

Det astrofysiske grundlag for liv I

Michael Cramer Andersen og Arne Damm, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik

Det er slående, at alt det liv man finder på Jorden er baseret på kulstof-forbindelser og vand (H_2O). Begge dele findes både i rummet mellem stjernerne og spredt i Solsystemet (f.eks. i kometer). Hvor kommer disse livets byggesten fra og hvordan er de endt på Jorden?

I det Univers vi lever i, er Solen blot én blandt ca. 300.000.000.000 stjerner i vores galakse Mælkevejen som igen kun er én blandt mere end 100.000.000.000 tilsvarende galakser i det synlige Univers. Intet tyder på, at hverken kulstof (C) eller vand (H_2O) er sjældne andre steder i Universet. Der er dog kun, med sikkerhed, opdaget liv ét sted, nemlig på Jorden. Er Jorden virkelig det eneste sted hvor der findes liv?

Hvilke grundstoffer anvender levende organismer?

Moderne levende organismer, som f.eks. mennesket, bruger altså primært brint, ilt og kulstof (H, O, C i alt 94%). Derudover bruges en række andre grundstoffer (i alt 6%). Grundstoffer med en biologisk anvendelse i levende organismer er vist (med aftagende hyppighed) i box 1. Som vi skal se, fandtes alle disse grundstoffer allerede i den sky der dannede Solsystemet før Solen udsendte sine første stråler.

Box 1. Grundstoffernes biologiske rolle.

GRUNDSTOF	ANVENDES F.EKS. I
1 H (brint)	Vand (H_2O) og alle biomolekyler.
8 O (ilt)	Vand (H_2O) og næsten alle biomolekyler; respiration (ånding).
6 C (kulstof)	"Rygraden" i alle biomolekyler.
7 N (kvælstof)	Alle proteiner og DNA/RNA.
20 Ca (calcium)	Knogler; muskelsammentrækning.
15 P (fosfor)	Energistofskifte (ATP); i DNA/RNA.
17 Cl (klor)	Salt (NaCl); saltbalance.
19 K (kalium)	Generering af nervesignaler.
16 S (svovl)	Næsten alle proteiner.
11 Na (natrium)	Salt (NaCl); nervesignaler.
12 Mg (magnesium)	Visse enzymer og i planternes klorofyl.
26 Fe (jern)	Hæmoglobin, ilt-transport.
29 Cu (kobber)	Optagelse af C-vitamin og jern.
30 Zn (zink)	Visse enzymer.
53 I (iod)	Hormonet <i>thyroxin</i> .
27 Co (kobolt)	Aktiv del af co-enzym.
25 Mn (mangan)	Visse reaktioner som katalysator.
42 Mb (molybdæn)	Planter, hjælper ved nitrogen-fiksering.
9 F (fluor)	For udvikling af normal tand-emaile.
24 Cr (krom)	Visse organismer i små mængder.
23 V (vanadium)	Visse organismer i små mængder.



Figur 1. Grundstoffernes vej fra "the big bang" over stjernedannelse og planetsystemer til en jord-lignende planet der rammes af kometter. Parallelt med dette ses udviklingen fra små atomer, over større atomer, til stadigt mere komplicerede interstellare molekyler. DNA-dobbeltspiralen som interstellart molekyle (nederst til højre) er dog fri fantasi. Illustration: Pat Rawlings/NASA.

Hvor kommer grundstofferne fra?

I de første minutter efter big bang blev der produceret 75% brint, knap 25% helium og ganske små spor af lithium (og beryllium). Alle tungere grundstoffer er senere dannet ved fusion indtil omkring grundstof nr. 26, jern. Dette sker med energigevinst. Tungere grundstoffer end jern kræver energitilførsel for at dannes.

Det er påfaldende, at nukleosyntesen i de første tre minutter efter big bang stoppede ved knap 1/4 helium mens resten vedblev med at være brint. Man kan tænke sig, at fusionen havde omsat al brint til helium; så havde der ikke været stjerner med lang levetid som solen, der kan levere energi til liv. Eller man kan tænke sig, at fusionen havde omdannet alle grundstoffer til jern. Jernet vil da blot danne store krystaller som måske ville kol-lapse. Universet kunne altså være blevet en inaktiv gas (helium) eller en stort krystal, men blev heldigvis mere interessant med strukturer såsom stjerner og galakser.

Fælles for de tungere grundstoffer er, at de kun kan være produceret i større mængde ved *flere generationer af stjerner*, der har returneret deres materiale tilbage til Mælkevejens gas og støv. Ilt, kulstof og kvælstof produceres i stjerner af en vis størrelse. De syv næsthyp-pigste grundstoffer i liv (se box 1) produceres i stjerner tungere end 6–7 solmasser i forbindelse med C-, O-, Ne- og Si-“forbrænding”. Metallerne fra jern og opefter dannes i sentype stjerner, såsom røde kæmpestjerner og supernovaer, med høj neutronflux.

Box 2. Atomkerner.

Atomkerner består af protoner og neutroner, der hver især er opbygget af tre *kvarker*. Kvarkerne bindes sammen af de stærke kernekræfter gennem udveksling af *gluoner*.

Alle grundstoffer fra nr. 1 (brint) til nr. 82 (bly), undtaget nr. 43 og 61, har stabile isotoper. Der er altså 80 stabile grundstoffer, men hvert grundstof kan have flere stabile isotoper med færre eller flere neutroner.

Bindingsenergien for atomkernen vokser med antallet af kernepartikler (protoner og neutroner) men reduceres ved overfladen af kernen hvor der ikke er så mange naboer (vigtigst for lette kerner).

Kernens bindingsenergi reduceres også ved den gensidige frastødning mellem protonerne. Stabile atomkerner har i de fleste tilfælde en “overvægt” af neutroner.

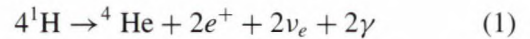
Stjernernes energiproduktion

Stjerner er store¹ selvlysende gaskugler, der primært er opbygget af brint og helium. Hvis gasobjektet vejer mindst 1/12 af Solen, vil *kernefusion* for en tid

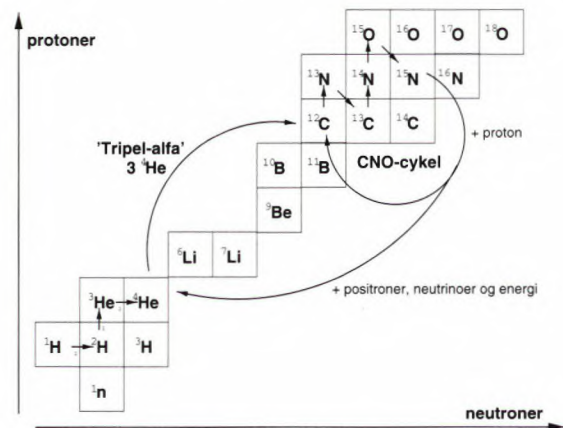
¹Selv mindre gasobjekter der trækker sig sammen, som f.eks. Jupiter, vil udsende energi i form af infrarød stråling.

bringe sammentrækningen til ophør, og vi kalder det en stjerne. Sammentrækningen af en stjerne som Solen holdes altså i skak af det udadrettede strålingstryk som kommer fra det over 15 mio. grader varme centrum.

Den mest energirige reaktion er omdannelsen af fire protoner til én heliumkerne, to positroner, to neutrinoer og to energirige fotoner:



Nettoenergien der frigøres er 26,7 MeV ($4,3 \cdot 10^{-12}$ Joule). Positronerne annihilerer med elektroner og bidrager dermed til energien. Processen foregår i virkeligheden i flere trin (se nederst t.v. på figur 2) og involverer deuteroner og helium-3 kerner.



Figur 2. De kernefysiske processer i stjernernes indre som producerer de første tungere grundstoffer ud fra brint og helium. Nederst til venstre omdannes 4 H til He; tripel-alfa processen omdanner 3 ⁴He til ¹²C og ¹²C fungerer som katalysator for dannelsen af N og O.

Den næste vigtige proces er *tripel-alfa*-processen hvor tre heliumkerner fusionerer til en kulstofkerne. Mange stjerner producerer altså helt naturligt den kulstof, som livet er baseret på.

Kulstof virker som katalysator for CNO-cyklen, hvor også kvælstof og ilt dannes (øverst t.h., figur 2). CNO-cyklen kræver en temperatur på 20 mio. grader. Det finder man i stjerner med masser fra halvanden gange solens masse og i lettere stjerner der har forladt hovedserien og er blevet røde kæmpestjerner.

Flere reaktioner følger hvor stadigt tungere grundstoffer produceres mens energiproduktionen falder. “Forbrænding” af kulstof, ilt, neon og silicium resulterer efterhånden i jern hvorefter der ikke er mere energi at hente i kernefusion.

Radioaktivitet

De tungeste grundstoffer blev altså dannet hvor der er en høj neutronflux, i de sene udviklingsstadier af stjerner.

Når jern og nikkel beskydes med neutroner dannes tungere radioaktive isotoper som, gennem forskellige

typer henfald, omdannes igen til lettere atomkerner på tidsskalaer fra millionte dele sekunder til mia. år.

Stjernevinde og støvkorn

Støvkorn og molekyler dannes hvor der er høj tæthed og "koldt" (under ca. 4000 K). Det kan f.eks. være i de øverste lag af røde kæmpestjerner (AGB-stjerner) og i stjernevindene der blæser ud herfra.

Det næsthyppest interstellare molekyle er CO (kulmonoxid) med hyppigheden 10^{-5} af H_2 -molekylet. Størstedelen af C- og O-atomerne i stjernevinde går til dannelsen af det meget stabile CO-molekyle.

Hvor der er overvægt af iltatomer dannes også met-aloxyder og lignende (SiO, TiO, ZrO, LaO). Men hvor der er overvægt af kulstofatomer dannes kulstofholdige molekyler (f.eks. CN, HCN, C_2 , C_3 , C_4H ,...). Støvkornene er af størrelsesordenen 0,1–10 mikrometer. De fleste støvkorn ser ud til, at bestå af ren kulstof (grafit).

Kæmpestjernernes vinde (som er væsensforskellige fra solvinden) resulterer i de meget smukke *planetariske tåger*. Kæmpestjerne² er ansvarlige for 90% af det stof som leveres tilbage til den interstellare gas. Supernovaer er kun ansvarlige for 10%.

Interstellare vandmolekyler dannes bl.a. når frie iltatomer og brintmolekyler udsættes for UV-stråling og kosmisk stråling. Flere interessante molekyler opblandes således i gassen (brint og helium) som nye stjerner dannes af. Dels støvkorn (til opbygning af planeter) og dels kulstof og vand (til opbygning af liv).

Galakser og stjerner

Vi lever i en spiralgalakse, der er rig på gas, støv og unge stjerner (se en lignende galakse på figur 3a).

Stjerner der er væsentligt tungere end solen vil leve et kort og intenst liv. Dette forstås af følgende:

- En stjernes luminositet (lysstyrke) vokser dramatisk med massen (M):

$$\text{Luminositet } (L) \propto M^3 \quad (2)$$

- En stjernes levetid går på følgende måde:

$$\text{Levetid } (T) \approx \frac{M}{L} \propto \frac{M}{M^3} = \frac{1}{M^2} \quad (3)$$

Det betyder, at en stjerne der vejer dobbelt så meget som solen vil lyse otte gange kraftigere og leve en fjerdedel af solens levetid. En stjerne på 30 solmasser vil lyse 27.000 gange kraftigere end solen og leve ca. en tusindedel af solens levetid. I dette tilfælde eksploderer stjernen som en supernova efter blot 10 mio. år.

Chokbølger fra supernova-ekspllosioner kan sammenpresse gasskyer og derved starte ny stjernedannelse. I stjernedannende skyer som f.eks. Orion-tågen (figur 3b) har man fundet såkaldte *protoplanetariske*

skiver hvor man ser en mørk skive af støv omkring en nydannet stjerne (figur 3c). Støvet er en forudsætning for, at danne et system af planeter som vores Solsystem.

Hvis en støvskive findes i nærheden af tunge stjerner, med kraftig UV-stråling, vil støvet "fordampe" væk. Men hvis støvskiven er lidt mere isoleret, kan den i løbet af ca. 100 mio. år udvikle planeter. Detektion af andre planeter er beskrevet i box 3.

Box 3. Andre planetsystemer.

Den første planet omkring en sollignende stjerne blev fundet november 1995 [4]. Der kendes nu over 25 planeter med masser fra ca. halvdelen til over ti gange Jupiters masse. Et planetsystem med *tre planeter*, omkring stjernen Upsilon Andromedae 44 lysår væk, blev fundet maj 1999.

Metoden går ud på, at man måler Doppler-forskydning af emissionslinjer i stjernens spektrum. Effekten skyldes, at en stor gasplanet vil trække lidt i stjernen under omløbet. Set udefra ville Jorden, på afstande over ca. 50 lysår, ikke kunne detekteres med instrumenter vi råder over idag og slet ikke kunne ses optisk. Det kunne altså virke forgæves at søge efter planeter som Jorden?

NASA vil opsende en *Space Interferometry Mission* i år 2006 [5], der skal undersøge systemer som Upsilon Andromedae. Den mindste vinkelopløsning, som det 10 m store teleskop vil kunne præstere er 0,01 buesekunder. Afløseren, *Terrestrial Planet Finder*, er allerede på tegnebrættet og skal opsendes år 2010.

De næste år vil helt sikkert bringe flere "Jupiters" og ved såkaldt *transit-fotometri*, har man allerede lært noget om størrelsen af planetatmosfærene og deres "farve". *Jord-finderen* vil kunne optage spektre af atmosfæren på andre planeter af Jord-størrelse. Det interessante er så, om man fra spektret alene kan konkludere om der er liv? På Jorden skyldes atmosfærens O_2 levende organismer der benytter fotosyntese.

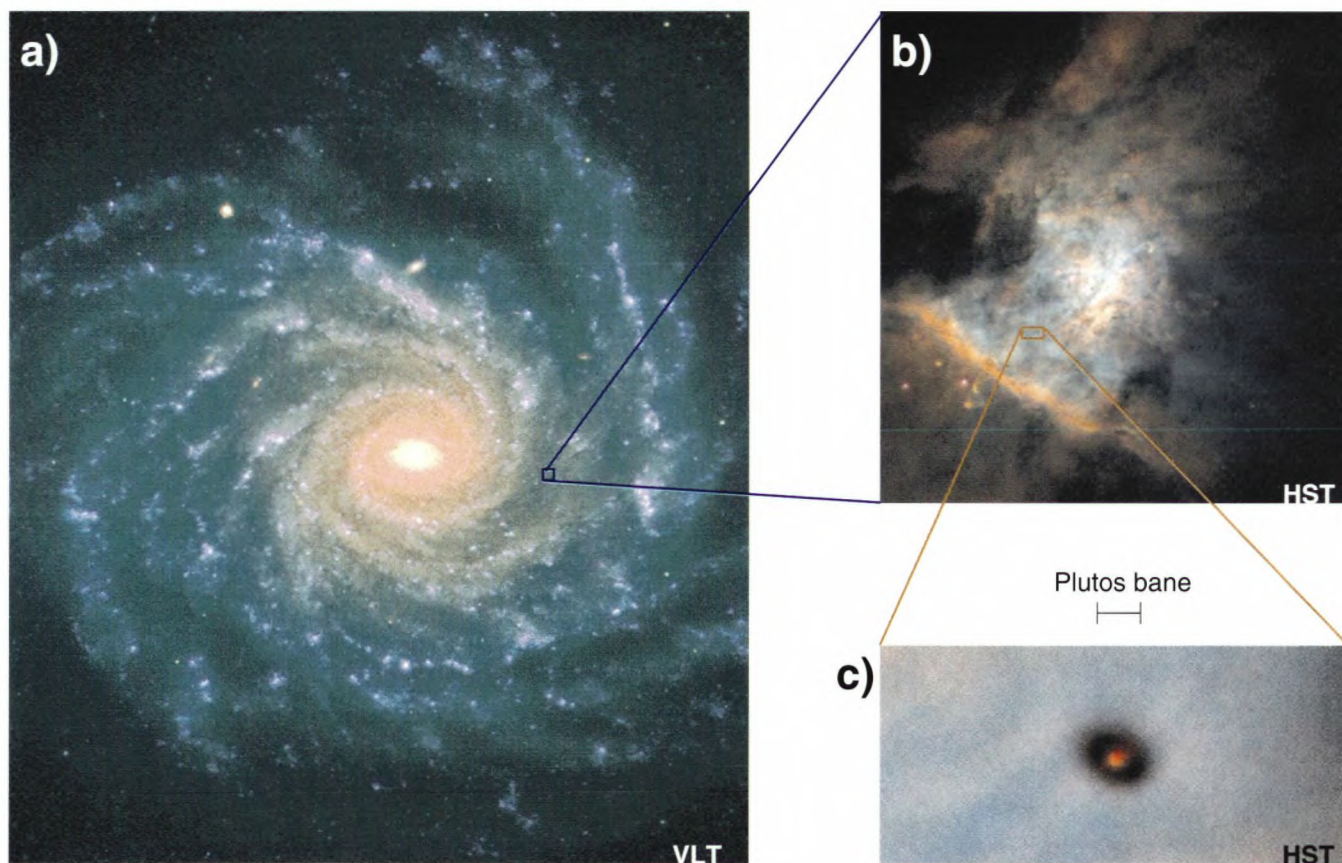
Solens dannelse

For knap 4600 mio. år siden begyndte et tæt område i en molekylsky (som Orion-tågen) at kollapse.

Diameteren har været godt tusind astronomiske enheder (d.v.s. 150 mia. km). Skyen har været mørk, kold (10–50 K) og turbulent. Under kollapset blev der dannet en flad roterende skive. I centrum opbyggedes efterhånden et centralt legeme: *proto-solen*.

Sammentrækningen af proto-solen øgede strålingstrykket fra centrum. Proto-solen begyndte at sende materiale ud igen fra polerne. Efter ca. en mio. år startede den såkaldte T Tauri fase, hvor vindene ender med at blive så kraftige, at massetilførslen stopper. Først herefter, er de indre dele af Solen opvarmet tilstrækkeligt til, at fusionsprocesserne kan starte og *Solen* begynder sit normale liv på hovedserien (i HR-diagrammet).

²Solen bliver i øvrigt selv en rød kæmpestjerne, om 6-7 mia. år, og bidrager dermed til stoffets kosmiske kredsløb.



Figur 3. a) Galaksen NGC1232 er i denne montage brugt som illustration af en spiralgalakse der kunne være Mælkevejen. b) Orion-tågen, et område for stjernedannelse. c) Protoplanetarisk gas- og støvskive i Orion-tågen. Udstrækningen af den mørke skive er lidt større end Plutos bane i vores solsystem. Illustration: Montage mellem fotos fra Hubble Space Telescope (1995) og Very Large Telescope (1998).

Kometer og planeter

Den sky der dannede solen indeholdt en blanding af både gasser og støv. Efter sammentrækningen og skivedannelsen vil stoffet ikke kun være påvirket af rotation, og tyngdekraft, men også af strålingstryk plus opvarmning.

En del af stoffet er på dette tidspunkt blevet sammenkittet i større stykker; molekyler vil kondensere på småpartiklerne som altså gror større og større. Da temperaturen er højest ved centrum, og aftagende udefter, ordnes molekylerne efter kogepunkt: Stoffer med højt kogepunkt kondenserer tættest på proto-solen. Stoffer med lavere kogepunkt (vand og "normale" gasser) kondenserer længere ude i skiven. Denne *ordning* af solsystemets materiale er delvis bevaret til idag (se box 4).

Men ordningen brydes af flere forhold.

1) Under T Tauri fasen bliver vindene fra den unge sol så kraftige, at massebevægelsen af stof *vender*: støv og gas blæses væk fra Solen, også det der ikke "nåede" at blive sorteret og bundet til planet-forstadier.

2) Vand og gasser kan bindes i mineraler og dermed ende i klippeplaneter og småplaneter tæt på Solen trods deres lave kogepunkt.

3) Kometer og isplaneter transporterer is og gas "tilbage igen" til de inderste planeter.

At sorteringen af stof må have været meget markant er der mange eksempler på. F.eks. består nogle af solsystemets yderste måner af mere end 50% vand-is, det samme gælder for kometerne.

En række molekyler³ er observeret i kometernes koma (fordampede gasser omkring kometkernen). Selve kometkernen er mørkere end kul (reflekterer kun 4% af lyset). Den mørke farve skyldes formentlig et lag af kulstofrige forbindelser og støv, der er efterladt ved fordampningen af kometens is.

Kometerne har, sammen med småplaneter, deltaget i et massivt bombardement og således ført kulstof og vand ind til de terrestriske planeter. Dette vidner Månen og Merkurs kratere stadig om, da de ikke har været væsentligt geologisk aktive. Der er to grunde til, at bombardementet ophørte for 3,9 mia. år siden. Dels er mange kometer blevet indfanget, primært af Solen (som "kamikaze"-kometer) og Jupiter (som Shoemaker-Levy, 1994). Dels er størstedelen af de resterende kometer blevet presset ud, af de ydre planeter, i baner langt væk fra Solen. Kometnedslag på de inderste planeter, f.eks. Jorden, er således sjældne i dag

³Det typiske indhold er [6]: 85% H₂O (vand), 4% CO (kulmonoxid), 3% CO₂ (kuldioxid), 2% H₂CO (formaldehyd), 2% CH₃OH (methanol), 1% N₂ (kvælstof), og sammenlagt ≤ 3% H₂S (svovlbrinte), HCN (blåsyre), NH₃ (ammoniak), CH₄ (methan), CS₂ og H₂CO₂.

fordi Solsystemet er "fyldt ud" af massive planeter.

Hvor meget vand er der tilført Jorden under planetens tidlige dannelse? Kan oceanerne og det vand der er bundet i klipperne forklares udelukkende ved denne kilde? Hvilke organiske molekyler indeholder kometer som kunne være interessante for livets opståen?

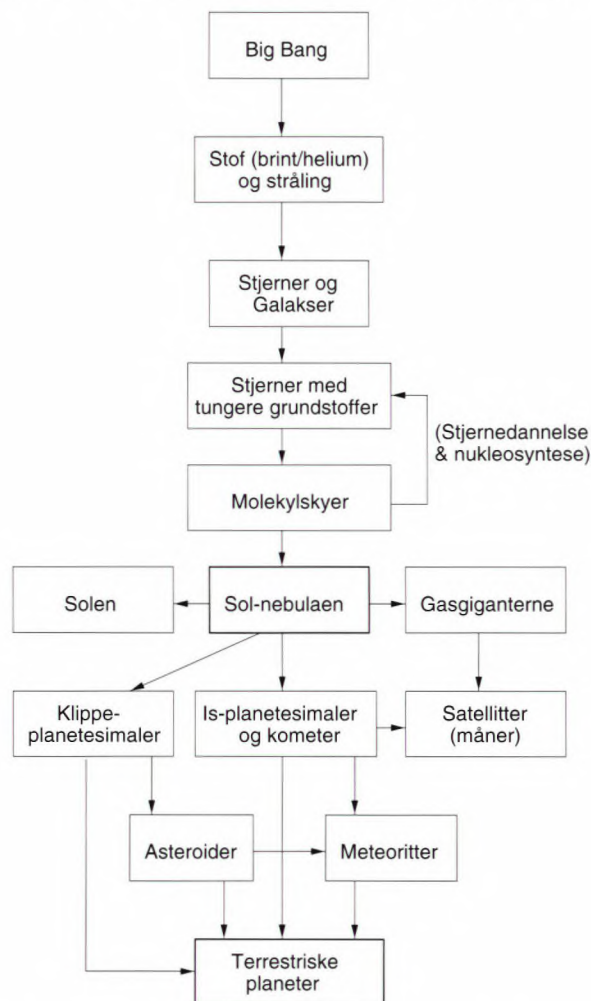
Kulkondritter – det ældste stof

Udover de mere almindelige stenmeteoritter og jernmeteoritter findes en meget interessant type meteoritter kaldet *kulkondritter*.

De korn der opbygger kulkondritterne er kondenseret direkte ud af sol-nebulaen på mindre end 50.000 år, og måske på endnu kortere tid. Kulkondritterne kan muligvis fortolkes som "udbrændte kometkerner". Man har fundet et stort indhold af grafit og biomolekyler i kulkondritter (f.eks. *Allende*).

Blandt disse biomolekyler er en lang række *aminosyrer* (essentielle for proteiner) fundet og visse af baserne i *makromolekylerne* RNA og DNA.

Et overblik over alle processerne er vist nedenfor:



Figur 4. Vigtigste reaktionsveje for stoffets udvikling fra gasserne brint og helium via stjerner, kometer og planeter. Hver kasse indeholder dele fra tidligere kasser. Læseren befinder sig i den nederste kasse. Illustration frit efter [3].

Box 4. Solsystemets opbygning i dag.

Vort eget solsystem kan forstås ved at inddele det i 3–4 dele, vi tager det udefra og ind i samme rækkefølge som det blev dannet (tallene i parentes angiver afstandene i astronomiske enheder d.v.s. Jordens afstand fra Solen):

Oortskyen (ca. 100–70.000 AE):

Herfra stammer de langperiodiske kometer.

Kuiper-bæltet (ca. 25–100 AE):

Herfra stammer de kortperiodiske kometer, nogle is-måner omkring de ydre planeter samt Pluto.

Gasgiganterne (5–30 AE):

Neptun, Uranus, Saturn og Jupiter.

De terrestriske klippeplaneter (0,39–5 AE):

Asteroiderne, Mars, Jorden, Venus og Merkur.

De store gasplaneter Neptun, Uranus, Saturn og Jupiter er blevet dannet i så stor afstand fra solen, at de har kunnet få en tyk atmosfære af gas. Gassen er tilført fra en tilvækstskive af gas og støv som den man kan se i Orion-tågen, figur 3c.

De inderste planeter, Mars, Jorden, Venus og Merkur, blev dannet så tæt inde omkring solen, at de flygtige gasser fordampede; kun metaller og klipper kondenserede ud. Der er sandsynligvis først dannet flere "foster-planeter" af størrelse fra Merkur til Mars. Asteroidbæltet (mellem Jupiter og Mars) er rester fra planetdannelsen, et slags "overskudslager" af over 100.000 småplaneter.

Jordens radioaktive indre

I Jordens indre var der oprindeligt ret betydelige mængder aluminium-26 med en halveringstid på 700.000 år. Det var en væsentlig varmekilde til at gøre Jorden flydende – og rund!

Derefter har uran-235 ($\tau_{1/2} = 700$ mio. år) og kalium-40 ($\tau_{1/2} = 1,3$ mia. år) været væsentlige og i dag er det isotoper med længere halveringstider, uran-238 ($\tau_{1/2} = 4,5$ mia. år) og thorium-232 ($\tau_{1/2} = 14$ mia. år), som er ansvarlige for den fortsatte geologiske aktivitet, som f.eks. jordskælv, vulkaner og kontinentaldrift. Bjergkæder som f.eks. Alperne og Himalaya er resultatet af "nylige" sammenstød (indenfor 60 mio. år) mellem kontinentalplader.

Jorden og månen

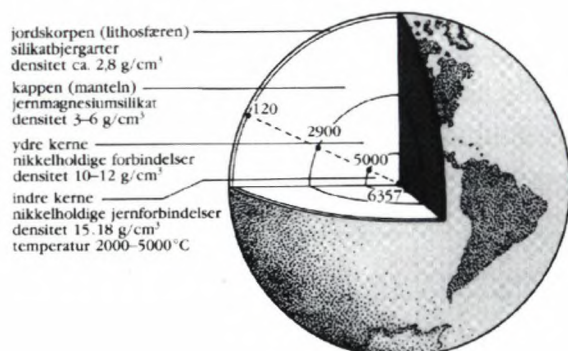
Mens Jorden langsomt blev opbygget ved hjælp af tyngdekraften faldt asteroider og kometer ned og tilførte både metaller, klipper og vand-is. Der blev omsat enorme mængder *potentiell energi til varme* og Jordens temperatur kom op på flere tusinde grader, 4–6000 K. Sammen med henfaldet af radioaktive isotoper blev Jorden flydende og tyngdekraften formede den sfærisk.

Månen blev sandsynligvis dannet ved, at den unge Jordklode kolliderede med en fosterplanet på størrelse med Mars. Da de yderste dele af begge kloder blev til

Månen har man en forklaring på Jordens relativt store metallerne og Månens relativt lille metallerne.

Jordens grundstofsammensætning

Jorden har en grundstofsammensætning hvoraf 93% af massen udgøres af de fire grundstoffer jern, ilt, magnesium og silicium. Omkring 99% af massen findes i kernen og kappen. Den ca. 20 km tynde⁴ jordskorpe udgør den sidste 1% bestående af vulkanske klipper eller *metaloxider*⁵ Bjælken, under figur 5, angiver fordelingen af grundstoffer for hele Jorden. Bemærk at *kulstof*, som alt liv er baseret på, er i så ringe mængde at den ikke er synlig!



Figur 5. Jordens opbygning i dag. Oprindeligt lå alle kontinenter samlet ved sydpolen i superkontinentet *Gondwana*. Tætheden ind gennem Jordens forskellige lag er også angivet.

35% Fe (jern)	28% O (ilt)	17% Mg (magnesium)	13% Si (silicium)	Nikkel Svovl Andre
-------------------------	-----------------------	------------------------------	-----------------------------	---------------------------------

Andre, primært: Co, Na, Mn, K, Ti, P og Cr.

Hvor gammel er Jorden?

Jorden er 4450–4550 mio. år gammel. Denne alder bygger på datering, ved isotopforhold, af de ældste meteoritter, idet de første klipper på Jorden er blevet nedbrudt af pladetektoniske processer. De fleste klipper er yngre, “kun” 2200–2800 mio. år [7].

De til dato ældste fundne klipper på Jorden er 3850–3900 mio. år gamle *oceanbunde*, som er foldet op ved overfladen ved en række lokaliteter, bl.a. Grønland⁶. Man kan sammenligne med alderen af Månens overflade som er bestemt ved, at aktiviteten stoppede for samme 3900 mio. år siden.

Jordens tidlige udvikling

Der forløb 6-700 mio. år fra Jordens dannelse, hvor overfladen var dækket af et lavahav, til der var kontinenter, oceaner og en atmosfære.

De vigtigste opvarmningsprocesser som var med til at holde jordskorpen flydende er:

- **Kollisionsvarme/bombardement.**
- **Radioaktive henfald.**
- **Dannelsen af Jordens kerne.**

Bombardementet af asteroider og kometer fortsatte med at gennembryde den tynde jordskorpe og gnidningsvarmen fra nedslagene smeltede klipperne.

Henfaldet af aluminium-26, med en halveringstid⁷ på $7 \cdot 10^5$ år opvarmer klipperne som derved holdes flydende. På 7 mio. år, svarende til 10 halveringstider, er aktiviteten af aluminium-26 faldet til under 0,1% og andre isotoper har taget over. Den store mængde magnesium i Jorden skyldes bl.a. disse henfald. Sol-nebulaen skal være dannet ret kort tid efter at en supernova, eller rød kæmpestjerne, har produceret og spredt det radioaktive aluminium-26.

Dannelsen af Jordens kerne indledtes, da den hurtigt roterende flydende stenkugle begyndte at differentiere i stoffer med tungere og lettere vægtfylde. Mens de lette klippearter søgte opad, faldt metallerne jern og nikkel, samt urenheder af bl.a. svovl, nedad (se figur 5). Herved blev der frigjort så meget energi, at temperaturen steg yderligere 2000 K [8].

Dannelsen af oceanerne og atmosfæren

Jordens hydrosfære består af H₂O med en række salte⁸ opløst. Hydrosfæren udgør 0,0250% og atmosfæren udgør 0,0001% af Jordens totale masse, $6 \cdot 10^{24}$ kg.

For 4000 mio. år siden var Jordens overflade formentlig stadig et “lava-hav” og kunne ikke bære et ocean. For 3900 mio. år siden var der havbundssedimenter og dermed også oceaner.

Hvis vandet i oceaner og indeni Jorden skal forklares med f.eks. kometer alene, kræver det af størrelsesordenen 1–10 mio. kometer, der hver er 10 km i diameter.

Stoffet fra kometerne kan sagtens være ophobet indeni Jorden under Jordens dannelse og senere frigjort gennem vulkan-lignende “udgasning”.

Livets oprindelse

I 3700 mio. år gamle grønlandske klipper, der stammer fra havbundssedimenter, har man fundet et ¹³C-isotopindhold der kunne tyde på biologisk oprindelse [9]. De ældste fossiler som *med sikkerhed* skyldes levende organismer er 3500 mio. år gamle.

Vi har nu indkredset livets oprindelse til perioden 3700-3900 mio. år siden. *Før* denne periode var Jorden formentlig stadig et lava-hav. *Efter* denne periode var der en vrimmel af liv, i form af *anaerobe svovlsure*

⁴Månens skorpe er ca. 50 km, hvilket skyldes større afkøling.

⁵For eksempel: SiO₂ (kvarts), Al₂O₃, CaO, FeO, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O o.s.v.

⁶Grønland, Norge/Sverige, Sibirien, Sydamerika-Afrika, Australien-Antarktis (bindestreg angiver, at kontinenterne har hængt sammen).

⁷Henfaldet sker dels ved positron-emission (82%): $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \beta^+$ og dels ved elektron-indfangning (18%): $e^- + ^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \nu_e$.

⁸Bl.a. NaCl, MgCl₂, MgSO₄, CaSO₄ og K₂SO₄.

bakterier der bredte sig som store puder. De ligger nu begravet som klipper over det meste af Jordens overflade. Dette kunne tyde på, at når de rette betingelser er tilstede og livet først vinder fodfæste, så breder det sig overalt hvor der er næring!

Intet liv uden næringsstoffer og det oprindelige urhav har været rigt på svovl og salte tilført af vulkaner (undersøiske og oversøiske) og mere afdæmpede vulkanske kilder. Nutidige eksempler på disse fænomener er *black smokers* ("sorte skorstene") og *hydrothermal vents* ("varmtvandshuller" eller geysere).

Geotermisk varme – andre himmellegemer

De bedste kandidater blandt planeter eller måner, udover Jorden, hvor livet kunne findes er: Mars, Venus og Europa.

Mars er afkølet betydeligt mere end Jorden p.g.a. dens lille størrelse. Overfladetemperaturen som i gennemsnit er ca. -53°C sænkes yderligere p.g.a. af den større afstand fra Solen.

Venus har en kompliceret geologi og en varm og tæt atmosfære. Men planeten er interessant fordi den minder så meget om Jorden i størrelse. Kan der findes bakterielt liv i undergrunden? Skyldes svovlsyren i atmosfæren i virkeligheden tidligere liv som er blevet kvalt ved den stadige oxidering af svovl?

Omkring Jupiter findes to måner, Io og Europa, som har usædvanlig stor aktivitet på overfladen. I begge tilfælde skyldes det opvarmning på grund af tidevandskræfterne fra kæmpeplaneten Jupiter og månerne indbyrdes.

Io er den mest aktive af Jupiters måner. Den har vulkaner og en atmosfære med bl.a. frosset svovldioxid, men selv om svovl kan producere energi ved oxidering, så er manglen på kulstof i store mængder nok skæbnesvanger for eventuelt organisk liv på denne lille måne. *Europa* er i denne forbindelse mere interessant.

Europa



Figur 6. Is-månen Europa med sprækker på overfladen.

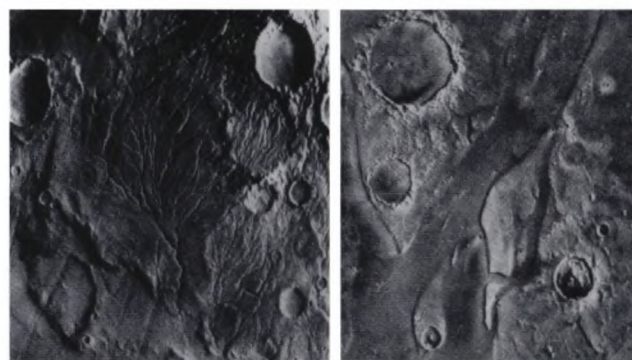
Strukturerne i isen på overfladen af Jupiter-månen Europa skyldes, at isen er sprækket og frosset gentagne gange, næsten som "pak-is" ved f.eks. Grønland. Varmen der driver denne vedvarende proces skyldes efter alt at dømme tidevandskræfterne fra Jupiter og de øvrige måner.

Hvis varmen der frigøres er nok til, at det ca. 300 km tykke lag is kan brydes helt oppe ved overfladen, kan man forvente, at noget af isen er smeltet i bunden. Her i bunden af en tyk iskappe kunne man tænke sig, at finde betingelserne for at livet kunne opstå.

På Jorden findes organismer der kan modstå det høje tryk. Men er gnidningsvarmen tilstrækkelig til at starte processen? Solens lys og ultraviolette stråling finder man næppe så langt nede og godt fem gange længere væk fra Solen end Jorden er strålingsmængden per m^2 i forvejen reduceret til knap 4%.

Vand eller is på Mars

Vand er en absolut betingelse for liv som vi kender det. På Mars, som jo på en række punkter minder om jorden, er der tydelige spor af en strømmende væske på planetens overflade:



Figur 7. Detaljer på overfladen af Mars. Til venstre: Dendritisk netværk af kanaler der samler vand fra et bjergområde til en flod i lavlandet. Til højre: En over 100 mio. år gammel udtørret flod? [11].

Alt tyder på, at det var flydende vand, men det er væk i dag. Mars' tynde atmosfære består af 95% CO_2 , Mars' polkalotter er mest CO_2 -is (tøris) men dog med lidt vand-is, se [12]. Det mest oplagte bliver, at vandet trængte nede i undergrunden i forbindelse med en større temperaturnedgang. Temperaturen på Mars svinger i dag mellem ca. 20 og -140°C med en gennemsnitstemperatur på ca. -53°C . Hvorfor er der koldt på Mars? Det er der flere grunde til.

Dels gør *afstanden*, at Mars kun modtager ca. 43% så meget stråling fra Solen pr. m^2 som Jorden og dels er der *størrelsen*. Mars har en radius der er godt halvdelen af Jordens. Det betyder for det første, at afkølingen er foregået hurtigere, idet *forholdet mellem overflade og rumfang* er større for et mindre legeme (knap to gange større). For det andet har Mars ikke så mange radioaktive isotoper i kappen. For det tredje kan Mars ikke holde på så stor en atmosfære (trykket er 0,01 atm.). En tykkere atmosfære ville holde bedre på varmen.

Selv om alle disse forhold betyder, at overfladen af Mars er dybfrossen ned til omkring 1 km [10] så kan der stadig findes vand i undergrunden og Mars er et oplagt sted at søge efter liv, også selv om vandet måtte findes som "permafrost".

At Mars har (eller har haft) et varmt indre, viser vulkankraterne på Mars' overflade. Mest imponerende⁹ er *Olympus Mons* som hæver sig 24 km over den omkringliggende overflade. Udfra tællinger af nedslagskratere er det for nylig bestemt [11], at Olympus Mons nok kun¹⁰ er 100 millioner år gammel. I dag antages Mars at være geologisk "inaktiv", men det kan være en kortere eller længere pause.

Vandet kan være forsvundet ved, at vandmolekylerne er spaltet i brint og ilt (ved ultraviolet stråling) hvor brinten er drevet væk fra den lille planet. Noget af vandet er højst sandsynligt gemt under overfladen som *permafrost*. Polkalotterne kunne også indeholde noget vand. Men da polkalotterne varierer i størrelse med årstiderne og atmosfæren primært består af CO₂, må en væsentlig del af isen være CO₂-is (læs mere om "Is på Mars" i artiklen af Janus Larsen i dette nummer af KVANT [12]). Det vand-is der ligger i polregionerne kan også være tilført senere via komet.

Fossilt liv i Mars-sten?

Der er stadig debat om hvorvidt der er fundet spor af fossilt liv i den berømte Mars-meteorit, ALH 84001. Men det eneste der virkelig tæller i denne sammenhæng er hvis astronauter, eller tilstrækkeligt snedigt konstruerede robotter, foretog en såkaldt *sample-return-mission*. Hvis man fik bragt en sten hjem fra Mars, der med sikkerhed stammer fra en af de udtørrede flodlejer, vil nulevende bakterier eller *fossilt liv* fortælle os hvorvidt livet er enestående på Jorden eller ej.

De strukturer man har fundet i ALH 84001 minder om jordisk liv men er ca. 10 gange mindre og stenen kan meget vel være forurenset med jordisk liv i de ca. 13.000 år Mars-stenen lå på Antarktis. Kulstof-14 indholdet svarer ikke til det man ville forvente på Mars, men snarere til meteoritter af kondrit-typen eller jordisk. Som "bevis" for liv på Mars står det for tiden svagt. Debatten kan følges på [13].

I næste artikel vil vi se på molekyler i det interstellare medie. Kometernes kemi bliver belyst og vi prøver at give et bud på hvordan "de første livskim" kan have set ud.

Referencer:

- [1] M. C. Andersen (1998) "On The Origin of Life in the Solar System. Written report", *Kernesyntese, Stjernernes udvikling og Solsystemets dannelse*, NBIfAFG. www.astro.ku.dk/~cramer/papers/life/
- [2] C. F. Chyba og G. D. McDonald (1995) "The Origin of Life In The Solar System", *Current Issues. Annu. Rev. Earth Planet. Science*, bind 23, side 215-49.
- [3] Yuk L. Yung og William B. DeMore (1999) "Photo-

chemistry of Planetary Atmospheres". Oxford University Press.

- [4] Michel Mayor og Didier Queloz (1995) "A Jupiter-mass companion to a solar-type star". *Nature*, bind 378, 23 November.
- [5] Space Interferometry Mission, <http://sim.jpl.nasa.gov/>
- [6] P. J. Thomas, C. F. Chyba og C. P. McKay (Red.) (1997) "Comets and the Origin and Evolution of Life". Springer-Verlag.
- [7] Vagn F. Buchwald (1992) "Meteoritter – nøglen til Jordens fortid". Gyldendal.
- [8] "Encyclopedia of Planetary Sciences" (1997) Red. af J. H. Shirley og R.W. Fairbridge. Chapman & Hall.
- [9] Minik T. Rosing (1999) "¹³C-Depleted Carbon Microparticles in >3700-Ma Sea-Floor Sedimentary Rocks from West Greenland". *Science*, bind 283.
- [10] J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen og Andrew Chaikin (1999) "The New Solar System". Sky Publishing/Cambridge University Press (4. udgave).
- [11] John S. Lewis (1995) "Physics and Chemistry of The Solar System". Academic Press.
- [12] Janus Larsen (2000) "Is på Mars", Dette nummer af Kvant.
- [13] On the Question of the Mars Meteorite, http://cass.jsc.nasa.gov/lpi/meteorites/mars_meteorite.html



Michael Cramer Andersen, specialestuderende i astronomi ved NBIfAFG, hvor han arbejder med Mælkevejens dynamiske udvikling. Han er desuden interesseret i fundamentale problemer indenfor naturvidenskab.



Arne Damm, studerende ved NBIfAFG, læser astronomi i kombination med andre fag.

⁹Tyngdekraften er kun 40% af Jordens. Placerede man et 24 km højt bjerg (3 × Mount Everest) på Jorden, ville det "flyde ud".

¹⁰Tidligere antog man, at Mars har været geologisk "død" i 1-2 mia. år.