozódtak fel. Ez a differenciálódási folyamat volt a Föld őstörténetének meghatározó eseménye. A nehezebb elemek egyre lejjebb süllyedtek, és ezek alkotják ma a Föld magját. A könnyebb elemek pedig a köpeny, a kéreg, valamint a kontinensek anyagába épültek be. A Föld átlagos sűrűsége  $5,5 \text{ g/cm}^3$ , azonban a köpeny sűrűsége ennek csak mintegy fele, azaz  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (Rees, 2006).

Jelenleg a Föld egyetlen belső hőforrását a radioaktivitás jelenti. Az ez által termelt hőt a bolygó belseje háromféleképpen adhatja le: sugárzás, hővezetés, illetve konvekció révén.

A Föld és a többi belső bolygó szilárd kérge sokkal jobban lelassítja a hőenergia leadását, mint egy külső gázburok. Ha bolygónknak nem lenne szilárd kérge, akkor már rég leadta volna belső energiája nagy részét. Az élet megjelenésének az égitest kialakulásakor felhalmozott energia lassú leadása kedvez. A magból a köpenyben, majd a kérgen keresztül távozó hő a vulkánkitörésektől a kontinensek vándorlásáig számos geológiai folyamat mozgatórugója. Ebből következik, hogy a Föld belső aktivitása folyamatosan csökken, belseje lassan hűl, és a radioaktív atommagokban tárolt energia is fokozatosan csökken. A Föld belső aktivitásának köszönhető bolygónk mágneses terének kialakulása is. A Föld mágneses erőtere kb.  $50 \mu\text{T}$ , ami nem számít túl erősnek. Szerkezete közelítőleg dipólként írható le. A mágneses tengely  $10^\circ$ -ot zár be a forgástengellyel, aminek következtében hosszútávon jelentős változásokon megy keresztül. Ilyenek például a pólusváltások, vagy a földi mágneses viharok, melyek megzavarják az iránytűket (Herrmann, 2002). Az utóbbi 100-150 évben jelentősen gyengült a mágneses tér erőssége, valamint a mágneses pólusok gyorsan vándorolnak.

Élet a Földön:

A Földön az élet nagyon korán, kb. 3,8 milliárd éve megjelent, alighogy megszűnt a „Nagy Korai Bombázás” és megszilárdult a forró ősi bolygótest. Sokáig, kb. három milliárd évig, azonban csak a mikroszkopikus egysejtűek szintjén maradt. Lehet, hogy ahhoz, hogy a természet magasabb rendű, intelligenciával rendelkező fajokat hozzon létre, nagyon speciális körülmények megvalósulására van szükség. Például a dinoszauruszok 180 millió évig uralták a Földet, de intelligenciájuk nem fejlődött és nem hoztak létre technikai civilizációt sem. Ugyanakkor az emlősöknek erre kb. 100 millió év elég volt. Persze az emlősök térhódítása nem lett volna lehetséges, ha a nagy testű dinoszauruszok nem pusztulnak ki 65 millió évvel ezelőtt.

### 3.2. A Mars és a Vénusz biológia potenciálja

A fizikai feltételek az ősi Föld típusú bolygókon igen hasonlóak lehetnek. Éppen ezért, általában véve, arra lehet számítani, hogy az élő anyag keletkezéséhez a feltételek ezeken a bolygókon legalábbis hasonlóak voltak, ha nem is voltak egyformák. Az élet keletkezéséhez a távoli múltban a Marson és a Vénuszon általában véve kedvezőek voltak a feltételek.

A Vénusz tömegét és méretét tekintve ez a bolygó hasonlít a leginkább a Földhöz. Vénusz átmérője kb. 95 %-a a Földének, és kémiai összetétele is igen hasonló. A méretbeli hasonlóság miatt sokáig azt hitték a csillagászok, hogy a Vénusz felszíne is lakott, ám ez az elmélet megdőlt, amikor az első szondák kimutatták, hogy a nyomás a földi értéknek kb. 90-szerese, és a felszíni hőmérséklet közelítőleg 450 °C.



27. ábra: Fantáziarajz a vénusz-lakókról (Dorschner, 1984)

Jelenleg roppant csekély mennyiségű víz található csak a planétán: ha sikerülne folyékony állapotban összegyűjteni a bolygó összes vizét, alig néhány centiméteres rétegben borítaná be a felszínt. Az erre vonatkozó méréseket a Venus Express szonda infravörös megfigyelései szolgáltatták.

Az elfogadott modell szerint azonban a múltban a bolygó sokkal inkább hasonlított a Földre, mint napjainkban. A valaha jóval kellemesebb hőmérsékletű, vízben gazdag bolygó azonban később jelentős felmelegedésen esett át, majd a szélsőségesen erős üvegházhatás révén, melyet nagy valószínűséggel a túlzott vulkanizmus okozott, teljesen elvesztette vízkészletét ([hirek.csillagaszat.hu/venusz.html](http://hirek.csillagaszat.hu/venusz.html)).

Ennek ellenére a Vénusz kutatása asztrobiológiai szempontból érdekes lehet, mivel jelenlegi állapota számottevő hasonlóságot mutat a Föld néhány milliárd évvel ezelőtti állapotával. Így esélyünk lehet kezdetleges életformák, vagy esetleg szélsőségkedvelő élőlények, úgynevezett archeák felfedezésére is. Az ilyen extremofilek tanulmányozása azért fontos, mert a jelenlegi biológiai kutatások szerint az ilyen életformákból fejlődött ki a ma ismert földi élet is.

A Mars átmérőjét tekintve kb. a fele a Földnek, egyenlítőjén a felszíni gravitációs gyorsulás csak 38 %-a a földinek. Ennek a gyenge gravitációs térnek a hatására a légkör gázai könnyen elszöknek, ezért a Marsnak igen ritka a légköre és a nyomás is csak 6 millibár, ami kevesebb, mint a földi érték 1%-a. A Mars felszíni hőmérséklete -125 és 25 °C között ingadozik.

A Marson asztrobiológiailag kedvező felszíni körülmények főleg az első néhány százmillió évben lehettek. Az idős vízfolyásnyomok és az egykori északi óceán létezésére utaló jelek alapján ekkor valószínűleg nagy mennyiségű folyékony víz volt a bolygón. Ebben az időszakban elméletileg kialakulhatott valamiféle primitív, egysejtű élet a Marson, melyek akár a jelenlegi kedvezőtlenebb körülmények között is képesek fennmaradni (<http://www.origo.hu/tudomany/vilagur/20090801-az-elet-lehetosege-a-marson-akar-peroxid-alapu-is.html>).



28. ábra: Egy marsi meteorit (NASA)



29. ábra: Feltételezett nanobaktérium lenyomata a marsi meteoritban (NASA)

Jelenlegi elképzeléseink szerint a Mars egykori magma kamráiban előfordulhat nagyobb mennyiségben folyékony víz, és valószínűleg ezek a felszín alatti régiók szerves anyagokat is tartalmaznak (Kereszturi – Simon, 2004).

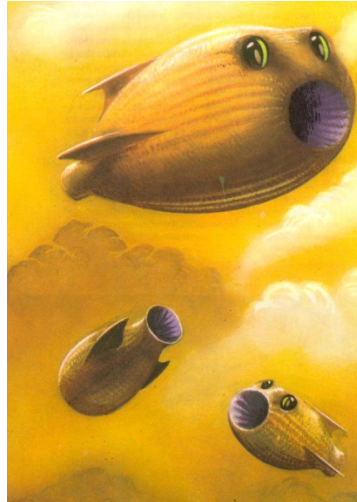
### 3.3. Óriásbolygók és holdjaik biológia potenciálja

Jelenlegi ismereteinknek nem mond ellent egy olyan hipotézis, amely szerint az óriásbolygókon létezhetnek primitív organizmusok. Egyszerű szerves vegyületek szintetizálódhatnak az óriásbolygók légkörében, amely sok tekintetben hasonlít a Föld őslégkörére. Rádiócsillagászati megfigyelések azt mutatják, hogy a Jupiter légkörében is hatalmas erejű elektromos kisülések mennek végbe.

Carl Sagan felvetése szerint még az is lehetséges, hogy meghatározott mélységben ezeken a bolygókon a víz és az ammónia cseppfolyós állapotban van. Ebből következik, hogy ha a légkörben képződnek szerves vegyületek és ezek képesek oldódni az ammónia- vagy víztengerekben, akkor egyre komplexebb molekulák képződhetnek, és esetleg kialakulhat a primitív egysejtű élet is. Az ammónia olvadáspontja és forráspontja elég magas, nagy a fajlagos hőkapacitása, és elég nagy a dielektromos állandója is. Igen jó oldószer. Ezért az ammónia az előbbi tulajdonságok alapján potenciálisan alkalmas arra, hogy meghatározott feltételek mellett az életközeg szerepét töltsse be (Sklovskij, 1976).



A Jupiter sűrűsége nem sokkal kisebb, mint a folyadékoké, vagy a szilárd testeké. A Jupiternek van saját energiaforrása, vagyis hőt termel. Ezt a hőt a gravitációs összehúzódás hatására létrejövő energiavesztés fedezi. A Jupiter gázburkában épp olyan fizikai feltételek uralkodnak, mint amilyenek a modellek szerint a földi őslégréteget jellemezték. Elvileg tehát elképzelhető, hogy kialakuljanak igen bonyolult szerves vegyületek, melyek esetleg egy eddig számunkra ismeretlen élő molekularendszerré szerveződtek.



30. ábra: Fantáziarajz a jupiter-lakókról (Dorschner, 1984)

Az óriásbolygók holdjai közül az élet keresése szempontjából potenciális célpont a Titán és az Európa.

A Titán a Szaturnusz legnagyobb, és a Naprendszer második legnagyobb holdja, mérete egy kicsit nagyobb, mint a Merkúr. A Titán mai elgondolásunk szerint nem elsősorban az élet kutatás szempontjából érdekes, hanem a prebiotikus folyamatok tanulmányozása miatt. Szénhidrogén tartalmú légkörében ugyanis szerves anyagok szintézise zajlik, felszíne alatt pedig a Naprendszer egyik legnagyobb víz- illetve metánóceánja rejtőzhet, ami a hold feltételezett belső hője miatt folyékony állapotban képes maradni. A Titán felszínén lévő metán- és etán-tavak felületéről elpárolgó metán a légkörben gyökökre bomlik, és ezek a nitrogénnel egyesülve elméletileg akár egyszerű aminosavakat is létrehozhatnak. A kémiai átalakulás a Nap ultraibolya sugárzása, a légköri elektromos jelenségek vagy a Szaturnusz magnetoszférájában mozgó töltött részecskék bombázása okozhatja (Kereszturi – Simon, 2004).

Az Európa a Jupiter negyedik legnagyobb holdja, mely csak egy kicsit kisebb, mint a Hold. Az Európa kérgének anyaga főleg vízjég, nyomokban azonban kén, kén-dioxid, hiperoxidok (pl.  $H_2O_2$ ), magnézium- és nátrium-karbonátok is előfordulnak benne. Az Európa rendkívül ritka légkörét oxigén alkotja, ami a felszínről szublimáló, majd az ultraibolya sugárzástól szélbomló vízmolekulákból keletkezik. A ritka légkör nem védi a felszínt a Jupiter magnetoszférájának részecskesugárzásától, ezért található a jéggrétegben hiperoxidok.

A néhány tíz km vastagságú kérge alatt folyékony tenger lehet. Ez a víztartalmú réteg, mely becslések szerint elérheti a 80-170 km-t, több folyadékot tartalmaz, mint a földi óceánok együttvéve, s így teret nyújthat az élet számára (Kereszturi – Simon, 2004).

A felszínen keletkező oxidált molekulák a jéggréteg lassú mozgása és olvadás, repedezés révén az óceánba jutnak, ez azért érdekes, mert az óceán oxigéntartalma fontos

paraméter az élet kialakulása és fejlettsége szempontjából. Mivel a földi tengerek élőlényei az anyagcseréjük során főként a vízben oldott oxigént használják fel.

A dinamikus felszínformálódással kapcsolatos új eredmények alapján kiszámítható, hogy mindössze néhány millió év alatt elegendő oxidáló anyag juthatott az Európa óceánjába ahhoz, hogy az oxigénkoncentráció elérje a földi tengerekét. Ez a mennyiség pedig elegendő lehet ahhoz, hogy ne csak a korábban feltételezett mikroorganizmusok, hanem akár fejlettebb élőlények anyagcseréjét is biztosítsa (<http://hirek.csillagaszat.hu/galilei-holdak.html>).

#### **4. Az élet kialakulásának valószínűsége**

Egy bolygón az élet kialakulásának esélyeit nem csak a csillagtól való távolság határozza meg, hanem sok más körülmény is. Az éghajlatot befolyásolja a bolygó légkörének vastagsága, összetétele, fényvisszaverő képessége; a pálya lapultsága, a forgástengely helyzete, stb. A csillagtól érkező fény mellett hőforrás lehet a bolygó anyagában végbemenő radioaktív bomlás, vagy egy másik közeli égitest, például nagy hold által okozott árapályfűtés. Fontos körülmény lehet, hogy bolygónknak viszonylag nagyméretű holdja van, amely stabilizálja a bolygó forgástengelyét. A szén-dioxid körforgását a köpeny és a légkör között a bolygó lemeztectonikája, a kőzetlemezek folyamatos vándorlása, illetve a vulkanizmus biztosíthatja. Ez a légköri szén-dioxid többlet kellhet ahhoz, hogy az üvegházhatás érvényesüljön, és egy bolygó lakható hőmérsékletre melegedjen.

##### A kopernikuszi elv, avagy a közepszerűség elve:

Helyzetünk a Világmindenségben első látásra zavarba ejtően átlagos. A Föld egy átlagos méretű bolygó a Naprendszerben, a Nap átlagos csillag a Tejútrendszerben, és a Tejútrendszer is egy átlagos spirál galaxis.

A Nap a fősorozat közepe táján a G2 színképtípusnál található. Fényessége gyakorlatilag állandó, csillagkísérője nincs. A Tejútrendszer fősíkja közelében, a korong külső harmadában, egy átlagos csillagsűrűségű térrészben kering a rendszer középpontja körül.

A Föld a négy belső bolygó közül sem tűnik ki különösebben, tömege nagyjából megegyezik a Vénuszéval, tengelyforgási ideje a Marséval, légkörének sűrűsége pedig a Marsé és a Vénuszé közé esik. A Naprendszerben csak a Földön működik tartósan a lemeztectonika, ami folyamatos kéregmozgást tart fenn, és valószínűleg fontos szerepet játszik a földi élet fejlődése szempontjából. A lemeztectonika működése valószínűleg összefügg azzal, hogy a Földnek igen nagy tömegű kísérője van. Ha a Hold nem létezne, vagy a mainál sokkal kisebb lenne, akkor a Föld tengelyének a pályasíkhhoz viszonyított hajlásszöge 0 és 85 fok között kaotikusan vándorolna, ami jelentős klimatikus hatásokkal járna, azaz lehetetlenné tenné az élet kialakulását (Almár, 1999).

Ha a közepszerűség elvét a Földön kívüli élet kereséséhez felhasználjuk, akkor azt tapasztaljuk, hogy nincs a Földön semmi olyan, ami csillagászati, geológiai, fizikai vagy kémiai szempontból különlegesség tenné bolygónkat, ezért biológiai körülményeit tekintve sem foglalhat el megkülönböztetett helyet, vagyis van értelme kutatni számunkra eddig ismeretlen életformák után (Almár, 2004).



#### 4.1. A Drake egyenlet (Sagan, 1980)

A Drake-formula valójában valószínűségek szorzata. Az értelmezéstől függően több megoldása is lehetséges, ám mindegyik lehetőség esetében  $N \geq 1$ , mégpedig éppen a földi civilizáció miatt.

$$N = R \times f_p \times f_b \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

N: A Tejútrendszerben létező technikai civilizációk száma

R: Tejútrendszerben évente keletkező napszerű csillagok száma

Közéltőleg 200 milliárd csillag keletkezett nagyjából 12 milliárd év alatt, ebből átlagosan minden tizedik naptípusú, azaz az R értéke közelítőleg 1.

$f_p$ : A bolygórendszer kialakulásának valószínűsége  $f_p=1/3$

$f_b$ : A bolygó az élethőzónában kering  $f_b=1/2$

Az utóbbi években kiderült, hogy a Drake-formula  $f_b$  tényezőjét módosítani kell, mégpedig azzal a meglátással, hogy egy-egy óriásbolygó holdrendszerében keringő nagyméretű hold felszín alatti vizeiben is kialakulhat élet az árapályfűtés miatt, ennek ellenére ezt a tényezőt a következő számolás során elhanyagoljuk.

$f_i$ : Az élet megjelenésének valószínűsége. Optimista becslés alapján azt mondhatjuk, hogy ha megvannak az élet kialakulásának feltételei, akkor az élet ki is alakul.

Ebből következik, hogy  $f_i=1$ .

$f_l$ : Értelmes lények kifejlődésének valószínűsége. Ez a tényező már nagyon bizonytalan és spekulatív, mivel sok esemény befolyásolhatja. Pl.: Katasztrófák megsemmisíthetik a rendszert, vagy a hosszú ideig állandósult nyugalmi állapot hátráltathatja a mutációkat. Ezért  $f_l$  optimista becslés esetén is csak 1/10.

$f_c$ : Kapcsolatteremtésre alkalmas civilizáció kialakulásának valószínűsége. Újabb optimista becslést alkalmazva  $f_c=1/2$ .

L: A civilizációk átlagos élettartama

Egy civilizáció élettartamát jelentősen befolyásolják bizonyos tényezők. Az emberiséghez hasonlóan valószínűleg más civilizációknak is problémát okozna a népességrobbanás, az energiafogyasztás hirtelen megnövekedése vagy a dokumentációs központok tudományos adatokkal való elárasztása. Elképzelhető, hogy egy civilizáció, amely túléli a szegénységet, éhezést, járványokat, túlnépesedést, legyőzi a környezetszennyeződést, és nem pusztítja ki saját magát, elveszti érdeklődését a kutatások iránt, így aláássa saját alapjait, és egy napon bekövetkezik katasztrofális összeomlása.

Ha nagyon optimisták vagyunk, akkor az üzenetküldésre alkalmas civilizációk élettartamát 1000 évre tehetjük. Ebben az esetben tehát az élettartamot attól az időponttól számítjuk, amelytől kezdve az adott civilizáció a rádióhullámokat kommunikációs célokra használni tudja.

A fent bemutatott becslések szerint jelenleg a Tejútrendszerben 8 kommunikációra képes civilizáció létezhet.

A Drake-formula egy másik változatának megoldása, melyet Carl Sagan amerikai csillagász javasolt:

$N = 400$  milliárd (csillagok száma)  $\times$  1/4 (bolygórendszer)  $\times$  2 (lakható bolygók száma)  $\times$  1/2 (élet kialakulásának valószínűsége)  $\times$  1/10 (intelligencia)  $\times$  1/10 (kommunikáció)  $\times$   $f_L$ .

Ebben az esetben az egyenlet utolsó tagja nem a civilizáció időtartamát, hanem az élet hosszú távú (csillagászati időskálán nézve) fennmaradásának valószínűségét jelenti.

I.  $f_L=1/100$  millió ebben az esetben gyakori az „öngyilkosság” – kb. 10 civilizáció

II.  $f_L=1/100$  ebben az esetben a civilizáció képes csillagászati időskálán is fennmaradni, és ilyenkor N milliós nagyságrendű, vagyis ha egyenletes

eloszlást tételezünk fel, a legközelebbi kommunikációra képes civilizáció kb. 200 fényév távolságban van tőlünk, de melyik irányba?

Ebből látszik, hogy a kommunikációra képes társadalmak száma közelítőleg megegyezik években számított átlagos élettartamukkal. Tehát nem érdemes nagyon nagy távolságokban keresni, mert az információ csak a fény sebességével tud terjedni, ezért a távoli csillagok a több száz vagy ezer évvel ezelőtti állapotot mutatják, és a földi civilizáció is csak alig 100 éve képes rádiójelek továbbítására.

#### 4.2. A Fermi-paradoxon: „De hol vannak a többiek?”

Például azért vagyunk egyedül, mert:

- mi vagyunk az elsők
- az Univerzum mostanra vált az élet számára alkalmas helyé
- a bolygórendszerek vagy az élet számára alkalmas bolygórendszerek ritkák, mert a Föld-szerű bolygók ritkák
- ritkák az olyan bolygórendszerek, ahol a Jupiter-szerű óriásbolygók megvédik a belső bolygókat a csillagrendszer külső részéről érkező égitestek becsapódásától
- az Univerzum az élet számára veszélyes hely (közeli szupernóva, gamma-viharok, becsapódások)
- a földi tektonikus rendszer egyedülálló
- a Holdunk kivételes jelenség
- bár a prokarióták megjelenése nem számít ritkának, de az eukarióták létrejötte már sokkal valószínűtlenebb. A soksejtűek megjelenésére a Föld estében is legalább 3 milliárd évre volt szükség.

Ha azt feltételezzük, hogy sem a történelmi, sem a történelem előtti időkben nem látogatták meg idegen civilizációk küldöttei a Földet, és nincs semmi jele bármiféle külső, gyarmatosítási törekvésnek, akkor ezen események hiánya a következő okok valamelyikére vezethetők vissza:

- a csillagközi repülés lehetetlen;
- lehetséges ugyan, de tartósan nem érdekli a Földön kívüli civilizációkat;
- lehetséges és meg is indult valahol az Univerzumban egy vagy több „gyarmatosítási hullám”, de a nagy távolság miatt nem értek el a Földre;
- lehetséges és már el is jutottak a közvetlen környezetünkig, de társadalmi vagy etikai okok miatt nem avatkoztak be a földi élet fejlődésébe;
- nincsenek sehol, egyedül vagyunk.

Tegyük fel, hogy léteznek olyan fejlett civilizációk, amelyek képesek a csillagközi utazásra. Ha ezeknél a társadalmaknál megindulta a csillagközi gyarmatosítás, akkor a benne résztvevő populáció a fennmaradás szempontjából előnyt élvez az otthon maradtakkal szemben, például mozgékonyasága miatt védettebb az előre jelezhető kozmikus katasztrófák ellen.

A csillagközi gyarmatosítás megindításának egyik mozgatója lehet például a központi csillag felfúvódása, ami elől a civilizáció kénytelen távolabbra települni (Almár, 1999). Ebben az esetben a gyarmatosítási hullám sebessége:  $v = \frac{D}{(t_{ut} + t_{letel})}$ , ahol  $D$  a gyarmatosítható bolygórendszerek egymástól mért átlagtávolsága, az utazási idő  $t_{ut} = \frac{D}{v}$  ( $v$  a csillaghajó átlagsebessége) és  $t_{letel}$  az az időtartam, amely a megérkezéstől egy újabb gyarmatosító csillaghajó elindításáig eltelik.

A gyarmatosítás sebességével kapcsolatos „diffúziós terjedés” matematikai modelljét Newman és Sagan dolgozta ki 1981-ben. Arra a következtetésre jutottak, hogy az intersztelláris gyarmatosítási hullám sebessége lényegesen lassabb a feltételezettnél, ha a technikai civilizációk várható élettartama rövid ( $10^5$ - $10^7$  év). Ilyen rövid életű civilizációk csak ritkán vállalkoznának nagyszabású gyarmatosítási akcióra.

A Fermi-paradoxon úgynevezett biológiai megoldása azt mondja ki, hogy azért nincsenek más civilizációk, mert ezek kialakulása biológiai akadályba ütközik. Ez esetben hozzá kell tenni, hogy ez az akadály a Föld esetében nem működött, vagyis létezett a Földön egy úgynevezett evolúciós pumpa, ami kilendítette a holtpontról az egyes fejlődési stádiumokat. Ilyen kimozdító erő lehet például az üstökösök becsapódása, vagy egy-egy nagyon intenzív naptevékenység, de ha ezek az események nagyon gyakran bekövetkeznek, akkor az hátrányosan hat az evolúcióra, és lehetetlenné teszi az alkalmazkodást a megváltozott körülményekhez (Almár, 1999).

Ezzel ellentétben az ún. társadalmi megoldás azt mondja, hogy nincs akadály más civilizációk kialakulásának, ám ezek mind rövid életűek, hamar elpusztítják önmagukat. Ez a megoldás elég reálisnak tűnik, mivel a földi civilizáció is elég közel volt önmaga elpusztításához a hidegháború éveiben.

Egy másik megoldás lehet az, hogy egy bizonyos kezdeti technikai szint elérése után minden új civilizáció elpusztul, mert egy uralkodó, fejlettebb civilizáció tudatosan elpusztítja, mint potenciális vetélytársat.

Egy másik lehetőség, amiért nem találunk más civilizációkat az lehet, hogy az Univerzumban nem általános a terjeszkedő, gyarmatosító hajlam. A Földön is léteztek magas színvonalú, de terjeszkedni nem akaró társadalmak (Kínai birodalom), bár nem ez volt a jellemző. Illetve más bolygók fizikai paraméterei (pl.: légkör átláthatósága) befolyásolhatja az ott élő esetleges intelligens lények kapcsolatteremtési szándékait.

Ezen kívül megoldást jelenthet az úgynevezett antropikus elv bevezetése is, amely kimondja, hogy a Világegyetem kora kijelöli létezésünk időpontját. Dicke volt az a fizikus, aki először próbálta megválaszolni azt a kérdést, hogy mi határozza meg ezt az időpontot. Az élet kialakulásához szükség van szénre és más „nehéz” elemekre, amelyek a Világegyetem keletkezése utáni időszakban nem voltak jelen számottevő mennyiségben. A szén, az oxigén, a nitrogén és más nehezebb elemek a csillagok belsejében épülnek fel. Ezek az elemek akkor szóródnak szét a térben, amikor a szupernóva robbanás megsemmisíti a csillagot. A földihez hasonló típusú élet kialakulására tehát legalább addig kell várni, amíg a csillagok első generációja leéli az életét és elpusztul. Létezésük időpontját a másik irányból az határolja be, hogy az élet kialakulása akkor is nehézségekbe ütközhet, amikor számtalan csillaggeneráció leélte az életét, mert ekkorra már csak kevés alkalmas csillag marad. Mindebből következik, hogy akkor kell legnagyobb valószínűséggel számítanunk saját jelenlétünkre a Világegyetemben, amikor az ősrobbanástól számítva legalább egy, de legfeljebb néhány csillag-élettartamnyi idő telt el (Nemecz, 2007).

Akár mennyire valószínűtlennek tűnjék is az értelmes élet kialakulása, mi kétségbevonhatatlanul létezőnk. Márpedig ebből kiindulva úgy érvelhetünk, hogy bármennyire valószínűtlen lépések szükségesek is az értelmes lények kialakulásához, ezeknek a lépéseknek legalább egyszer be kellett következnie. Mindebből természetesen nem következik, hogy ugyanennek egynél többször is elő kell fordulnia, mivel nem fogalmazhatunk meg fenntartások nélkül statisztikai kijelentést egyetlen referencia alapján.

### **4.3. Élet a Földön kívül, a szupercivilizációk**

Az asztrobiológia vagy exobiológia célja az élet és az Univerzum valódi kapcsolatának tisztázása, azaz a Földön kívüli élet kutatása (Herrmann, 2002).

Az élet legfontosabb feltételeinek a következők számítanak:

1. A szerves élet szorosan kapcsolódik bizonyos bonyolult felépítésű molekulákhoz (fehérjék, nukleinsavak). Egyszerű molekulák vagy atomok még a legprimitívebb életformák esetében sem alkalmasak arra, hogy a biokémiai folyamatokat és reakciókat irányítsák.
2. Az aktív, szerves élet csak bizonyos szűk hőmérsékleti tartományban lehetséges. 100°C felett a nagy szerves molekulák szétesnek (koagulálnak), ha viszont jelentősen 0 °C alá csökken a testhőmérséklet, akkor a biokémiai reakciók annyira lelassulnak, hogy lehetetlenné válik az aktív élet. Az élet kibontakozásához legmegfelelőbb hőmérsékleti tartomány +25 és +45 °C közé esik.

Az utóbbi években világossá vált, hogy az élet igen szívós: szinte nincs olyan hely a Földön, ahol ne élne legalább egyszerű életformák, mint a baktériumok és archák (sejtmag nélküli egysejtűek egy csoportja). A különleges környezeti feltételek között élő szervezetek benépesítik a hévforrásokat, a sarkvidéki jégtakaró alatti tavakat, a tundra fagyott talaját, a különleges vegyi adottságú helyeket, sőt még a földkéreg kőzeteiben is megélnek. A szélsőségkedvelő élőlények információval szolgálnak a földi élet korai fejlődéséről, és érdemes ezekhez hasonló lényeket keresni más égitesteken is.

### Szupercivilizációk

Jean Heidmann francia csillagász három feltevése, amely az intelligens életre vonatkozik:

A földi élet a kozmosz fizikai folyamataiból következő természetes fejlődés eredménye.

Ami a földön megtörtént, az másutt is megtörténhet.

Az emberi értelem nem jelenti a csúcst, amit a természet produkálni képes.

Az Univerzumban létező lehetséges civilizációk egy része a fejlődés alacsonyabb szintjén áll, és akkor gyakorlatilag felfedezhetetlen, másik része viszont meghaladja a földi civilizáció jelenlegi szintjét (Almár, 1999).

Az emberiség jelenlegi energiafogyasztása  $10^{13}$  watt körüli, és évről évre néhány százalékkal nő. Ha csak évi 1% növekedéssel számolunk, akkor a fogyasztás 3200 év alatt eléri a Nap, 5800 év alatt a Tejútrendszer össz sugárzását.

Nyikolaj Kardasev a hasznosított összenergia mértéke alapján elkészítette a technikai civilizációk osztályozását, a következők szerint.

I. típus: civilizáció, amely a lakóhelyeül szolgáló bolygóra szórt csillagenergiát hasznosítja

II. típus: szupercivilizáció, amely saját csillagának energiáját teljes egészében hasznosítja

III. típus: szupercivilizáció, amely a saját galaxisának teljes energiáját hasznosítja

Ha egy szupercivilizáció a számunkra is észrevehető módon alakítja át környezetét, legegyszerűbb esetben saját központi égitestét, akkor a csillag fizikai paramétereinek vizsgálatával képesek vagyunk detektálni a civilizációt (Almár, 1999). Ilyen környezetalakítás lehet például, ha a szupercivilizáció a központi csillagot saját nukleáris hulladékának biztonságos elhelyezésére használja. Az ehhez szükséges energia a Föld – Nap esetére kiszámolva:

$$r = 150 \times 10^9 \text{ m} , \text{ ami megegyezik a Föld pályasugarával}$$

$$r' = 696 \times 10^6 \text{ m} , \text{ ami megegyezik a Nap sugarával}$$

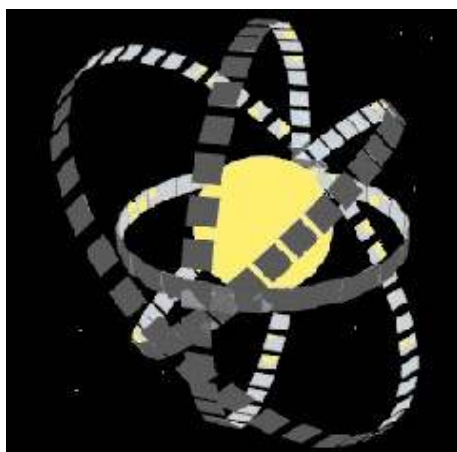
A teljes mechanikai energia egy adott r sugarú pályán körpályát feltételezve:

$$E = E_{kin} + E_{pot} = \frac{\gamma m M}{2r} - \frac{\gamma m M}{r} = -\frac{\gamma m M}{2r}$$

$$E_{be} = \Delta E = -\frac{\gamma m M}{2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) = 9,54 \times 10^{10} \times m \text{ J}$$

Ez az energia kb. két nagyságrenddel nagyobb, mint a Naprendszer elhagyásához szükséges energia. Ebből következik, hogy egy ilyen vállalkozás igen költséges, vagy a földi űrtechnikánál jóval hatékonyabb eszközöket igényel.

Szintén detektálható környezetalakítást eredményezhet az úgynevezett Dyson-gömb. Freeman Dyson 1959-ben tette közzé azt a megfigyelését, miszerint minden fejlődő emberi civilizáció energiafelhasználása folyamatosan nő, és elméletileg egy elég érett civilizációnak a csillaga által termelt összes energiára szüksége van. A Dyson-gömb volt a kísérleti felvetés, ami megoldást adhat erre a növekvő energiaigényre. Dyson eredeti elképzelése szerint a gömb nem egy összefüggő felület lenne, hanem több ezer fotocellás műhold, amelyek a felfogott napsugárzást energiává alakítanák, és úgy sugároznák a földre. Mellesleg ezt a fajta Dyson-gömböt a jelenlegi technológiával is meg tudnánk valósítani, mindössze idő és pénz kérdése lenne.



31. ábra: Fantáziarajz a Dyson-cellákról

Egy ilyen asztromérnöki teljesítmény drasztikus hatással lenne a csillag megfigyelhető spektrumára, legalább részben megváltoztatná a természetes csillaglégkör eredeti emissziós vonalát, amely valószínűleg az infravörös tartományban jelentős többletet jelentene. Dyson úgy vélte, hogy a fejlett idegen civilizációk talán a csillagok színképeinek vizsgálatával fedezhetőek fel, ilyen megváltoztatott spektrumokat keresve (Dorschner, 1975).

A Dyson-gömböknek más emissziós színképe is lehet, a gömbön belül kialakított belső környezettől függően; a magas hőmérsékleten kialakult életnek talán magas hőmérsékletű környezetre van szüksége, ami szórt sugárzás megjelenéséhez vezethet, de nem az infravörös, hanem a látható spektrumban. Emellett felvetődött a Dyson-gömb egy olyan lehetséges változata, amely nagy távolságokból csak nehezen lenne észlelhető; egy ilyen berendezés lehetne koncentrikus gömbök sorozata, amelyek közül mindegyik kevesebb energiát sugároz kifelé, mint belső szomszédja. A legkülső ilyen gömb hőmérséklete közel lehetne a csillagközi tér háttérsugárzásának hőmérsékletéhez, így nagy távolságból gyakorlatilag láthatatlanná válna.

Voltak kezdetleges próbálkozások a Dyson-gömbök létezésére utaló bizonyítékok, vagy más, a Kardasev-skálán II. és III. fejlettségű, olyan hasonlóan hatalmas szerkezetek



keresésére, amelyek megváltoztathatják a csillaguk színeképét, azonban az optikai megfigyelések nem vezettek eredményre.

#### 4.4. SETI

A SETI betűszó: a Földön kívüli értelem kutatásának angol rövidítéséből származik, Search for Extraterrestrial Intelligences. A SETI kutatások jelenleg a rádiótartományra korlátozódnak. Ebből következik, hogy a Földön kívüliekkel csak akkor tudunk rádiókapcsolatot teremteni, ha az idegenek elég értelmesek ahhoz, hogy rendelkezzenek a megfelelő technikai eszközzel, vagyis legalább olyan fejlődési szinten állnak, mint az emberiség.

Például: a jelenlegi arecibó-i rádiótávcsövet radarként alkalmazva, 1 MW kimenő teljesítmény esetén, egy hasonló méretű és érzékenységgű, 8000 másodperc integrációs időt alkalmazó vevőtávcső 3200 pc távolságból még éppen érzékelhetné a földi jelet. Bár az ilyen gyenge jelek esetén a hosszú integrációs idő eleve kizárja a kommunikációt, vagyis ebben az esetben csak figyelemfelkeltésről lehet szó.



32. ábra: Az arecibo-i rádiótávcső

SETI stratégiák a következők lehetnek:

- célzott kutatás: a vevőantennát olyan, előre kiválasztott, közeli csillagok felé fordítjuk, amelyek ígéretesek, mert Napunkhoz hasonlítanak
- teljes égbolt lefedése: nem teszünk különbséget az egyes irányok között.

#### 4.5. A kapcsolatteremtés és a kommunikáció problémái

A Földön kívüli civilizációk létezésének bizonyítási lehetőségei:

1. Űrutazások eredményeként más égitestek közelről megvizsgálhatók, és így közvetlenül megállapítható, hogy van-e vagy esetleg a múltban volt-e bioszférájuk.
2. A világűrben kutathatunk az értelem nyomai után, azaz megfigyelhetjük, érkeznek-e az űrből értelmes jelek, melyek utalnak az azokat küldő értelmes civilizációkra.
3. Kutathatunk olyan nyomok után is, amelyeket a kozmoszból érkezett látogatók bolygónkon, vagy a Naprendszer más égitestén hagytak.

Az első módszer ezek közül a legközvetlenebb és legbiztosabb eljárás, egyelőre nem alkalmazható, mivel a rakéatechnológia napjainkban még nem elég fejlett a csillagközi, sőt akár a bolygóközi utazásra sem (Davies, 2001).

A harmadik módszernél abból a megfontolásból indulunk ki, hogy a nagyon fejlett civilizációk megoldották már a csillagközi űrrepülés problémáját, és tudnak közlekedni a Tejútrendszerben.

A Földön kívüli civilizációk felfedezéséhez vezető égi jelenségek négy osztályba sorolhatók:

1. osztály: magas információtartalmú üzenet;
2. osztály: figyelemfelhívó jelek, amelyeknek kevés az információtartalma;
3. osztály: technikai civilizáció léteire utaló, kiszivárgott sugárzás;
4. osztály: egy jelenlegi, vagy egykori technikai civilizáció tevékenységének minden egyéb nyoma;

Az egyik kommunikációs lehetőség, amely bár elképzelhető, de eléggé valószínűtlen, hogy valahol a Föld közelében bukkanunk rá az idegenek üzenetére vagy az általuk alkotott tárgyra, ahogy ez Arthur C. Clarke 2001: Űrodüsszeia című regényében történik. Ezután a szerkezethez közvetlenül kérdéseket intézhetünk úgy, mint egy számítógéphez, és ennek eredményeként kialakulhat a párbeszéd. Ebben az esetben két fontos probléma merülhet fel:

- Először is gondot okozhat maga a kommunikáció, mivel nem valószínű, hogy a szerkezet számunkra értelmes „nyelvet” használ. Ez esetben a szerkezet nem érti a mi kérdéseinket és mi sem értjük meg a gép működési elvét.
- A másik probléma a párbeszéddel kapcsolatos, mivel egy ilyen szerkezet előre be van programozva. Tehát a párbeszéd nem valós, vagyis lesznek olyan kérdések, amelyekre nem fog tudni kielégítő választ adni a szerkezet, mivel a programozója nem gondolt az adott kérdésre és nem is írt rá választ. Összességében tehát olyan lesz a szituáció, mintha egy modern idő-palackpostával beszélgetnénk.

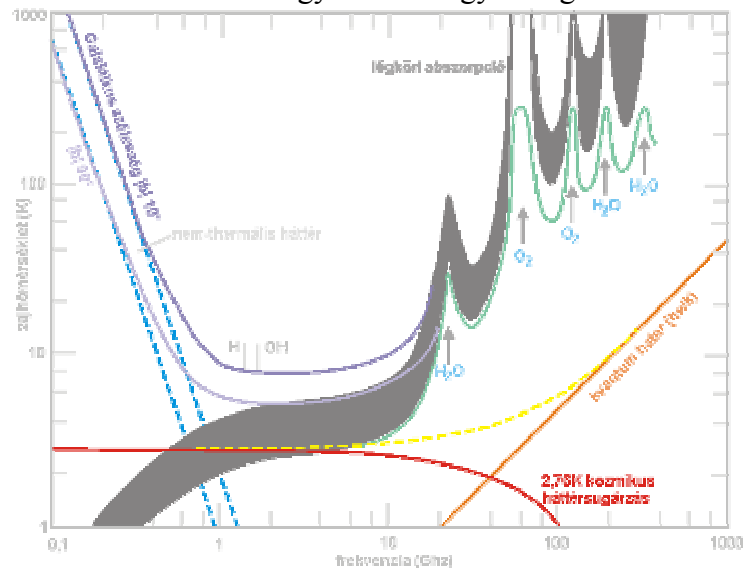
Természetesen az előző két probléma ellenére is óriási mennyiségű, és számunkra rendkívül fontos információhoz juthatnánk hozzá, ha tényleg találnánk egy ilyen berendezést.

#### Kommunikáció idegen civilizációkkal:

Vakoch amerikai pszichológus vetette fel azt a gondolatot, hogy nekünk kellene először üzenetet küldenünk, és nem várnunk egy lehetséges üzenetre. Arra hivatkozik, hogy egy nálunk jóval idősebb és fejlettebb társadalom, amely valamikor régen átesett fejlődésének azon stádiumán, ahol mi most tartunk, viszonylag könnyen megértheti üzenetünket, de fordítva az nem fog sikerülni. Mivel pedig az emberiség csak a közelmúltban lett technikai civilizáció, nagy valószínűséggel minden idegen társadalom, amivel könnyen kapcsolatba léphetünk lényegesen fejlettebb nálunk. Ezért tekinti Vakoch az üzenetküldést az egyetlen olyan stratégiának, amely idővel eljuttathatja az emberiséget a kozmikus párbeszédig (Almár, 1999).

Ahhoz, hogy üzenetet küldeni, vagy üzenetet fogadni képesek legyünk, meg kell vizsgálnunk az ehhez szükséges fizikai feltételeket. Éppen ezt tette Cocconi és Morrison 1959-es cikkében, amelyben közölte az elektromágneses színtéren belül a csillagközi kommunikációra számításba vehető tartományokat. Ezek mindegyike olyan frekvenciatartomány, amelyben a sugárzás torzítás nélkül képes nagy távolságokra eljuttatni az információt. Azt is feltételezték, hogy a vevő a Föld felszínén működik, ezért eleve csak azokat a hullámhossz-tartományokat vették figyelembe, amit a légkör átérteszt.

Ezen a rádióablakon belül a néhány GHz-es, mikrohullámú tartományban kisebb az alapzaj, mivel ebben a frekvenciasávban sem a csillagok fénye, sem a kozmikus háttérsugárzás nem jelentős. Cocconi és Morrison felismerte, hogy ebben a sávban van egy kitüntetett hullámhossz, mégpedig a semleges hidrogén 1420 MHz-es (21 cm-es) vonala, amelyről minden rádiócsillagász tudhat, akármelyik bolygón is született. Ezért a SETI kutatások jelentős része a mai napig az ún. vízáblakon (33. ábra) - mely a hidrogén 1420 MHz-es vonalától a hidroxilgyök 1662 MHz-es vonaláig terjed - belül folyik. Ha szinte csak ezt a hullámhossztartományt figyeljük meg, azzal gyakorlatilag elvárjuk, hogy az idegen civilizáció az üzenetküldés során figyelembe vegye a légkörünk átlátszóságát is.



33. ábra: A „vízáblak”

Ahhoz, hogy észlelni tudjuk az esetleges érkező üzenetet, minél keskenyebb sávokra kell bontani a frekvenciaablakot, mivel jelenlegi tudásunk szerint csak igen korlátozott számú természeti jelenség képes 100 Hz-nél keskenyebb, monokromatikus jeleket létrehozni.

Ilyen jelenségek például a mézerek. A beágyazott fiatal csillagok körül gyakran találni olyan foltokat, amelyek rendkívül fényesek bizonyos rádió hullámhosszakon. Ezek akkor keletkeznek, amikor a csillagszél vagy a sugárzási tér gerjeszti a molekulákat egy sűrű gázt tartalmazó környezetben. Az első ilyen mézereket 1965-ben fedezték fel, a két leggyakrabban észlelt mézer vonal a H<sub>2</sub>O 1,35 cm-es illetve az OH hiperfinom vonala a 18 cm-es hullámhosszon. A mézer fontos jellegzetessége a nagy intenzitás mellett, hogy a vonalszélesség kicsi, és hogy a sugárzás egy keskeny nyalámban érkezik (astro.elte.hu).

Ha a mikrohullámú tartományon kívül mégis ennél keskenyebb jelet találunk, akkor szinte biztos, hogy a jel mesterséges eredetű (lehet földi adó, műhold).

Ennek a módszernek a nagy hátránya, hogy a keskenysávú sugárzás nem engedi sok információ közlését, vagyis csak figyelemfelhívó jelzés felfedezésére alkalmas, kapcsolatfelvételt nem.

A tudatosan küldött figyelemfelhívó jeltől többé-kevésbe elvárható, hogy optimalizált legyen a következő értelemben:

- ne legyen könnyen összetéveszthető bármiféle természetes csillagászati jelenséggel, például pulzárral;
- rövid legyen a periódusideje, ne maradjon észrevétlen azért, mert nem elég sűrűn nézünk oda;
- a jel szerkezet olyan legyen, hogy eleve könnyítse meg a felfedező dolgát, például körpolarizáció alkalmazásával;



- ha a jel információt hordoz, akkor a modulációja ne rontsa a felfedezhetőségét, sőt könnyítse meg azt.

A jel modulációját célszerű, ún. „ kozmikus faktorokkal” végezni. Ezek a faktorok fizikai és matematikai állandók, mivel jelenlegi tudásunk szerint ezek értéke az Univerzumban mindenütt egyenlő. Ilyen faktor lehet például a  $\pi$ , a  $\sqrt{2}$  vagy a  $h$  Planck-állandó. A modulált frekvencia lehet: valamely a világegyetemben mindenütt előforduló kémiai elem egyik színképvonalának frekvenciája, vagy ha egy adott csillagsoporthoz célirányosan küldjük a jelet, akkor a csoporthoz legközelebbi pulzár felvillanási frekvenciája.

A kommunikáció más civilizációkkal nem csak rádióhullámok útján lehetséges, hanem, ahogy ezt 1961-ben Schwartz és Townes kifejtette, lézerek segítségével is. Ebben a cikkben azt a lehetőséget is felvetették, hogy a mikrohullámú és a lézeres technika megszületése más civilizációkban történhetett fordítva is, és akkor az ő SETI kutatásuk az optikai tartományban jött létre. Az optikai kommunikáció azért is előnyös, mert azonos befektetett energia esetén az információtartalom időegységként  $10^5$ - $10^6$ -szor nagyobb lehet, mint rádiókommunikáció esetén. Ezeknek az érveknek az ellenére a mai napig sem folyik optikai SETI kutatás.

### Mi legyen a közös nyelv?

Általában a csillagászzal, fizikával, matematikával és kémiával foglalkozó kutatók vélik úgy, hogy a kommunikációs probléma megoldható. Optimizmusuk alapja az, hogy a fizikai-, csillagászati-, kémiai környezet lényegében azonos, a matematika fogalmai pedig annyira univerzálisak, hogy ezekre akár közös nyelvet is lehet építeni. Ezzel szemben a szociológusok, filozófusok, nyelvészek, antropológusok szinte mind pesszimisták a kommunikáció lehetőségét illetően. Egyik fő érvük, hogy az ember még a földi állatvilág legintelligensebb képviselőivel sem képes igazán társalogni, pedig velük nemcsak a környezet azonos, hanem a biológiai alapok is.

Kommunikációként felvethető az ábrákon keresztül történő, vizuális kapcsolat lehetősége is, amely azonban feltételezi, hogy „ők” is látnak. Ennek a feltételezésnek van bizonyos alapja. A szem az az érzékszerv, amely a földi biológiai fejlődés során több eltérő módon is kialakult, és a látás nyilvánvalóan előnyt jelent a létért való küzdelemben. A képek továbbítása azért is előnyös, mert közvetlen kapcsolatot jelent anélkül, hogy meg kellene tanítani a bemutatott tárgyak vagy alakzatok nevét az idegen civilizációnak. Bonyolultabb, elvont fogalmak közlésére azonban nem alkalmas, ehhez valamiféle általános nyelv kell.

A jelek küldésénél még arra kell figyelni, hogy a jel amennyire csak lehetséges, olyan közel álljon a jelenséghez, amelyre vonatkozik, és minél kevesebb legyen benne a konvenció. Például, ha a számunkra fontossággal bíró kémiai elemekre akarunk utalni az üzenetben, akkor ne az adott elem modelljét, hanem a jellegzetes színképvonalainak megfelelő frekvenciákat építsük be közvetlenül, esetleg egyszerű frekvencia transzformáció után a jelbe.

Az emberiség eddigi üzenetei a képi kommunikációt részesítik előnyben, erre jó példa, hogy 1972-ben a NASA a Sagan házaspár által tervezett rajzos plaketteket helyezte el a Naprendszer elhagyó Pioneer-10 és -11 űrszondákon, mint az emberiség névjegyét. Néhány évvel később az ugyancsak a csillagközi térbe készülő Voyager-1 és -2 fedélzetére már 118 képet és 90 percnyi hanganyagot tartalmazó „önéletrajz” került egy-egy CD formájában. Ezek az üzenetek inkább csak szimbolikus tettek tekinthetők, mivel ezek a szondák százezer éveken belül csillagnak még csak a közelébe sem kerülnek.



van mozdítva a síkból ezzel is érzékeltetve, hogy az üzenet innen származik. Az ábra utolsó része az antenna sematikus rajzát, illetve az antenna átmérőjét mutatja.

Ebben az esetben az üzenet 25000 év múlva megérkezik a gömbhalmaz kb. 300000 csillagához, és ha valamelyik csillag körül lesz még értelmes élet, akkor akár válaszüzenetre is számíthatunk. A következő probléma az, hogy az érkező üzenet is 25000 évig utazik a csillagközi térben, és amire megérkezik nem biztos, hogy lesz még emberiség a Földön, aki felfogja az üzenetet. Tehát az üzenetváltás ideje (ha nem vesszük figyelembe, hogy az üzenetet az idegen civilizációnak meg is kell fejteni, és válaszüzenetet kell megfogalmaznia) kb. 50000 év, ami nagyjából az 5-szöröse az emberi civilizáció kialakulásától napjainkig eltelt időnek.

## **Gondolataim a témában**

Meggyőződésem, hogy az Univerzumban nem mi vagyunk az egyetlen értelmes élőlények, hisz egy ekkora világegyetemet vétek lenne egyetlen fajra "elpocsékolni". Ennek ellenére abban sem kételkedem, hogy a földi élet története során még egyszer sem látogattak meg minket más civilizáció küldöttei. Ugyanis a látogatással kapcsolatban több probléma is felmerül. Először is egy ilyen civilizációnak több ezer évvel fejlettebbnek kell lennie, és képesnek kell lenni a hosszú távú űrutazásra. Ez önmagában még nem zárna ki a kapcsolatteremtést, ám a kommunikáció két jelentősen eltérő fejlettségi szinten álló és teljesen különböző fogalomrendszerrel bíró beszélő esetén gyakorlatilag lehetlenné válik. Ez olyan, mintha egy ősemberrel próbálnánk megértetni, hogy mi a rakéta működési elve. Egy újabb problémát vetne fel a "személyes" találkozás, mivel előfordulhat, hogy véletlenül kiirtjuk egymást. Ez azért következhetne be, mivel valószínűleg az eltérő környezet és evolúció hatására egészen más baktériumok és vírusok alakultak ki és ezek a másik faj számára potenciálisan halálosak lehetnek, mivel az immunrendszer nem képes védekezni ellenük. Ilyen eseményre az emberiség történelemében is találunk példát, amikor a konkvisztádorok gyakorlatilag kiirtották az indiánokat, mert bevitték magukkal a náthát az amerikai kontinensre.

Azt gondolom, hogy a közeljövőben nem leszünk képesek kapcsolatot teremteni más civilizációkkal, mivel technikai fejlettségünk még nem áll elég magas szinten a galaktikus űrutazáshoz, és a SETI program sem a legtokéletesebb módszer erre a feladatra. A SETI legnagyobb problémája szerintem az, hogy az Univerzum méreteihez képest az üzenetet csak maximum a fény sebességével tudjuk továbbítani, és ebből következik, hogy rendkívül hosszú idő telik el, amíg választ kapunk. Ráadásul elég kicsi a valószínűsége, hogy éppen az adott irányba legyen egy civilizáció, amely nemcsak fogni, de megfejteni is képes az üzenetünket. Valójában a SETI program mai formájában sem teljesen alkalmatlan más értelmes lények felkutatására, csak hihetetlenül hosszú ideig kell folytatni a megfigyeléseket, és reménykedni benne, hogy egy másik civilizáció is megpróbált már kapcsolatot teremteni más civilizációkkal. Jelenlegi szintünkön, még ha találnánk is ilyen üzenetet, akkor is képtelenek lennénk kommunikálni az üzenet küldőivel a fénysebesség végeessége és a borzalmasan nagy távolságok miatt. Tehát a mi üzenetünk is valami olyasmi lehetne, mint Kurt Vonnegut Salo nevű robotjának üzenete, melyet több millió évig kellett hordozni, hogy eljutassa egy másik civilizációhoz.

„- Egy árva pont – mondta Salo.

- Tralfmadori nyelven egy pont annyit jelent – mondta a vén Salo -, hogy: *szevasztok!*”

## Irodalomjegyzék

### Nyomtatott:

- Almár Iván: A SETI szépsége (Kutatás Földön kívüli civilizációk után), Vince Kiadó 1999  
Almár Iván: Élet az Univerzumban: szabály vagy kivétel, Mindentudás Egyeteme, 2004  
Ashpole, Edward: A Földön kívüli értelem kutatása, Akadémiai Kiadó 1992  
Ábrahám Péter–Kóspál Ágnes: 2004, Korongok fiatal csillagok körül, Meteor csillagászati évkönyv 2005, 219. o.  
Balázs Béla–Érdi Bálint–Marik Miklós–Szécsényi-Nagy Gábor–Vizi Zsuzsanna: Bevezetés a csillagászatba, ELTE jegyzet, Nemzeti Tankönyvkiadó 1996  
Brahic, André: A Nap gyermekei (Eredetünk története), Typotex Kiadó 2001  
Budó Ágoston: Kísérleti fizika I, Nemzeti Tankönyvkiadó 1992  
Comins, Neil F.: Mi lenne a Földön, ha ... ?, Panem-Grafo, 1994  
Cserepes László–Petrovay Kristóf: Kozmikus fizika, ELTE jegyzet, 2002  
Davies, Paul: Egyedül vagyunk a Világegyetemben? , Vince Kiadó 2001  
Dorschner, Johann: Van-e élet a Földön kívül? , Gondolat 1975  
Herrmann, J.: SH-Atlasz, Csillagászat, Athenaeum 2000 Kiadó 2002  
Kereszturi Ákos–Simon Tamás: 2004, Asztrobiológia, Meteor csillagászati évkönyv 2005, 190. o.  
Koestler, Arthur: Alvajárók, Európa, 2007 (eredeti, első kiadás 1959)  
Kun Mária: 1999, Naptípusú csillagok keletkezése, Fizikai Szemle, 1999/12 434. o.  
Lineweaver, C. H.: 2001, Cosmological Constraints on Terrestrial Planet Formation, Proc. 'Frontiers of Life' conference held in Blois, France, June, 2000, ed. L.M.Celnikier, [astro-ph/0103142]  
Mészáros Ernő: A Föld rövid története, Vince Kiadó 2001  
Molaverdikhani, Karan – Tabeshian, Maryam: 2009, Mapping the Probability of Microlensing Detection of Extrasolar Planets, [arXiv:0911.4424]  
Nemecz Ernő: A Föld eredete, Fizikai Szemle, 2007/1 6. o.  
Rees, Martin (szerk.): Univerzum - A Világegyetem képes enciklopédiája, Euromedia Group Hungary, IKAR 2006  
Sagan, Carl: Az Éden sárkányai (Tűnődések az emberi intelligencia evolúciójáról), Európa 1990  
Sagan, Carl: Cosmos, Random House, New York 1980  
Sklovszkij, J. Sz.: Világegyetem, élet, értelem, Gondolat 1976  
Szatmáry Károly: 2006, Exobolygók, Magyar Tudomány, 2006. augusztus, 968-979. o.  
Szatmáry Károly: 2007, Bolygók mindenütt, Fizikai Szemle 57. No.12. 433-435. o.

### Internet:

- <http://astro.u-szeged.hu>  
<http://www.fizikaiszemle.hu>  
<http://www.hirek.csillagaszat.hu>  
<http://www.mindentudas.hu>  
<http://www.matud.iif.hu>  
<http://astro.elte.hu>  
<http://www.solarviews.com/cap/vss/VSS00105.htm> (Calvin Hamilton)  
<http://cimkezes.origo.hu/cimkek/asztrobiologia-kurzus/index.html?tag=asztrobiologia+kurzus>

## Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Szatmáry Károlynak a rengeteg segítségért és türelemért, melyet a dolgozat elkészítése során kaptam tőle.



## NYILATKOZAT

Alulírott **Nagy Andrea** BSc szakos hallgató (ETR azonosító: NAAPADT.SZE) „**Az élet kialakulásának kozmikus feltételei**” című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, 2010. május 13.

.....

*a hallgató aláírása*