UPPSALA UNIVERSITET

Astrobiologi

Mer än science fiction?

Nils Mauritz Andreas Eriksson

Independent Project in Biology
Självständigt arbete i biologi, 15 hp, vårterminen 2011
Institutionen för biologisk grundutbildning, Uppsala universitet

Sammandrag

Forskning på senare år kring astrobiologi har gett flera intressanta hypoteser och resultat kring livet uppkomst och möjlighet att klara tuffa förhållanden. Målet sedan länge är att finna liv på andra himlakroppar men hittills finns inga direkta bevis på att liv finns eller existerat någon annanstans i solsystemet eller i Vintergatan än på Jorden. Däremot har flera indirekta bevis lagts fram, bland annat Marslandarna ur Vikingprogrammet som gav positiva utslag då radioaktiv märkt näring tillsattes till ett prov av Marsytan och radioaktivt koldioxid, kolmonoxid och metan strömmade ut från provet. Lika så visade mätningar av Venuslandare att det finns ickesfäriska partiklar i bakteriers storlek högt upp i Venus atmosfär. Även mätningar av Jupiters måne Europa visar på att det finns ett hav under ytan av is, dock är detta inget bevis för att liv finns där. För att utröna om liv existerar på andra håll i solsystemet kommer flera sonder att sändas ut de kommande åren, främst till Mars.
Liv på jorden använder kol som byggsten för makromolekyler till biologiska system. Dock har flera andra byggstenar förslagits. Kisel och kol påvisar flera likartade kemiska egenskaper, bland annat kan de binda till fyra andra atomer. Det har påvisats att om kisel ska fungera som ett substitut till kol måste förhållandena vara helt andra än de man känner till från jorden. Exempelvis måste temperaturen vara långt under 0ºC samt att atmosfären ska vara syrebefriad.
Är vi ensamma i solsystemet eller till och med i Vintergatan är en bra fråga som förmodligen inte kommer att besvaras på många år. Vi har undersökt Vintergatan i flera årtionden och inte upptäckt något signifikant bevis på att vi inte är ensamma. Forskningen och utforskningen fortsätter och inom tio år kommer vi förmodligen vara mitt uppe i en ny rymdkapplöpning mellan nya stormakter.

Inledning

Astrobiologi är ett tvärvetenskapligt forskningsfält där biologi, geologi, kemi och fysik smälter samman till ett. Länge togs astrobiologi inte på fullt allvar då många ansåg att astrobiologi var en förlängning av science fiction. Idag har NASA ett helt institut som bedriver astrobiologisk forskning, även flera universitet i USA erbjuder hela program med inriktning inom astrobiolgi.

Det har länge spekulerats i att liv ska kunna existera på andra håll i solsystemet. Dock har snart 60 år av utforskning varken kunna avfärda eller ge bekräftelse på om liv existerar på andra håll än på jorden. Kan extremofiler från jorden klara av förhållandet i rymden eller andra planeter?

Andra saker det har spekulerats om är hur hypotetiskt liv kan se ut, är det baserat på kolatomer eller kanske kiselatomer? Är vatten nödvändigt för liv eller duger andra lösningsmedel lika bra?

Detta är frågor som jag ska försöka ge svar på.

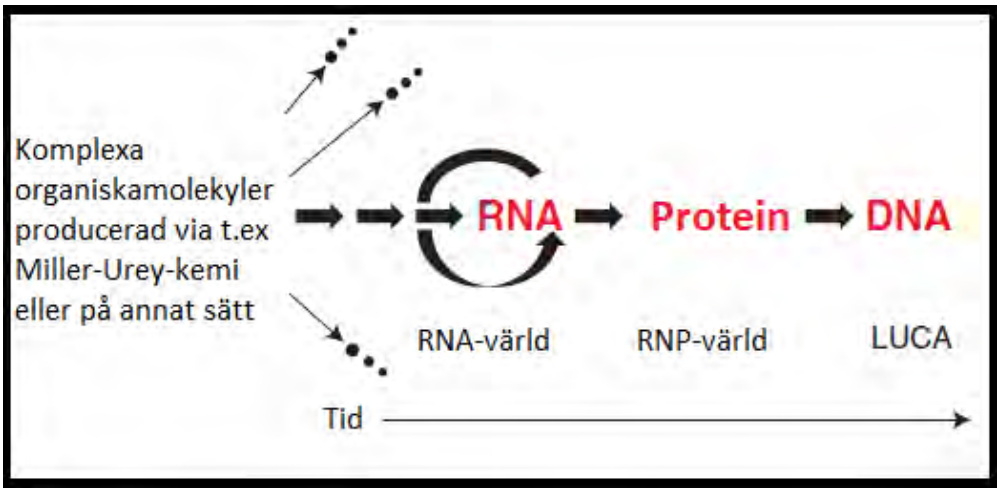
Liv

För att kunna beskriva liv måste liv definieras. Det finns ingen accepterad definition på vad liv är men det finns flera punkter som går igen bland flera forskare (Chyba & Phillips 2011, Irwin & Schulze-Makuch 2001).

1) Ska kunna replikera sig själv och föra sin genetiska information vidare till sin avkomma.
2) Ha en biokemisk metabolism.
3) Kunna genomgå Darwinistisk evolution och därmed anpassa sig till nya förhållanden.

Hur livet uppstod på jorden är fortfarande högst spekulativt. Vad vi vet är att de tre olika domänerna, arkéer, bakterier och eukaryoter har ett och samma ursprung kallat LUCA – ”Last Universal Common Ancestor” (figur 1). Vad som fanns innan dess är okänt. Det finns flera teorier men frågan är i grund och botten vad som var först av DNA eller RNA (Cech 2011,). Vad gäller DNA eller RNA och vilket system som var först är det svårt att säga exakt vad som var först. Miller-Urey-experiment där en kolv med gaser (CH_4, NH_3, H_2O och H_2) som antogs motsvara den tidiga jordens atmosfär där urladdningar av elektricitet (simulerar blixtnedslag) resulterade i bildandet av flera organiska molekyler och aminosyror (Miller 1953). Detta visar på att jorden i dess tidiga utveckling kunnat producera aminosyror och andra organiska molekyler nödvändiga för liv. Dock är det svårt att utröna vad som händer därefter.
Enligt Cech (2011) så finns det både experimentella och logiska skäl till att RNA var först och DNA uppkom senare (figur 1). Dock måste någon form av inkapsling i form av en protocell eller dylikt ha ägt rum tidigt och förmodligen redan innan självreplikerande RNA uppstått.

1: RNA är både en informationsbärare och en biokatalysator.
2: RNA har de kemiska förutsättningarna för att replikera sig själv.
3: DNA behöver hjälp av både RNA (i form av primers) och protein för att kunna replikera sig själv. Det vill säga att RNA måste redan har funnits på plats för att DNA ska kunna ha replikerat sig själv.
4: Alla idag levande organismer använder sig av ribosomer för att kunna syntetisera protein via RNA som katalysator och detta system måste ha funnits redan hos LUCA
5: Flera olika enzymer som används vid syntetiseringen av ribonukleotider som ett försteg till RNA används också vid syntetiseringen av DNA plus ytterligare två enzymer.
6: RNA som är enkelsträngat kan lätt bilda en dubbelsträng via basparning.



Figur 1: Enligt Cech (2011) så uppstod flera självreplikerande system men som inte fungerade (pilar till cirklar) och försvann. De tre pilarna innan RNA är tidiga system som utvecklats till ett självreplikerande RNA-system som i sin tur kunde skapa protein och lägga grunden för DNA och slutliggen LUCA. Bilden är modifierad från Cech (2011).

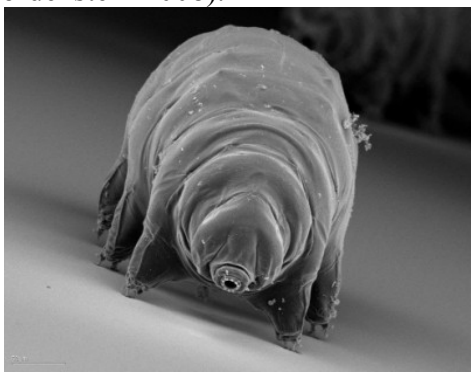
Vad gäller aminosyror och liv i meteoriter har man idag god kännedom om hur motståndskraftigt liv är (Horneck *et al.* 2001, Wharton 2002, Wharton 2004) och att rymden är full av aminosyror. Hittills har 89 aminosyror hittats (Meierhenrich 2008). Experiment med bakterier (t.ex. *Bacteria subtilis*) har visat att i sporstadiet kan mikroorganismer överleva i rymden. Så länge de inte utsätts för fullt elektromagnetiskt spektrum (Horneck *et al*. 2001). Columbiaolyckan 2003 visade att mikroorganismer kan överleva ett fall från flera tusen meters höjd så länge de är väl inkapslade. Detta är grundpelaren inom transpermi-hypotesen, att liv i stenar som slungats ut från en planet efter ett astroidnedslag kan färdas igenom rymden och sedan kolonisera en ny planet där liv sedan kan spridas (Mileikowsky *et al*. 2000). Vad vi känner till om mikroorganismer från jorden är att de kan de klara av den acceleration som krävs för att slunga en sten ut från en planets gravitationskraft, kunna överleva i rymden så länge de är väl skyddade från miljön i rymden samt kunna klara av färden genom atmosfären. Det samma gäller för aminosyror som också kan klara en färd igenom jordens atmosfär i mikrometeoriter (Bertrand *et al*. 2009). Förmodligen har alla 20 aminosyror som är essentiella för liv på jorden funnits här sedan jorden bildades för mer än fyra miljarder år sedan (Meierhenrich 2008). Om inte annat har de bildats via Miller-Urey-reaktioner i atmosfären eller på havets botten via ”black smokers”.

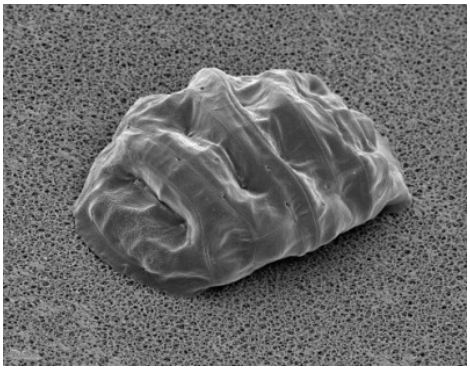
Extremofiler och astrobiologi

Extremofiler, organismer som kan överleva i extrema förhållanden sett till människans krav på sin omgivning, har länge använts inom astrobiologi för olika studier av hur organismer påverkas av förhållanden i rymden och deras möjlighet att anpassa sig till dessa. De flesta av dessa experiment har gått ut på att se hur organismerna påverkas av mikro-gravitation, fullt elektromagnetiskt spektrum, snabba temperaturändringar med mera (Kuzicheva & Gontareva 2003, Szewczk *et al*. 2005, Sancho *et al*. 2007, Rebecchi *et al*. 2009, Rebecchi *et al*. 2009, Moeller *et al*. 2010, Gagyi-Palffy & Stoian 2011). Extremofiler kan delas in i två grupper enligt Wharton (2002) och Wharton (2004) – de som kan fortplanta sig i en extrem miljö

(anpassning) och de som går in i kryptobios för att överleva (resistens) i en mer extrem miljö än de vanligtvis lever i eller utsätts för.

Extremofiler är nästan uteslutande små encelliga organismer från arke- och bakterie-domänerna. Dock finns det några få eukaryoter bland extremofilerna, mest känd är björndjuren (*Tardigrada*), som kan överleva i allt från regnskog till Antarktis, från bergstoppar till havets djup. Dock kräver björndjur vatten runt sig för att överleva. Utan vatten så övergår de i kryptobios för att helt enkelt vänta på bättre förhållande (Bordenstein 2008). Det är utan vatten som björndjur kan gå in i kryptobiosis. Genom att krypa ihop till en boll kallad ”tun” (figur 2) och därmed sänka sin metabolism till bara 0.01% av det normala och mängden vatten i björndjuren sänks till 1 % av det normala (Gagyi-Palffy & Stoian 2011). När ett björndjur är i tun så veckas huden och täcks av en vaxyta som minskar vattenförlusten ytterligare. Väl i tun så kan björndjur stå emot det mesta. Allt från -200ºC till 151ºC, att frysas och tinas, brist på både syre och vatten, ändringar i salinitet, röntgenstrålning flera 1000 gånger av vad som motsvarar en dödlig dos för en människa och kokas i alkohol (Bordenstein 2008).

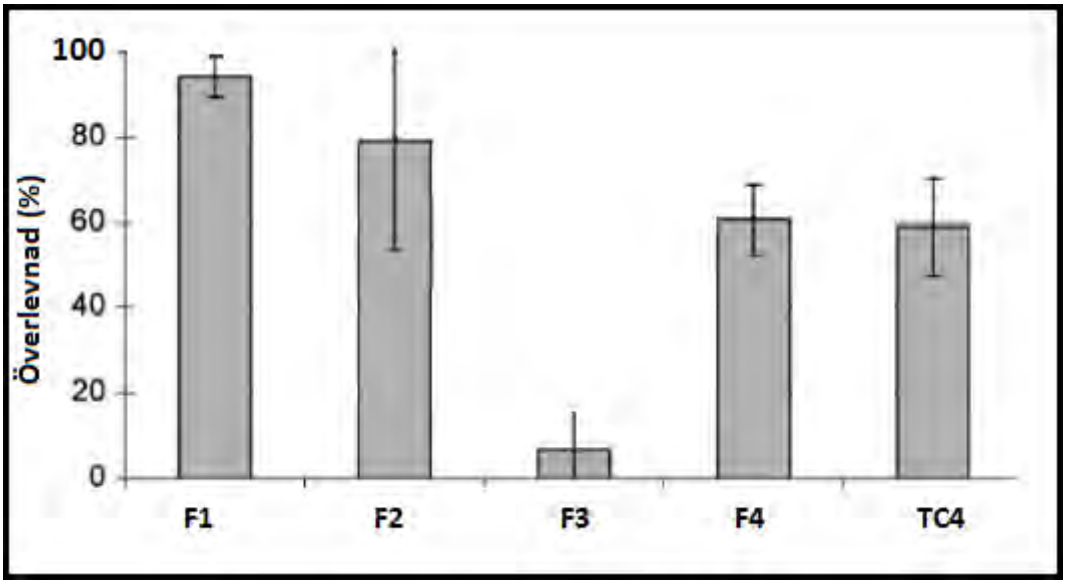




Figur 2. Vänstra bilden: ett björndjur. Högra bilden: ett björndjur i tun.
Bilderna är hämtade från http://knol.google.com/k/tardigrades#

Björndjurs förmåga att stå emot extrema förhållanden har gjort dessa djur till modellorganismer i astrobiologisk forskning om hur extremofiler överlever i rymden.

Ett experiment, kallat TARSE-projektet (The Tardigrade Resistance to Space Effects Project) som var en del av LIFE uppdarget (Life Investigation with Foton Experiments) gick ut på att testa hur väl björndjur kan stå emot förhållanden i rymden (i rymdkapsel) (Rebecchi *et al*. 2009). I experimentet ingick fyra testgrupper: uttorkade (tun) bland papper eller löv eller aktiva antingen svältande eller välnärda och se hur dessas parametrar påverkar överlevnadsgraden, skador på DNA, genuttryck av Hsp70 och 90 (Hsp = Heat Shock Protein), mängd antioxidanter och jämföra detta mot en kontrollgrupp på ett laboratorium på jorden. Resultatet av denna undersökning var att överlevnaden var som lägst bland aktiva och välnärda organismer medan de som varit uttorkade bland löv hade högst överlevnad (figur 3).



Figur 3: Överlevnadsgrad (%) från TARSE-projektet. F1 = uttorkade bland löv, F2 = uttorkade bland papper, F3 = Aktiva, välnärda och bland löv F4 = aktiva, svältande och bland papper, TC4 = kontrollgrupp på jorden och samma förhållanden som bland F4. Linjerna på staplarna är standardavvikelser. Grafen är modifierad från Rebecchi *et al*. (2009).

Enligt artikelförfattarna så beror detta på att organismerna i F3 levde bland löv och under experimentets gång så kan förmultningen av löven ha resulterat i sämre livsförhållanden för björndjur. Dock ska nämnas att temperaturen för F3 var avsevärt högre än för de andra grupperna, upp till 26ºC. Detta styrks av att syresättningen bland de överlevande björndjuren var mycket lägre än de andra gruppernas överlevare (Rebecchi *et al*. 2009). Vad gäller genutrycket av Hsp70 och 90 var det ingen signifikant skillnad mellan F4 och TC4. Inte heller uppvisades några skador på DNA från de björndjur som varit i rymden jämfört med kontrollgruppen på jorden. Utöver den låga överlevnadsgraden hos F3 så var resultatet väntat enligt artikelförfattarna.

Andra organismer kan också överleva i rymden eller rent av resan genom jordens atmosfär. Efter olyckan med rymdfärjan Columbia (STS 107) fick forskarna upp ögonen för att organismer kan överleva fall från 42-32 km höjd samt en kraftig explosion. I detta fall så hade Columbia med sig flera experiment, bland dessa fanns ett experiment med nematoder, *Caenorhabditis elegans*. Ursprungligen handlade experimentet om att testa ett nytt tillväxtmedium för nematoder (CeMM, *C. elegans* Maintenance Medium) där enbart *C. elegans* kan överleva och risken för kontaminering av andra organismer är minimal. Dock fick experimentet en oväntad vändning när Columbia förolyckades på vägen genom atmosfären över Texas. Aluminiumtuberna som förvarade experimentet hittades av NASAs bärgningsmanskap (Szeeczyk *et al*. 2005). Forskarna antog att deras experiment förstörts då Columbia förolyckades men det visade sig att tuberna var helt oskadda och att mediumplattorna kryllade med *C. elegans* som fortfarande levde. Dels visade det sig att CeMM fungerade som det skulle men också att organismer kan klara överleva en färd genom atmosfären och sedan nedslaget (inkapslade i tuber). Dock skulle nematoderna inte ha kunnat ta sig ut ur tuberna och därmed svultit ihjäl när näringsmediumet tagit slut. Columbias förlisning visar att organismer kan överleva en färd genom atmosfären så länge organismerna i fråga är väl skyddade.

Extremofilers livsmiljö jorden och förhållanden på andra himlakroppar

Efter mer än ett halvsekel sedan uppskjutningen av Sputniksatelliten 1957 har vår kunskap om solsystemet och hur väl diversifierat det egentligen är, vuxit för var dag som gått. Solsystemet utforskades bit för bit under det kalla kriget med sonder och landare vilket har fortsatt till våra dagar och det finns i dag flera projekt för framtida sonder och landare, bland annat ExoMars (ESA-NASA 2011) och Mars Science Laboratory (NASA 2011a). Målet med bägge av dessa två program är att utröna om liv existerar/existerat på Mars samt geologiska undersökningar av planeten de kommande åren.

Frågan kring hur extremofiler vi känner till från jorden och hur dessa skulle kunna klara sig på andra himlakroppar och under en resa från jorden har vi inget svar på. Inom de kommande åren kommer en rysk-kinesisk sond kallad Phobos-Grunt att skickas till Mars måne Phobos. Med sig kommer denna sond att ha med flera olika arter av extremofiler på en tur och retur resa till Phobos för att utröna hur extremofiler påverkas av år i rymden (ESA 2004).

Venus

Venus är den näst innersta planeten och liknar jorden i många avseenden. De största skillnaderna mellan jorden och Venus är att Venus är extremt mycket varmare, har högre atmosfärstryck och helt annan atmosfärssammansättning än jorden (tabell 1). Enligt Schulze-Makuch & Irwin (2006) så kan liv kanske existera på Venus, då i atmosfären. Då ytan har en uppmätt medeltemperatur på 465ºC och medelatmosfärstrycket är på 92 bar så kan liv inte existera på ytan enligt vad vi känner till från förhållandena på jorden. Dock har Venus en gång i tiden varit en blöt planet (Donahue *et al*. 1982) men en växthuseffekt som löpt amok har resulterat i att Venus atmosfär enbart innehåller ca 20ppm $H_2O(g)$ i atmosfären idag (Williams 2010a). Skulle övergången från ett blött Venus till hur Venus är idag gått långsamt skulle eventuellt liv ha möjlighet att anpassa sig till ett liv högt uppe i atmosfären, där trycket är på cirka en bar och temperaturen runt 0-50ºC samt pH på ca 0 och skulle ett hypotetiskt liv uppstått i ett urhav så finns det vattenånga i atmosfären liv skulle kunna använda (Schulze-Makuch & Irwin 2006).

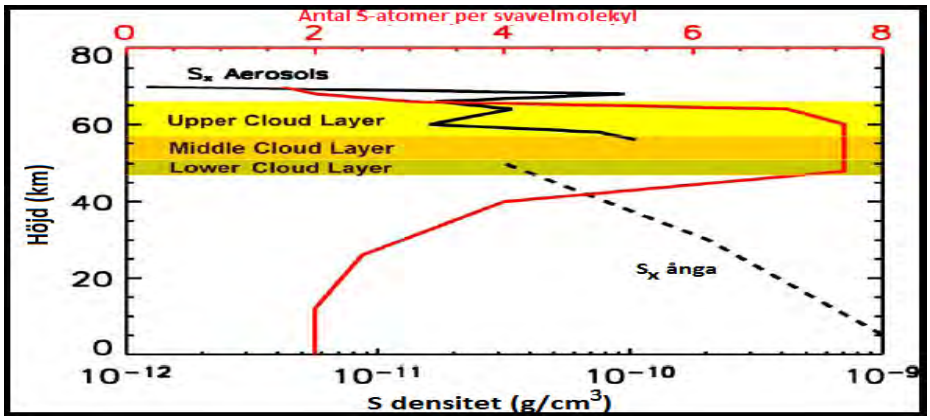
Argumenten för att liv ska kunna existera i atmosfären är enligt Schulze-Makuch & Irwin (2002):

> Venus täcks av ett kontinuerligt molntäcke samt att atmosfären är i kemisk obalans där H_2, O_2, H_2S och SO_2 finns i atmosfären utan att reagera med varandra.
>
> I atmosfären (~50km ovan genomsnittsradien av Venus) har ett innehåll av partiklar i storleksordningen av bakterier påträffats, dock är det okänt vad dessa partiklar består av, dessa är ickesfäriska men vad det är för något vet man ännu inte.
>
> Relativt lugna förhållanden på 50 km höjd ovan ytan.
>
> Karbonylsulfid (COS) finns i atmosfären vilket på jorden indikerar biologisk aktivitet.
>
> Atmosfären innehåller mindre Kolmonoxid (CO) än beräkningar antyder.
>
> Vatten finns i gasform i atmosfären tillsammans med kol, fosfor, syre, svavel mm.

Tabell 1: Jämförelse av radie, yttemperatur, yttryck, primär atmosfärsammansättning och avstånd till solen för Venus, Jorden, Mars, Europa och Titan (William 2010a, William 2010b, William 2010c, William 2010d), William 2010e).

Himlakropp	Radie (km)	Yttemperatur (ºC)	Yttryck (bar)	Atmosfärsammansättning	Avstånd till solen (au)
Venus	6051,8	465	50	95,5% CO_2; 3,5% N_2	0,723
Jorden	6378,1	16	1	78% N_2; 21% O_2	1
Mars	3396,2	-62	0,06	95,3% CO_2; 2,7% N_2	1,523
Europa	1569	-170	0.0001	Ingen källa	5,2
Titan	2575	-180	ingen data	95% N_2; 3,5% CH_4	9,5

Ett annat problem som ett hypotetiskt liv i Venus atmosfär måste klara av är ultraviolett (UV) ljus. Här på jorden så skyddar ozon (O_3) organismer mot UV-ljusets skadliga effekt på celler. Ozon finns inte i Venus atmosfär, vilket betyder att liv på Venus måste kunna stå emot UV-ljuset på ett annat sätt. Ett hypotetiskt sätt att kunna stå emot UV-ljusets skadliga effekt kan vara cyklookta-sulfat (S_8 – åtta svavelatomer i en cirkel). S_8 kan skydda liv genom att bilda ett skyddande hölje runt hypotetiska mikroorganismer och skydda dessa mot UV-strålningens skadliga effekt på celler (Toon *et al*. 1982). Modellberäkningar med data från de sovjetiska Venuslandarna Venera 11 och 12 visar att den förväntade fördelningen av olika typer av svavelmolekyler sett till höjd ovan Venus yta (Figur 3) (Schulze-Makuch *et al*. 2004, Toon *et al*. 1982). S_8 är den dominerande typen av svavelmolekyler och påträffas främst på 50 km höjd ovan ytan av Venus helt enkelt för att S_8 är den stabilaste typen vid denna höjd Implikationerna av detta är att mycket av UV-ljuset absorberas redan vid ca 65 km höjd över Venus yta (Figur 4) vilket ger möjlighet för liv att anpassa sig till förhållanden runt 50 km ovan ytan.

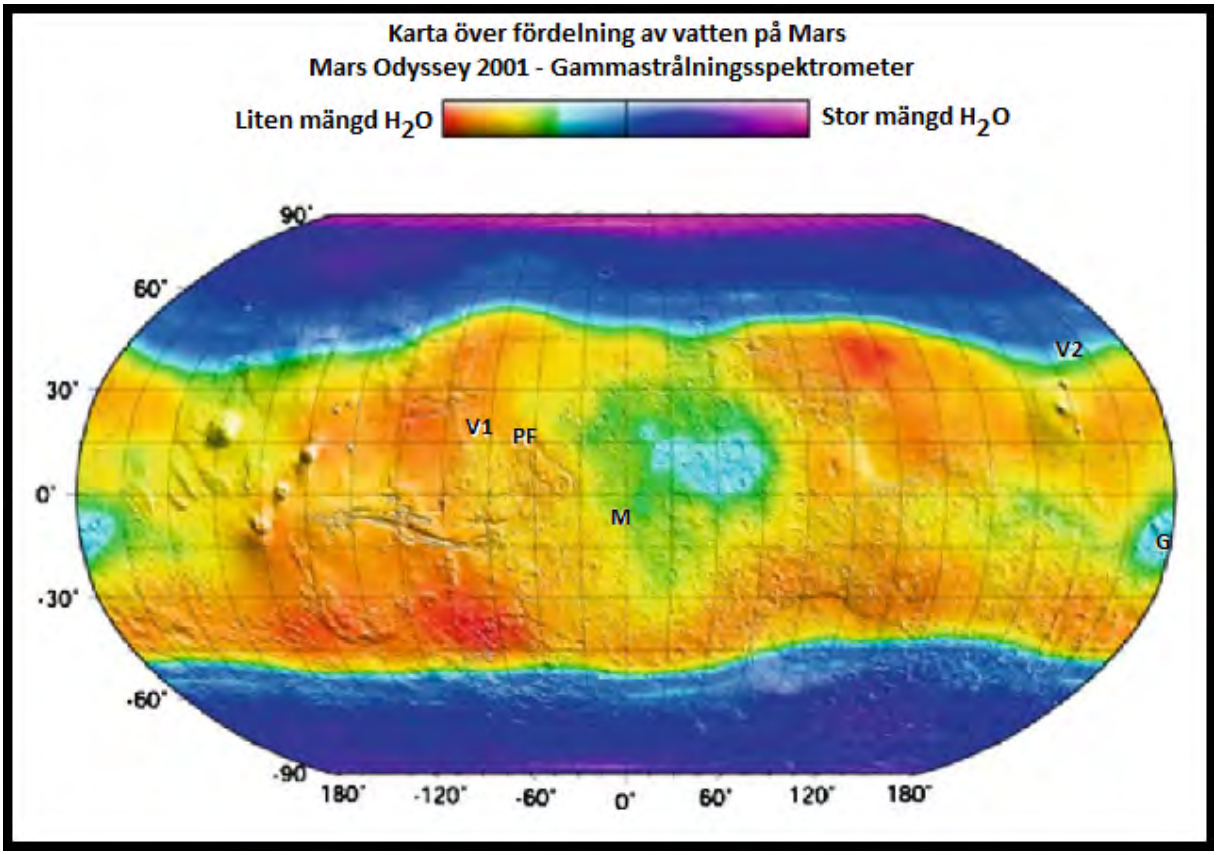


Figur 4: Den förväntade fördelningen av olika typer av svavel i Venus atmosfär. Den heldragna svarta linjen är densiteten av svavel (S_1-S_2) i gasform i den övre delen av atmosfären medan den streckade linjen är densiteten av svavel (S_1-S_2) i gasform i den nedre delen av atmosfären. Den heldragna röda linjen är fördelningen av olika typer av svavelmolekyler i Venus atmosfär sett till storlek. Vid 50 km höjd dominerar S_8 molekyler medan vid ytan dominerar S_2 molekyler. Bilden är modifierad från Schulze-Makuch *et al*. (2004) som i sin tur använder data från Toon *et al*. (1982).

Mars

Mars är den fjärde planeten från solen efter Merkurius, Venus och jorden. Just denna planet har fått mycket uppmärksamhet vad gäller utforskningen av solsystemet. Flera landare och satelliter har undersökt planeten under årens gång. Mest känt är Vikingprogrammet, där två landare landade på ytan under 1970-talet för att söka efter liv och genomföra undersökningar av ytan samt väderförhållanden (Ballesteros 2010). I dagsläget finns tre satelliter och en rover i funktion på ytan av Mars och i omloppsbana. Rovern Opportunity som nu är inne på sitt 8e år utforskar ytan av Mars. Satelliterna: Mars Odessey (NASA 2010), Mars Express (ESA 2010), Mars reconnaissance orbiter (NASA 2011b) och rovern MER-B Opportunity (NASA 2011c) är de farkoster som idag undersöker Mars. Flera framtida uppdrag är planerade, bland annat Mars Science Laboratory (NASA 2011a) och EXO-Mars (ESA-NASA 2011).

Under dessa årtionden av utforskning av Mars har det främsta resultatet varit att det nu är fastslaget att vatten en gång täckt större delen av Mars yta men i dagsläget endast finns i form av två typer av permafrost (Mitrofanov *et al*. 2007) (figur 5). Ett indirekt bevis på att vatten en gång har förekommit på ytan av Mars är fynd av hematit, jarosit och järnsulfat. Dessa mineraler bildas då atmosfären är fylld med koldioxid och sulfatdioxid tillsammans med stora volymer av vatten rikt på järn (Fairen *et al*. 2004, Elwood-Madden *et al*. 2004).



Figur 5: Karta över Mars som visar på fördelning av väte (H) i det övre marklagret med data från Mars Odyssey enligt Mitrofanov *et al*. (2007). Kartan är skapad med avseende på H med en gammastrålningsspektrometer. Detta ses som ett indirekt bevis på vatten och om H är bundet som vatten kan regionerna som är blå/lila-färgade innehålla upp till 50% vatten medan orange och röd-färgade områden saknar innehåll avH. Vätet kan också vara bundet till mineraler. V1 = Första Vikinglandaren, V2 = andra Vikinglandare, PF = Path Finder, G = Spirit vid Gusevkratern och M = Opportunity vid Meridianikratern. Bilden är modifierad från Benilan & Cottin (2007).

Andra mer direkta bevis är från Pheonixlandaren (Kerr 2010) som visar att vatten har flutit vid nordpolen av Mars på senare tid. Pheonixlandaren upptäckte perklorater (ClO_4^-), denna molekyl kan lätt oxidera biomolekyler och degenerera dessa till CO_2, CO och CH_4 . Om perklorater blandats med vatten sänks fryspunkten avsevärt och vatten kan hållas flytande långt under 0ºC. Trots att den uppmätta temperaturen kring Pheonixlandaren aldrig översteg -28ºC så uppträdde vattnet i flytande form. Kerr's (2010) slutsats var att liv möjligen kan finnas djupt under ytan vid polerna där vatten kan existera i flytande form under vår och sommar på Mars. Dock ska nämnas att temperaturen kan nå upp till 0ºC vid ekvatorn.

Vatten må ha hittats på Mars men vad gäller att finna liv på Mars är det lika spekulativt som innan. Vikinglandarna är de enda landarna som genomför riktiga experiment för att försöka finna liv på Mars. Vikinglandarna utförde tre experiment för att finna tecken på liv (Benilan & Cottin 2007):

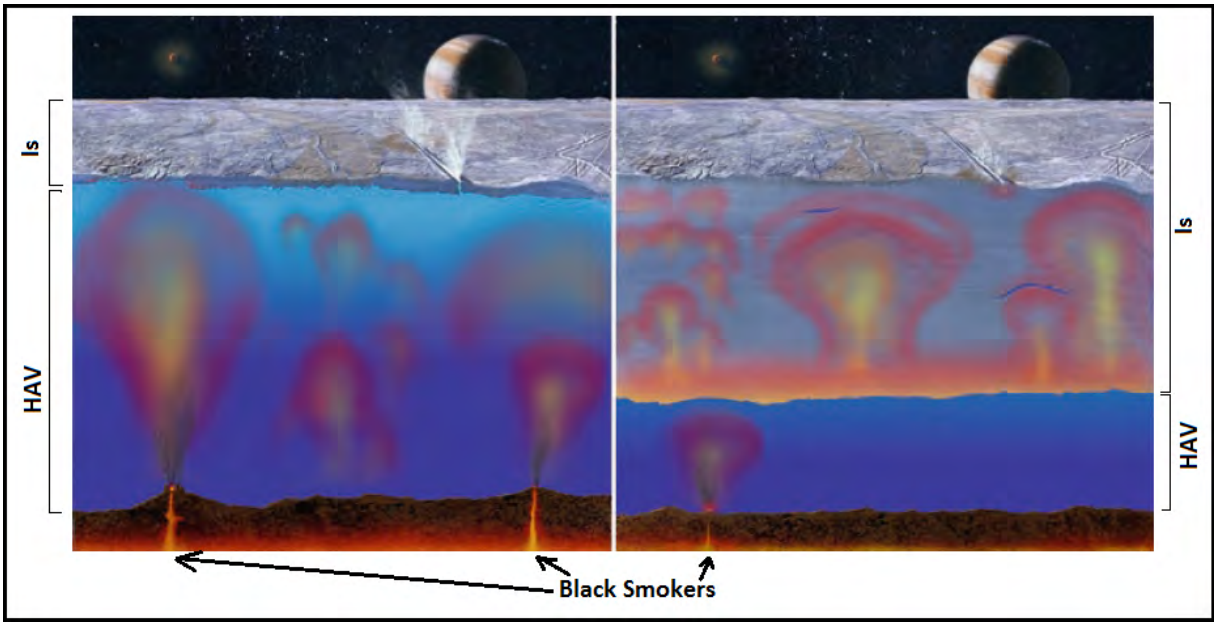
> Pyrolytisktutsläpp: Gick ut på att testa assimileringen av CO_2 via fotosyntetiska mekanismer i mörker och därmed testa om ett prov av markytan kunde ta upp CO_2 via fototrofa processer. Detta gav varken utslag på steriliserat markprov eller icke steriliserad markprov.
>
> Gasutbyte: Analys av gaser som släpps ut från prov av Marsytan efter att en näringslösning tillsats. Resultatet av gasutbytet var att syre förbrukades och små mängder N_2 och CO_2 lämnade markprovet. Detta skedde även i sterila prov, i mörker och tillsattes mer näring så ökade inte utgasningen av CO_2 och N_2. Förklaringen till detta är mest troligt att det var oxider i provet som reagerar med näringslösningen och producerade CO_2 och N_2.
>
> Gasutsläpp: Detta experiment liknade experimentet med gasutbytet. Dock var näringslösningen bestående av kol-14 istället för kol-12. Denna gång så uppmättes en utgasning av radioaktivt CO_2 från provet, medan det steriliserade provet som hettats upp till flera 100ºC inte släppte ut något alls. Detta positiva resultat uppmättes från bägge Vikinglandarna vilket ger ett indirekt bevis på biologisk aktivitet och liv. Dock kan detta även bero på väteperoxid som kan oxidera näringsämnena till CO_2 (Huguenin *et al*. 1979) men ytterligare utforskning och nya landare behövs för att ge det slutliga beviset på liv.

Överlag kan man säga att Vikingprogrammet varken bevisade eller motbevisade hypotesen kring liv på Mars. Det blir upp till framtida utforskningar av Mars att ge en solid förklaring till Vikinglandarnas resultat.

Europa

Europa är en av de Galileiska månarna som kretsar kring Jupiter. Europa har aldrig varit besökt av någon landare men däremot har flera satelliter passerat och dokumenterat månen vars yta är täckt av ett tjockt lager is av vatten och koldioxid, >30 km tjockt (Ojakangas *et al*. 1989, Anderson *et al*. 1997).

Europa har ett magnetfält som indirekt visar att månen har ett flytande hav bestående av saltvatten (Kivelson *et al*. 2000), vilket redan på föreslagits 1970-talet som en möjlighet för att kunna förklara magnetfältet (Lewis 1971, Anderson *et al*. 1997) och teoretiskt sett skulle detta salthav kunna hysa liv (Bains 2004, Ballesteros 2010).
Ett mer direkt bevis för att Europa har ett flytande hav under isytan är de otaliga sprickorna som löper längs med hela ytan (Hoppa *et al*. 1999), där energi från havets botten värmer upp havet och isen och får den att smälta (figur 6 och 7).
För att liv ska kunna existera måste energi tillföras till och från systemet. Energi kan tillföras till systemet via så kallade ”black smokers” eller vulkaner på havets botten, som här på jorden är kända för att upprätthålla hela ekosystem på havets botten (Chymba & Phillips 2001) och lämna systemet via gejsrar på ytan (Ballesteros 2010) vilket observerats från Gallileossonden. Dock visar beräkningar på att havet är väldigt basiskt, ungefär runt pH 11. Ett hypotetiskt liv i havet under Europas is måste kunna stå emot denna miljö och detta kan ses som en möjlighet då extremofiler kända från jorden kan överleva i miljöer med pH mellan 0 och 10 (Bains 2004).



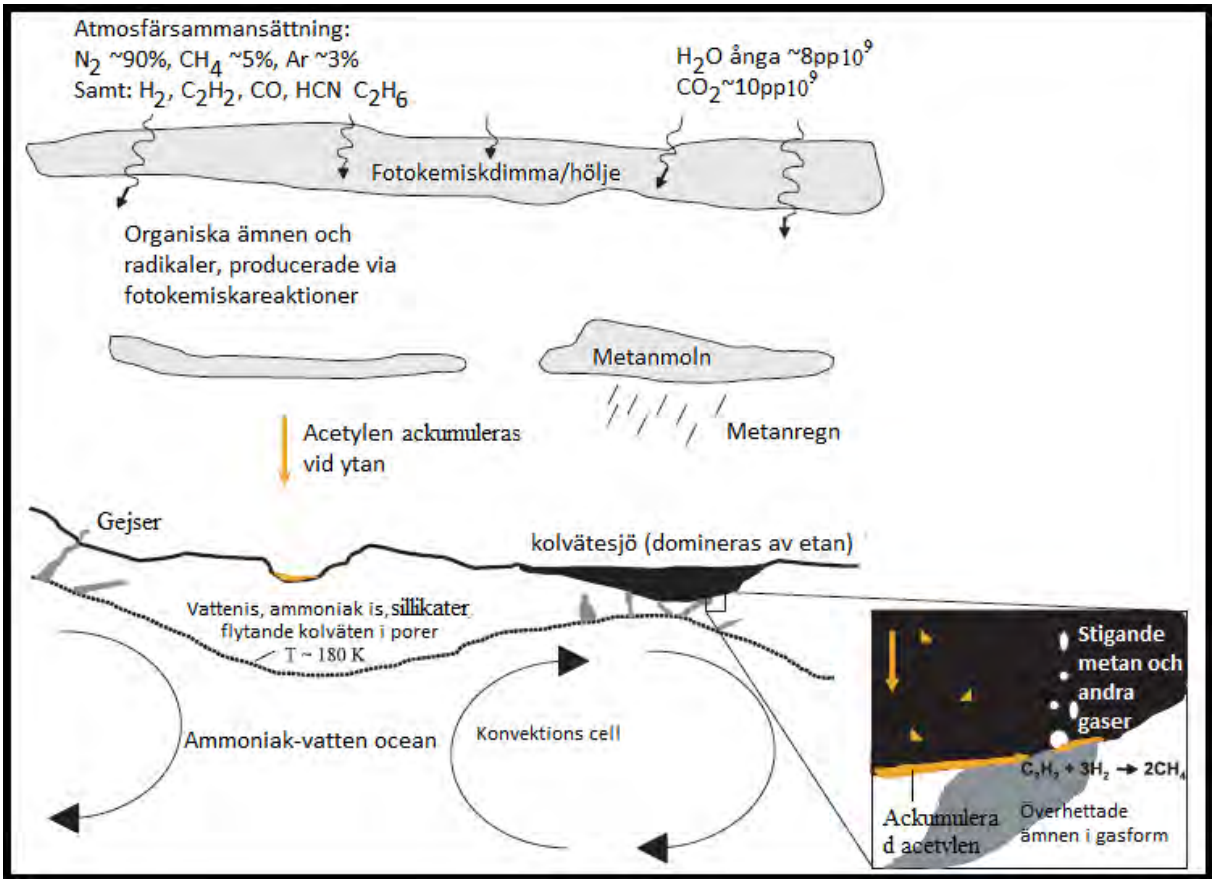
Figur 7: Energi från ”black smokers” eller undervattensvulkaner på havets botten får isen att smälta vilket ger upphov till gejsrar på ytan som mer eller mindre direkt fryser till is vilket ger ytan dess struktur. Det finns två uppfattningar om detta. Tillförs mycket energi till systemet blir istäcket tunt (vänstra bilden) eller så tillförs lite energi vilket resulterar i ett tjockt istäcke där sprickor och håligheter ger upphov till ytans struktur (högra bilden). Bilden är modifierad från Ballesteros (2010).

Liv i havet under Europas is yta kan mycket väl vara en hypotetisk möjlighet som inte kan uteslutas förrän undersökningar av havet genomförts. Detta ligger dock i framtiden på grund av ekonomiska och politiska beslut.

Titan

Titan är en av Saturnus månar, upptäckt av den nederländske astronomen Christiaan Huygens, 1655 (ESA 2003). Titan är en intressant himlakropp då dess atmosfär påminner om vad beräkningar visar att jordens atmosfär såg ut i början av jordens utveckling (Neish *et al*.

2010). Titans atmosfär består till stor del av kväve och metan (tabell 1) men även en stor del argon, det vill säga en väldigt reducerande atmosfär likt den från Miller-Urey experimentet (Ballesteros 2004). Ytan på Titan är täckt av vad man kan tolka från Huygens/Cassini-sonden, hav och floder av kolväten, slätter, bergskedjor och vulkaner (Ballesteros 2010). Dessa kolvätesjöar tillsammans med atmosfären har föreslagits kunna vara en möjlig grogrund för till liv (Schulze-Makuch & Gripspoon 2005).
Metan (från vad vi känner till) bildas här på jorden som en restprodukt efter biologiska processer. Titans atmosfär består av ca 3,5% metangas, detta indikerar på att gasen måste fyllas på kontinuerligt då metan klyvs via fotokemiska reaktioner i atmosfären till acetylen och med tiden så skulle atmosfären tömts på metangas. Metanet måste helt enkelt fyllas på via någon form av process (figur 7). Metan på Titan fyller samma nisch som vatten gör på jorden då metan existerar i både fast, flytande och i gasform (Coustenis *et al*. 2009). Enligt Schulze-Makuch & Gripspoon (2005) så skulle det kunna fyllas på om acetylen (som bildas via fotokemiska processer i topplagret av atmosfären) faller genom atmosfären mot ytan och till botten av kolvätesjöar. På bottnarna så protonernas acetylen via gejsrar på bottnarna av kolvätesjöarna till metan igenom och kretsloppet kan fortsätta (figur 8).



Figur 8: Modifierad bild av hypotetisk metancykel på Titan enligt Schulze-Makuch & Gripspoon (2005).

Med en metancykel enligt Schulze-Makuch & Gripspoon (2005) och vulkanutbrott kan nivån av metan i atmosfären att fyllas på kontinuerligt.
Det är föga troligt att liv på Titan existerar med den form av biokemi vi känner till från jorden då temperaturen är runt -180ºC. Hypotetiskt skulle liv av annan typ av biokemi än vad som är

känt från jorden kunna existera som är baserad på kisel istället för kol och med metan eller etan istället för vatten.
Cassini har funnit fyra typer av aminosyror på Titan: asparagin, asparaginsyra, glutamin, glutaminsyra (Neish *et al*. 2010). Om dessa uppstått på Titan eller om de kommit till Titan via meteoriter är okänt. Från vad vi känner till från jorden om hur liv kan ha uppstått och vad som krävs finns alla komponenter (kolvätemolekyler, reducerande atmosfär och vätska) för liv på Titan utom värmen (Meierhenrich 2008).

Hypotetisk biokemi

Liv på jorden är kolbaserat, med detta avses att kolatomer är grunden för den biokemi vi känner till och själva består av. Dock har det länge spekulerats att kisel (Si) skulle kunna fungera som ett alternativ till kolbaserad kemi (Bains 2004, Schulze-Makuch & Irwin 2006). Dock har dessa hypoteser mottagits med stor skepsis. Tidiga hypoteser inom kiselbaserat liv utgick från att vatten var det lösningsmedel som användes och i en atmosfär som liknar jordens. Detta har övergått till olika hypoteser där vatten bytts ut mot andra lösningsmedel och att atmosfären och miljö är annan än den vi känner till från jordens förhållanden (Bains 2004, Schulze-Makuch & Irwin 2006).

Anledningen till att kisel anses som en alternativ byggsten för liv är av flera anledningar.

1. Kisel liksom kol har fyra fria valenselektroner (tetravalenta) och ligger i samma grupp (14) i periodiska systemet (Benner *et al*. 2004).
2. Kisel kan bilda stabila kovalenta bindningar till flera olika ämnen. T.ex kol, syre, kväve, fosfor, germanium, svavel, halogener (grupp 17) samt andra metaller.
3. Kisel kan bilda makromolekyler och uppvisa kiralitet (Benner *et al*. 2004)
4. Kisel tillsammans med kol är de enda atomerna som kan bilda nog stora polymerer för att fungera som ryggrad för att bära biologisk och genetisk information (Pace 2001)
5. Båda kan ha sidogrupper som är lösliga i polära (karboxylsyra) och opolära lösningsmedel (alkyner) (Benner *et al*. 2004).

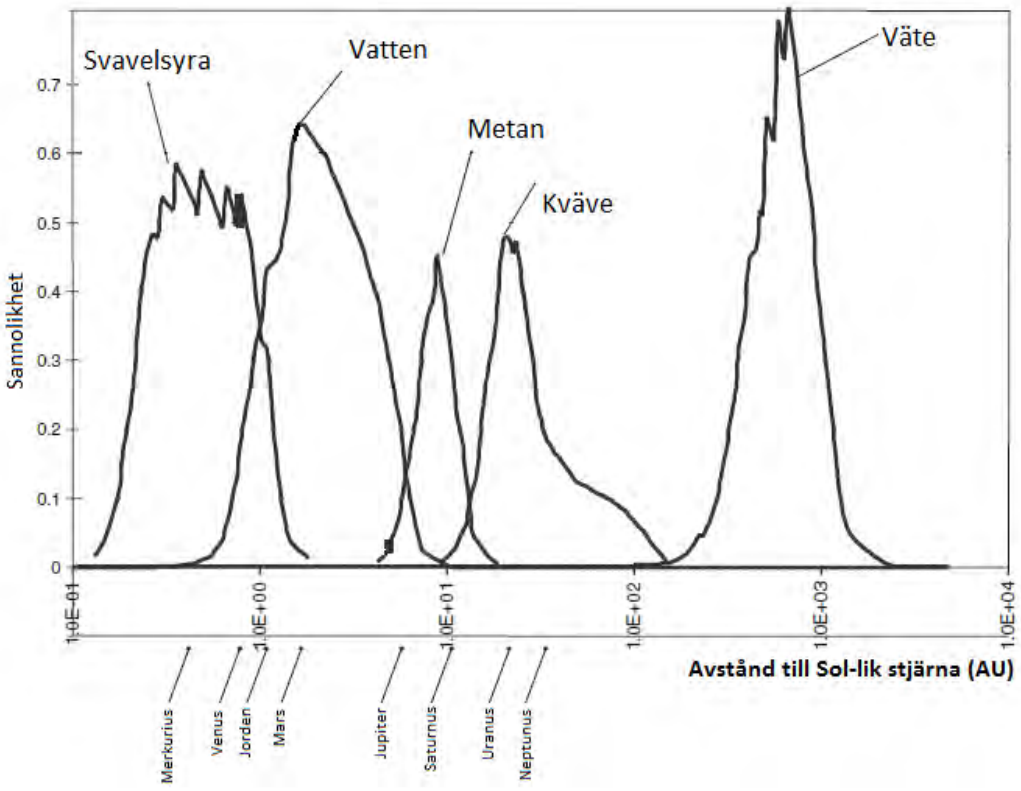
Skeptiker avfärdar dock kiselbaserat liv som ren science fiction. Pace (2001) poängterar att om kolatomerna i metan skulle bytas ut mot kisel skulle detta resultera i en kraftig explosion vid kontakt med syre redan vid 0ºC. Detsamma gäller med ammoniak samt att dessa molekyler lätt hydrolyseras i vatten. Kisel i sig har en stor nackdel. Kiselatomer kan bilda dubbelbindningar, dock väldigt instabila dubbelbindningar, men inte trippelbindningar (West 2002). Detta leder till att det hypotetiska kiselbaserade livet inte i någon större utsträckning kommer att kunna använda sig av den kemiska energi som existerar iform av dubbelbindning mellan två kolatomer (Schulze-Makuch & Irwin 2006).

Enligt Schulze-Makuch & Irwin (2006) så finns det fem kriterier för en miljö där ett hypotetiskt liv baserat på kisel skulle kunna existera:

1. En reducerande atmosfär med enbart små mängder syre
2. Inget vatten, detta för att undvika hydrolysering av kisel-komplex
3. Temperatur långt under 0ºC. Ju lägre temperatur desto stabilare bindning mellan atomer.
4. Ett lösningsmedel som ska fungera som analog till H_2O är metan som är flytande mellan -181ºC till 160ºC. Detta förutsätter dock att en hypotetisk kiselbaserad organism är i behov av lösningsmedel.
5. Begränsad tillgänglighet på kolmolekyler för att undvika att kol ska bli den primära byggstenen för liv.

Enligt punkt fyra: ”ett lösningsmedel som ska kan fungera som analog till H_2O” så finns det utöver metan flera andra förslag till ämnen som i flytande form skulle kunna ersätta vatten: ammoniak, etan, svavelsyra, kväve mm. Enligt Bains (2006) så varierar den sannolika förekomsten av dessa andra lösningsmedel med avståndet från den centrala stjärnan (ska nämnas att detta är från vad vi känner igen från vårt solsystem). Enligt figur 8, om man utgår från en stjärna av solens storlek och ljusintensitet borde förekomsten av dessa lösningsmedel förkomma inom dessa intervall. Från vad vi känner till från jordens läge, även kallat den beboeliga zonen och sannolikheten att vatten ska förekomma i större kvantiteter just runt 1 astronomisk enhet (figur 9). För större eller mindre stjärnor (radie och ljusintensitet) än solens så kommer den beboeliga zonen och sannolikheten för att finna dessa ämnen att förskjutas i förhållande till den lokala stjärnans storlek.

Ammoniak är det ämnet som mest troligt skulle kunna fungera som en analog till vatten. Bland annat för att det finns paralleller mellan ammoniaks och vattens egenskaper, till exempel i hydreringsreaktioner. Dock är vatten mycket bättre på att lösa polära ämnen än vad ammoniak är på grund av sämre dipol-rörelse än vatten. Vidare är ammoniak flytande enbart inom ett kort temperaturintervall mellan -78ºC till -33ºC vid ett atmosfärstryck vid ett atmosfärstryck på en atmosfär (101,325 kPa) (Schulze-Makuch & Irwin 2004, Aylward & Findlay 2008).



Figur 9: Ett sannolikt genomsnitt av sannolikheten att påträffa olika ämnen (i flytande form, antingen på ytan eller i underjorden) sett mot avståndet från en sol-lik stjärna (logaritmerat). Grafen är modiferad från Bains (2006).

Ammoniak är inte heller bra på att hålla värme då det krävs mindre energi för ammoniaks övergångsfaser från fast till flytande till gas än för vattens (tabell 2). Detta visar att vatten är stabilare längre än ammoniak när entalpi förs in i systemet vid ett lägre atmosfärstryck.

Tabell 2. Jämförelse av övergångsfaserna för vatten och ammoniak och den mängd energi (kJ mol^{-2}) som krävs per mol för att genomföra dessa (Aylward & Findlay 2008).

	$\Delta_{fus} H$ (kJ mol^{-1})[a]	$\Delta_{Sub} H$ (kJ mol^{-1})[b]	$\Delta_{vap} H$ (kJ/mol^{-1})[c]
Ammoniak	5,7	26	20,3
Vatten	6	50	44

a) Den mängd entalpi som krävs för att övergå från fast till flytande
b) Den mängd entalpi som krävs för att övergå från fast till ånga
c) Den mängd entalpi som krävs för att övergå från flytande till ånga

Dock har ammoniak en klar fördel över vatten, ammoniak kan lösa alkaliska metaller mycket bättre än vad vatten kan. Då alkaliska metaller kan katalysera biologiska reaktioner samt att ammoniak har lägre viskositet (Schulze-Makuch & Irwin 2004) vilket gör att ämnen och joner lättare kan interagera med varandra i detta medium. Dock så kan inte flytande ammoniak blandas med syre då nitrat och vatten bildas ($4NH_3(L) + 3O_2(g) \rightarrow 2N_2(g) + 6H_2O(L)$), detta omöjliggör en syreberikad atmosfär om ett hypotetiskt liv använder ammoniak istället för vatten.

I ljus av detta måste liv baserat på ammoniak istället för vatten infinna sig i dessa parametrar:

- Låg temperatur och lågt atmosfärstryck eller hög temperatur och högt atmosfärstryck.
- Kunna stå emot att frysas periodvis.
- Syrefri atmosfär för att undvika oxidering av ammoniak.
- Långsammare biokemiska reaktioner på grund av lägre temperatur.

Från vad vi känner till från förhållandena på jorden så klarar mikroorganismer av dessa parametrar. Mikroorganismer klarar sig i lågt och högt tryck, i temperaturer från flera minusgrader till 120ºC. Däremot så måste extremofiler kunna bilda sporer eller dylikt för att överleva de mest extrema förhållandena (Jones & Lineweaver 2010).

Diskussion och slutsats

Liv i solsystemet utöver Jorden kan hypotetiskt existera på Venus, Mars, Europa och Titan, detta bör ses som en möjlighet men för att kunna säga säkert att det finns liv i Venus atmosfär, i permafrosten på Mars eller i Europas salthav eller kanske på Titan eller någon annanstanns i solsystemet, måste bemannade eller obemannade expeditioner sändas ut för att undersöka dessa himlakroppar. Skulle det visa sig att liv existerar på dessa himlakroppar så skulle det revolutionera vår kunskap om solsystemet och möjligheten att förstå hur liv på andra himlakroppar fungerar. Bland annat hur hypotetiskt liv kan se ut i form av biokemi och darwinistisk evolution.
Frågan kring hur extremofiler från jorden skulle kunna klara av att överleva på andra planeter är dock osäkert, tester måste genomföras. Dock finns det en skyddspolicy för jorden och andra himlakroppar vad gäller kontaminering (Kopal 2008).
Efter snart 50 års avlyssnande med radioteleskop av Vintergatan har ingen signal som kan indikera på intelligent liv påträffats, dock kan ickeintelligent liv existera (Duric & Field, 2003). Det samma gäller omvänt, här på jorden har vi haft radiosändningar i mer än 100 år och dessa radiosignaler har nått mer än 100 ljusår bort (ljusår = den sträckan som ljus färdas under ett jordår). Att vi inte hört något via radioteleskop på 50 år måste betyda att vi är det enda intelligenta livet inom 50 ljusår eller att om det finns något intelligent liv inom 50 ljusår att de kommunicerar på något annat sätt än via radiovågor. Detta undanröjer inte att liv fortfarande kan existera inom 50 ljusår från jorden. I jordens nästan 4,5 miljarder långa historia har liv enbart existerat i ca 3,5 miljarder år och flercelligt liv i 2 miljarder år. Det är under de senast 7000 åren som den mänskliga civilisationen existerat och de senast 50 åren vi undersökt universum.

Idag kan man säga att astrobiologin är ett forskningsfält att räkna med och på frammarsch. Men tills klara bevis för att liv existerar i solsystemet eller i Vintergatan så är astrobiologin fylld av hypoteser som kanske aldrig får ett svar. Ska man förstå solsystemet och universum måste man fläta samman de fält som astrobiologin består av men då bevis saknas är vissa aspekter av astrobiologin bara science fiction tills vidare. För att avsluta med ett citat av Stephen Hawkings: “I don't think the human race will survive the next thousand years, unless

we spread into space. There are too many accidents that can befall life on a single planet. But I'm an optimist. We will reach out to the stars".

Tack

Ett väldigt stort tack till Dennis Larsson, Björn Tropp, Marcus Wäneskog och Axel Spaxes som gått igenom detta arbete och gett feed-back. Ett stort tack till min flickvän Elsa Asplund som hjälpt i skrivandeprocessen och korrekturläsning.

Referenser

Anderson JD, Lau EL, Sjogren WL, Schubert G, Moore WB. 1997. Europa's differentiated internal structure: inferences from two Galileo encounters. Science **276**: 1236-1239.

Aylward G, Findlay T. 2008. Si Chemical data - proporties of inorganic compounds. 6:e upplagan. John Wiley & Sons Australia Ltd. Milton – Queensland.

Bains W. 2004. Many chemistries could be used to build living systems - hypothesis paper. Astrobiology **4**: 137-167.

Ballesteros FJ. 2010. E.T. talk: astronomers universe. Springer Science and Business Media. New York - USA.

Benilan Y, Cottin H. 2007. Comets, Titan and Mars: astrobiology and space projects. Gargaud M., Herve M., Claeys P. Advances in astrobiology and biogeophysics. pp. 347–428. Lectures in Astrobiology.

Benner SA, Alonso R, Carrigan MA. 2004. Is there a common chemical model for life in the universe? Current Opinion in Chemical Biology **8**: 672-689.

Bertrand M, Gaast S, Vilas F, Hörz F, Haynes G, Chabin A, Brack A, Westall F. 2009. The fate of amino acids during simulated meteoritic impact. Astrobiolgy **9**: 943-951.

Bordenstein S. 2008. Tardigrades (Water bears). WWW-dokument 2008-12-17 http://serc.carleton.edu/microbelife/topics/tardigrade/index.html. Hämtad 2011-04-16.

Cech RT. 2011. The RNA worlds in context. WWW-dokument 2011-02-16 http://cshperspectives.cshlp.org/cgi/doi/10.1101/cshperspect.a006742. Hämtad 2011-03-23.

Chyba CF, Phillips CB. 2011. Possible ecosystems and the search for life on Europa. Proceedings of the National Academy of Sciences **98**: 801-804.

Copal V. 2008. UN space treaty 1967. WWW-dokument 2008 http://untreaty.un.org/cod/avl/ha/tos/tos.html. Hämtad 2011-05-03.

Coustenis A, Atreya SK, Balint T, Brown RH, Dougherty MK, Ferri F, Fulchignoni M, Gautier D, Gowen RA, Griffith C A, Gurvits L I, Jaumann R, Langevin Y, Leese MR, Lunine JI, McKay CP, Moussas X, Müller-Wodarg I, Neubauer F, Owen TC, Raulin F, Sittler EC, Sohl F, Sotin C, Tobie G, Tokano T, Turtle EP, Wahlund J-E, Waite JH, Baines KH, Blamont J, Coates AJ, Dandouras I, Krimigis T, Lellouch E, Lorenz RD, Morse A. Porco CC, Hirtzig M, Saur J, Spilker T, Zarnecki JC, Choi E, Achilleos N, Amils R, Annan P, Atkinson D H, Bénilan Y, Bertucci C, Bézard B, Bjoraker G L, Blanc M, Boireau L, Bouman J, Cabane M, Capria MT, Chassefière E, Coll P, Combes M, Cooper JF, Coradini A, Crary F, Cravens T, Daglis IA, de Angelis E, de Bergh C, de Pater I, Dunford C, Durry G, Dutuit O, Fairbrother D, Flasar F M, Fortes AD, Frampton R, Fujimoto M, Galand M, Grasset O, Grott M, Haltigin T, Herique A, Hersant F, Hussmann H, Ip W, Johnson R, Kallio E, Kempf S, Knapmeyer M, Kofman W, Koop R, Kostiuk T, Krupp N, Küppers M, Lammer H, Lara L-M, Lavvas P, Le Mouélic S,

Lebonnois S, Ledvina S, Li J, Livengood TA, Lopes LM, Lopez-Moreno J-J, Luz D, Mahaffy RP, Mall U, Martinez-Frias J, Marty B, McCord T, Menor Salvan C, Milillo A, Mitchell DG, Modolo R, Mousis O, Nakamura M, Neish CD, Nixon CA, Nna Mvondo D, Orton G, Paetzold M, Pitman J, Pogrebenko S, Pollard W, Prieto-Ballesteros O, Rannou P, Reh K, Richter L, Robb FT, Rodrigo R, Rodriguez S, Romani P, Ruiz Bermejo M, Sarris ET, Schenk P, Schmitt B, Schmitz N, Schulze-Makuch D, Schwingenschuh K, Selig A, Sicardy B, Soderblom L, Spilker L J, Stam D, Steele A, Stephan K, Strobel DF, Szego K, Szopa C, Thissen R, Tomasko MG, Toublanc D, Vali H, Vardavas I, Vuitton V, West RA, Yelle R, Young EF. 2009. TandEM: Titan and Enceladus mission. Experimental Astronomy **23**: 893-946.

Donahue T M, Hoffman J J, Hodges R R jr, Watson A J.1982. Venus was wet: a measurement of the ratio of deuterium to hydrogen. Science **216**: 630-633.

Duric N, Field L. 2003. On the detectability of intelligent civilizations in the galaxy. Serbian Astronomical Journal **167**: 1-10.

Elwood-Madden ME, Bodnar RJ, Rimstidt JD. 2004. Jarosite as an indicator of water-limited chemical weathering on Mars. Nature **431**: 821-823.

ESA 2003. Christiaan Huygens: discoverer of Titan. WWW-dokument 2003-09-24. http://www.esa.int/esaSC/SEMJRT57ESD_index_0.html. Hämtad 2011-04-19.

ESA 2004. Phobos-Grunt. WWW-dokument 2004-10-28. http://www.esa.int/esaMI/ESA_Permanent_Mission_in_Russia/SEMIJFW4QWD_0.html. Hämtad 2011-05-03.

ESA 2010 – Mars express status report october 2009. WWW-dokument 2010-07-13. http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=47048 hämtad 2011-04-18.

ESA-NASA 2011. ExoMars programme 2016-2018. WWW-dokument 2011-01-06 http://exploration.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=48088 Hämtad 2011-04-17 .

Fairen AG, Fernánderz-Romlar D, Dohm JM, Baker R, Amilas R. 2004. Inhibition of carbonate synthesis in acidic oceans on early Mars. Nature **431**: 423-426.

Gagyi-Palffy A, Stoian LC. 2011. A short review on tardigrades – some lesser known taxa of polyextremophilic invertebrates. Extreme Life, Bospeology and Astrobiology - International Journal of the Bioflux Society **3**: 13-26.

Ojakangas GW, Stevenson D J. 1989. Thermal state of an ice shell on Europa. Icarus **81**: 220-241.

Hoppa GV, Tufts RB, Greenburg R, Geissler PE. 1999. Formation of cycloidal features on Europa. Science **285:** 1899-1902.

Horneck G, Rettenburg P, Reitz G, Wehner J, Eschweiler, Strauch K, Panitz C, Strake V, Baumstark-Kahn C. 2001. Protection of bacterial spores in space, a contribution to the discussion on panspermia. Origins of Life and Evolution of the Biosphere **31**: 527-547.

Huguenin RL, Miller KJ, Harwood WS. 1979. Frost-weathering on Mars: experimental evidence for peroxide formation. Journal of Molecular Evolution **14**: 103-132.

Irwin LN, Schulze-Makuch D. 2001. Assessing the plausibility of life on other worlds. Astrobiology **1**: 143–160.

Jones EG, Lineweaver CH. To what extent does terrestrial life ‘‘follow the water’’? Astrobiology **10**: 349-361.

Kerr RA. 2010. Liquid water found on Mars, but it's still a hard road for life. Science **330**: 571.

Kivelson MG, Khurana KK, Russell T, Volwerk M, Walker RJ, Zimmer C. 2000. Galileo magnetometer measurements: a stronger case for a subsurface ocean at Europa. Science: **289:** 1340-1343.

Kuzicheva EA, Gontareva N B. 2003. Exobiological investigations on Russian spacecrafts. Astrobiology **3**: 253-261.
Lewis JC 1971. Satellites of the outer planets: Their physical and chemical nature. Icaurs: **15**: 174-185.
McDonald GD, Storrie-Lombardi MC. 2006. Research paper - amino acid distribution in meteorites: diagenesis, extraction methods, and standard metrics in the search for extraterrestrial biosignatures. Astrobiology **6**: 17-33.
Meierhenrich U. 2008. Advances in astrobiology and biogeophysics: amino acids and the asymmetry of life. Springer. New York – USA.
Mileikowsky C, Cucinotta FA, Wilson JW, Gladman B, Horneck G, Lindegren L, Melosh J, Rickman H, Valtonen M, Zheng JQ. 2000. Risks threatening viable transfer of microbes betweenbodies in our solar system. Planetary and Space Science **48**: 1107-1115.
Miller SL. 1953. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. Science **117**: 528-529.
Mitrofanov IG, Zuber MT, Litvak ML, Demidov NE, Sanin AB, Boynton WV, Gilichinsky D A, Hamara D, Kozyrev AS, Saunders RD, Smith DE, Tretyakov VI. 2007. Water ice permafrost on Mars: layering structure and subsurface distribution according to HEND/Odyssey and MOLA/MGS data. Geophysical Research Letters **34**: L18102.
Moeller R, Reitz G, Berger T, Okayasu R, Nicholson WL, Horneck G. 2010. Astrobiological aspects of the mutagenesis of cosmic radiation on bacterial spores. Astrobiology **10**: 509-521.
NASA 2010 - NASA's Odyssey spacecraft sets exploration record on Mars. WWW-dokument 2010-12-15. http://mars.jpl.nasa.gov/odyssey/news/whatsnew/index.cfm?FuseAction=ShowNews&NewsID=1091. Hämtad 2011-04-18.
NASA 2011a. Mars science laboratory 2011. WWW-dokument. http://marsprogram.jpl.nasa.gov/msl/mission/overview/. Hämtad 2011-04-17.
NASA 2011b- Prolific NASA orbiter reaches fve-year mark. WWW-dokument 2011-03-09. http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mro/news/whatsnew/index.cfm?FuseAction=ShowNews&NewsID=1111. Hämtad 2011-04-18.
NASA 2011c - Latest opportunity update - Study of 'Ruiz Garcia' rock completed. WWW-dokument 2011-03-16. http://www.jpl.nasa.gov/missions/mer/daily.cfm**.** Hämtad 2011-04-18.
Neish CD, Somogyi Á, Smith MA. 2010. Titan's primordial soup: formation of amino acids via low-temperature hydrolysis of Tholins. Astrobiology **10**: 337-347
Pace NR. 2001. The universal nature of biochemistry. Proceedings of the National Academy of Sciences **98**: 805-80.
Rebecchi L, Altiero T, Guidetti R, Cesari M, Bertolani R, Negroni M, Rizzo AM. 2009. Tardigrade resistance to space effects: first results of experiments on the LIFE-TARSE mission on Foton-M3 (September 2007). Astrobiology: **9**: 851-591.
Sancho L G, de la Torre R, Horneck G, Ascaso C, de los Rios A, Pintado A, Wierzchos J, Schuster M. 2007. Lichens survive in space: results from the 2005 lichens experiment. Astrobiology **7**: 443-454.
Schulze-Makuch D, Grinspoon DH, Abbas O, Irwin LN, Bullrock MA. 2004. Hypothesis paper - a sulfur-based survival strategy for putative phototrophic life in the Venusian atmosphere. Astrobiology **4**: 11-18.
Schulze-Makuch D, Grinspoon DH. 2005. Hypothesis paper: biologically enhanced energy and carbon cycling on Titan? Astrobiology **5**: 560-567.
Schulze-Makuch D, Irwin LN. 2002. Hypothesis Paper- reassessing the possibility of life on Venus: proposal for an astrobiology mission. Astrobiology **2**: 197-202.

Schulze-Makuch D, Irwin LN. 2004 Life in the universe: expectations and constraints. Springer. New York – USA.
Schulze-Makuch D, Irwin LN. 2006. The prospect of alien life in exotic forms on other worlds. Naturwissenschaften **93**: 155–172.
Schulze-Makuch D, Irwin LN. 2008. Life in the Universe. Advances in astrobiology and biogeophysics. Springer. Berlin - Germany.
Szewczyk NJ, Mancinelli R L, mcLamb W, Reed D, Blumberg B S, Conley C A. 2005. *Caenorhabditis elegans* survives atmospheric breakup of STS-107, space shuttle Columbia. Astrobiology **5**: 690-705.
Toon OW, Turco R P, Pollack J B. 1982. The ultraviolet absorber on Venus: amorphous sulfur. Icarus **51**: 358-373.
West R. 2002. Multiple bonds to silicon, 20 years later. Polyhedron **21**: 467–472
Wharton DA. 2002. Life at the limits: Organisms in extreme environments. Cambridge University Press, Canbridge - England.
Wharton DA. 2004. Organisms in extreme environment: from the orgin and early evolution of life on earth to astrobiology. J. Seckbach (red.). Origins. 607–620. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
Williams D. 2010a. Venus fact sheet. WWW-dokument 2010-11-17. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html. hämtad 2011-04-17.
Williams D. 2010b. Earth fact sheet. WWW-dokument 2010-11-17. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html. hämtad 2011-04-17.
Williams D. 2010c. Mars fact sheet. WWW-dokument 2010-11-17. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html. hämtad 2011-04-17.
Williams D. 2010d. Galilean satellite fact sheet. WWW-dokument 2004-09-01. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/galileanfact_table.html. hämtad 2011-04-17.
Williams D. 2010e. Saturnian satellite fact sheet. WWW-dokument 2010-02-22. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/saturniansatfact.html. hämtad 2011-04-17.