

## Hvad er liv?



Når vi skal lede efter liv andre steder i universet, er det naturligvis nødvendigt at få hold på, hvad det egentlig er, vi søger. Det har bl. a. afgørende betydning for, hvilket apparatur vi skal installere i en rumsonde, som skal undersøge, om der er liv på en anden klode. At satse på et kamera, der kan se små grønne mænd, er nok af tvivlsom værdi.

Det er ikke helt let at give en entydig definition på liv – her på jorden findes utroligt mange livsformer, og de fleste af dem er mikroskopiske og umiddelbart ganske usynlige for os. Flere gange kan man være i tvivl – hvad med et tørt radisefrø? Og i astrobiologisk sammenhæng er det værd at pointere, at vi kun er i stand til at karakterisere den slags liv, som vi selv er en del af.

Traditionelt set kan man kende et levende væsen på, at det kan optage næring, omsætte næringsstofferne og udskille affaldsstoffer – det kan vokse og formere sig, og måske kan det også bevæge sig. Over flere generationer kan det desuden sammen med sine artsfæller udvikle nye funktioner og måske også udseende. Men alt dette gælder jo de livsformer, vi kender i dag – om de tidligste ”organismer” reagerede helt på samme måde, ved vi faktisk ikke.

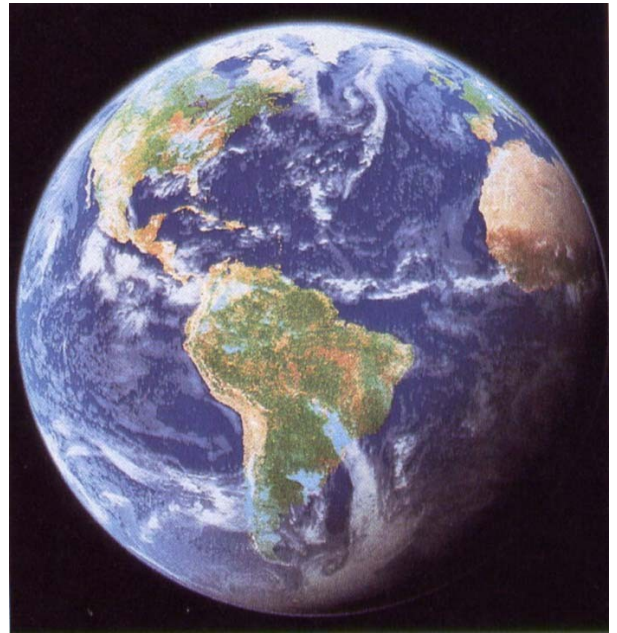
Desuden kan man blive forvirret af, at fx mineralske krystaller kan ”formere” sig ved at danne kopier af sig selv, hvis de går i stykker. Mange kemiske reaktioner kan forløbe, så de danner en cyklus, som indgik de i et ”stofskifte”, og molekyler kan ”bevæge” sig ved fysisk diffusion.

En forskningsgruppe under NASA kom i 1994 med en reduceret og meget generel definition på

liv: - *Et kemisk system, der er underlagt en darwinistisk evolution.* Her er der plads til mange muligheder, men fælles for alle er kravet om, at organismene over generationer skal kunne ændre sig gradvist og derved tilpasse sig forskellige miljøforhold.

## Hvad er betingelserne for liv?

Igen må vi i første omgang vurdere sagen ud fra det kendskab, vi har til liv på jorden.



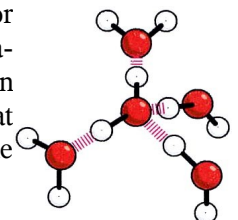
### Grundstoffer

Liv er en slags kompliceret kemi. Alt levende er bygget op af carbonforbindelser med de 6 grundstoffer C, H, O, N, P og S som langt de væsentligste (over 99 % af levende cellers vægt) – mange andre af grundstofferne er dog også nødvendige.

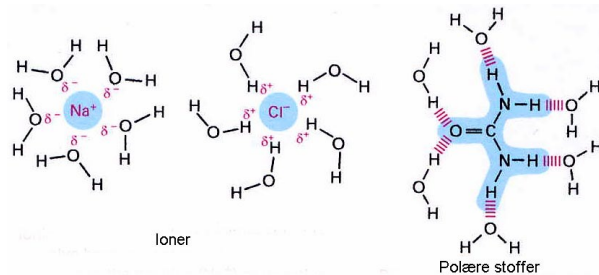
### Vand

Flydende vand er det bedste opløsningsmiddel, vi kender, for de vigtigste molekyler, der optræder i cellerne, og for de kemiske reaktioner, der er betingelsen for liv – cellers vandindhold er oftest over 60 %. Det hænger især sammen med, at vandmolekyler er små og polære, dvs. at de har en positiv og en negativ ladet side.

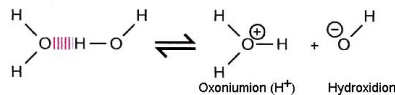
Vandmolekylerne kan derfor hægte sig sammen med såkaldte brintbindinger til en netstruktur, der er med til at give vand nogle særlige fysiske egenskaber.



Vandmolekylernes polære egenskaber betyder også, at de kan opløse salte til adskilte ioner, som de vil omgive, ligesom de kan knytte sig til andre stoffer, som er polære, fx glucose og aminosyrer. Vand har således stor betydning for aminosyrekæders korrekte foldning i proteiner.



Endelig er vand en forudsætning for stoffers sure og basiske egenskaber, idet protoner og hydroxidioner er i ligevægt med vandmolekylerne i en opløsning.



### Temperatur

Kravet om flydende vand sætter grænser for temperaturen. Under 0 °C vil vand være fast is og stofskiftet gå i stå, da molekylbevægelsen bliver for langsom. Iskristaller kan desuden ødelægge cellerne. Ved 100 °C vil vandet gå på gasform, men inden da vil mange af cellernes molekyler gå i stykker, bl. a. protein. Protein er hovedbestanddelen i enzymer, de særlige stoffer, som katalyserer de biokemiske processer i cellerne. Ødelægges enzymerne, dør cellerne. Det meste liv, vi kender, fungerer bedst ved temperaturer under 40°, jf. vores egen kropstemperatur på 37 °C.

### Tryk

Trykket har også betydning for livets oprettholdelse. Med faldende atmosfæretryk sænkes vands kogepunkt, og vandet fordamper. Et højt tryk øger kogepunktet, men det kan også deformere celler og hæmme livsprocesserne.

### Energi

Alt levende har brug for energi. Jordens biosfære får tilført energi gennem planternes *fotosyntese*, der udnytter lysenergi i et meget snævert bølglængdeområde mellem ca. 400 og 700 nm. De fleste andre organismer får energi ved at

nedbryde de stoffer, som planterne har bygget op ved fotosyntesen. Mange bakteriearter kan dog lave en *kemosyntese*, dvs. at de i stedet for at udnytte lysenergi får energi til deres stofopbygning ved at oxidere uorganiske stoffer som H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S eller NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

### Stråling

Levende celler er således meget afhængige af det synlige lys, men er til gengæld sårbare over for andre former for stråling. Ultraviolet stråling omkring 260 nm absorberes kraftigt af dele af DNA-molekylet og forårsager mutationer. Hos mennesker kan dette være årsag til hudkræft - bakterier og andre mikroorganismer slås ihjel af kraftig UV-stråling. Normalt absorberes UV-strålingen af atmosfærens ozonlag, der igen er betinget af atmosfærens O<sub>2</sub>-indhold.

Ioniserende stråling som kosmisk stråling, gamma- eller røntgenstråling er skadelig for celler, fordi den slår især vandmolekyler i stykker og omdanner dem til ioner og frie radikaler som OH<sup>•</sup>. Frie radikaler reagerer let med større molekyler i cellerne, fx DNA, og skaber derved mutationer eller påvirker biokemiske reaktioner.

Alle levende væsner er påvirket af en vis dosis stråling her på jorden og har derfor udviklet reparationsmekanismer som forsvar mod stråleeffekter. Det gælder således skader på DNA-molekylet, men normalt kun til en vis dosisgrænse.

### pH

En sidste væsentlig faktor, som har indflydelse på de biokemiske processer, er pH. I cellernes indre holdes pH normalt omkring 7, og hvis den afviger herfra, vil mange molekyler ændre ladning, og stofskifteprocesserne forstyrres. Betydningen kan ses af, at pH i vores egen krop holdes omkring 7,40. Hvis den ændres med blot 0,1, bliver vi alvorligt syge.

## Livet på grænsen

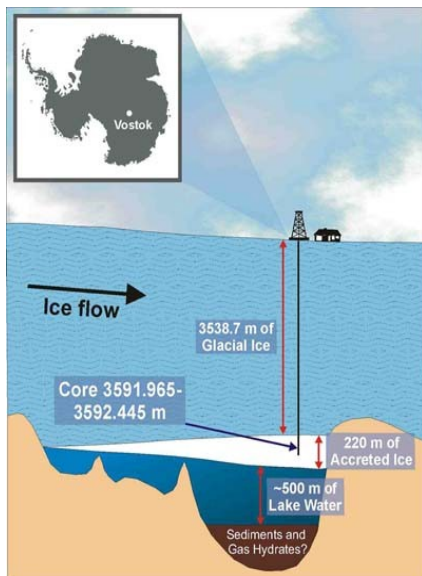
Umiddelbart skulle vi nu tro, at livsbetingelserne var ret snævert definerede, og at hvis vi skulle finde liv på en anden planet, måtte dens miljø stort set ligne jordens. Det ville nok gøre det usandsynligt i det mindste inden for vores eget solsystem.

Imidlertid har vi i de seneste årtier fundet levende organismer i miljøer, der leverer helt ekstreme vilkår. De fleste af disse såkaldte *ekstremofiler* ("elsker det ekstreme") hører til prokaryotgruppen<sup>1</sup> *Archaea* [ar'kæa], som man regner med udviklingsmæssigt ligger relativt tæt på de oprindelige former for mikroorganismer.

Begge kendsgerninger har gjort astrobiologerne mere optimistiske, fordi de øger chancerne for, at tilsvarende organismer kunne findes på barskere planeter end jorden.

### Kulde

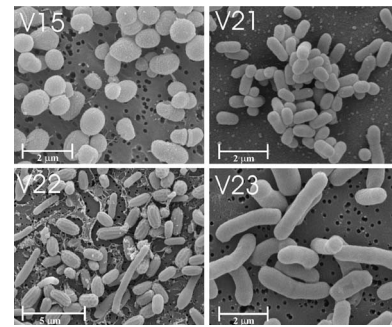
I polarområderne kan man finde prokaryoter, svampe og alger, som lever på, inden i eller under isen eller i permafrosen jord. De kan således formere sig ved 0 °C eller lavere (havvand fryser ved -2,5 °C). I den permafrosne sibiriske tundra vokser bakterier ved -10 °C.



Ved den russiske Vostok-base har man boret over 3600 m ned gennem den antarktiske is og her fundet mikroorganismer som vist på næste figur.

(<http://www.brent.xner.net/research.htm>; Louisiana State University)

1: *Prokaryoter* er mikroorganismer uden kerne, dvs. bakterier og archaeer (se appendiks 1)

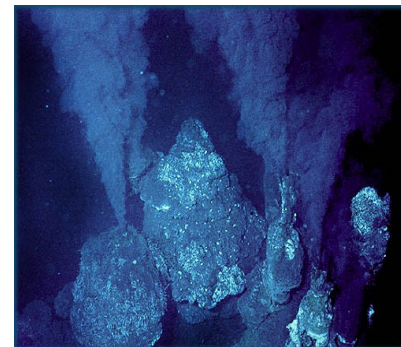


Forskellige mikroorganismer fundet i den nederste del af isen under Vostok-basen på Antarktis.

Disse mikroorganismers proteiner er særligt sammensat, så de fungerer ved den lave temperatur, og deres cellemembraner indeholder en særlig stor andel af umættede fedtsyrer, som holder sig flydende i kulden. Mange mikroorganismer kan overleve en kraftig nedfrysning, men deres stofskifte standser da midlertidigt.

### Varme

I varme kilder lever flere forskellige bakterie- og archaearter ved temperaturer omkring vands kogepunkt (*thermofile*). Archaeen *Pyrolobus* vokser på ydersiden af "black smokers"<sup>2</sup> i Stillehavet. *Pyrolobus* kan overleve ved 113 °C,



"Black smoker" på bunden af Stillehavet

men foretrækker det lidt køligere omkring 106 °C - ved 90 °C dør den af kulde! Den senest fundne rekordindehaver er fra samme gruppe og kan øjensynlig vokse ved 121 °C!<sup>3</sup>

Der forskes meget i, hvorfor disse organismer kan klare temperaturer, som hurtigt ville slå de fleste andre levende væsner ud. Enzymproteinerne ser ud til at være meget kompakt

2: "Black smokers" er undersøiske vulkaner, der sender mineralrigt, 350 °C-varmt vand op fra jordens indre – udover mikroorganismer lever der i deres nærhed en særpræget samling dyrearter.

3: Husk at trykket på havbunden kan være adskillige hundrede atm., og at vands kogepunkt derfor er over 100 °C.

byggede med nogle indre ionbindinger, som øger varmemestabiliteten. Desuden er de omgivet af et stort antal *chaperoniner*, særlige proteiner, der reparerer andre proteiner. Cellemembranens fedtstof består især af mættede fedtsyrer eller – som hos Archaeaerne – en helt anden type hydrocarboner opbygget af isopren. Andre specialproteiner beskytter DNA-dobbeltspiralen, som normalt vil ”smelte” til to enkeltstrengene ved temperaturer over 90 °C.

Så vi har her et fint eksempel på, hvordan i det mindste mikroorganismer kan udvikle deres kemiske sammensætning og fysiologi til at fungere i et ekstremt miljø. Alligevel mener forskerne, at de nævnte prokaryoter må ligge ret tæt på det fysisk mulige, fordi de termiske bevægelser ved den høje temperatur ”slider” kraftigt på molekylerne i cellerne. Fx bliver et vigtigt stof som ATP meget ustabil, når vi nærmer os 150 °C.

### Vand

I ørkenområder kan man finde mikroorganismer (prokaryoter og svampe), som trives med så godt som intet vand i omgivelserne – nogle af dem bruger glycerol som opløsningsmiddel i cellerne.

Men vandmangel i cellerne kan også opstå rent fysiologisk, nemlig hvis organismene lever i en stærk saltopløsning, som på grund af osmose trækker vandet ud af dem. Dette forhold har man i umindelige tider udnyttet, når man fx salter kød for at konservere det, idet rådbakterier og skimmelsvampe vil dehydreres og dø.

I saltsøer som Great Salt Lake i USA lever ekstremt *halofile* (saltelskende) prokaryoter, som kan tåle en saltkoncentration på 20-30 % (havvand indeholder 3,5 % salt). Også de fleste af disse tilhører gruppen Archaea.

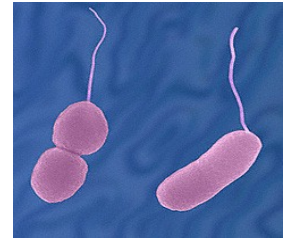


Røde halofiler på saltskorpe.

*Halobacterium* klarer sig ved at pumpe  $K^+$ -ioner ind i cellerne,  $Cl^-$  følger med, og på den måde kan bakterien opbygge en saltkoncentration inde i cellen, som er lige så høj som koncentrationen uden for. Cellerne er da i osmotisk ligevægt med omgivelserne og mister ikke vand. Pumpeprocessen kræver meget energi, der opfanges som lysenergi af et rødt farvestof i cellemembranen. Saltsøer kan derfor være farvet helt røde af bakterier i overfladen.

### Røde saltbakterier

(*Vibrio parahaemolyticus*)



Inddampningsfelter til produktion af havsalt. Felterne er i varieret grad farvet røde af mikroorganismer.

Undertiden er sådanne saltsøer meget basiske (alkaliske) med pH op mod 11. Bakteriercellerne kræver et indre miljø, som ligger tættere på neutral, og derfor kompenserer de ved at pumpe  $H^+$ -ioner ind i cellen.

### Tryk

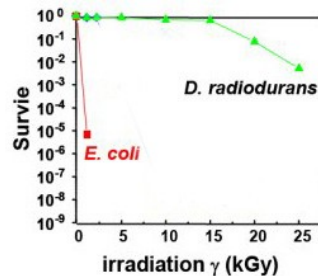
På bunden af oceanerne lever der mikroorganismer også i de dybeste områder, dvs. under et tryk på op til 1000 atm. Disse ekstremt *barofile* kræver et højt tryk for at kunne vokse, øjensynligt fordi visse af deres gener kun ”tændes” under tryk.

Tilsvarende er der registreret liv dybt begravet i klipper. I varmt grundvand i en 2,8 km dyb sydafrikansk guldmine har man fundet termofile

prokaryoter, som må kunne tåle et anseligt tryk. Energi henter de ved at reducere sulfat med hydrogen, begge stoffer dannes ved langsomt henfald af radioaktive grundstoffer i klippen.

## Stråling

Hvis man dyrker bakterier fra jord, støv eller lignende og derefter bestråler dem med intenst UV-lys, vil de typisk blive dræbt – men tilbage bliver undertiden nogle lyserøde kolonier af bakteriearten *Deinococcus radiodurans*. Denne art er ekstremt hårdfør over for stråling, ikke blot UV, men også gammastråling, og man har således fundet den i reaktorer på kernekraftværker! Den kan overleve en strålingsdosis op til 30.000 Gy, som normalt slår et bakteriekromosom i stumper og stykker – et menneske kan dø af en dosis på under 5 Gy.

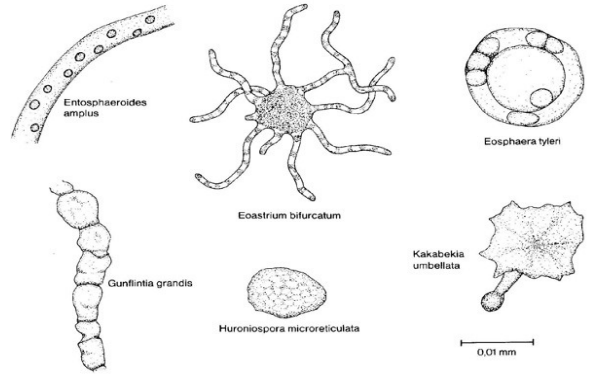


*Deinococcus* – overlevelse som funktion af  $\gamma$ -strålingsdosis sammenlignet med *E. coli*. (<http://www.exobio.cnrs.fr/>)

*Deinococcus* har udviklet et utroligt effektivt enzymesystem til at reparere DNA-skader, selv når det drejer sig om at samle brudstykker af DNA-molekylet. Et af midlerne er, at den øjensynligt indeholder flere kopier af sit genom i bakteriecellen. Man har spekuleret på, i hvilket miljø den har udviklet en sådan strålingstolerance – måske er der i virkeligheden tale om en sideeffekt til en tilpasning til ekstrem tørke.

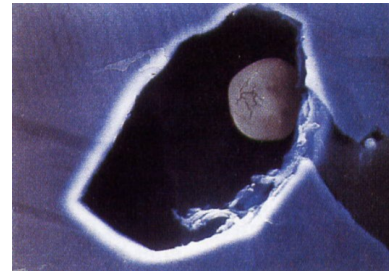
## Det første liv

De ældste fossiler af noget, der ganske sikkert har været levende organismer, er fundet i 2,1 mia. år gamle flintaflejringer i Canada og USA. Der er tale om mikroorganismer: trådformede bakterier, encellede alger og svampelignende tråde. Mellem flinten er der rødlige jernlag, der anses som tegn på en iltholdig atmosfære – altså har nogle af mikroorganismene kunnet foretage fotosyntese.



Fossile mikroorganismer fra Gunflint-formation i Canada (Bonde m. fl.: *Naturens historiefortællere*, Gad 1996)

Men måske finder vi det hidtil ældste spor af liv i Grønland – i de 3,8 mia. år gamle Isua-klipper i nærheden af Nuuk er der fundet kugler af kulstof. Fordelingen af isotoperne  $^{12}\text{C}$  og  $^{13}\text{C}$  tyder på, at de er dannet ved en levende proces som fotosyntesen.



Mikroskopisk kulstof-kugle i klippemateriale fra Isua (fra *Den Store Danske Encyklopædi*)

Jorden blev født af stjernestøv for omkring 4,6 mia. år siden. I løbet af den første halve mia. år var den særdeles ugæstfri med en gloende hede, voldsomme kometnedslag og mægtige vulkanudbrud. Tolkes Isua-fundet rigtigt, vil det sige, at kloden blev beboet med former for mikrobielt liv i løbet af nogle få hundreder mio. år. Der skulle så gå over 3 mia. år, før dette udviklede sig til lidt større og forskelligartede organismer, som også ville være nogenlunde genkendelige i dag – men det er en historie for sig.

Hvordan opstod det første liv? Det vil man nok aldrig kunne få sikkert indblik i, spørgsmålet kan kun besvares med en teori. Og med mindre man tror på en guddommelig skabelse, må den som alle andre videnskabelige teorier skulle kunne sandsynliggøres ved, at den er i overensstemmelse med iagttagede fakta, og kan tåle at blive testet eksperimentelt.

### Panspermia

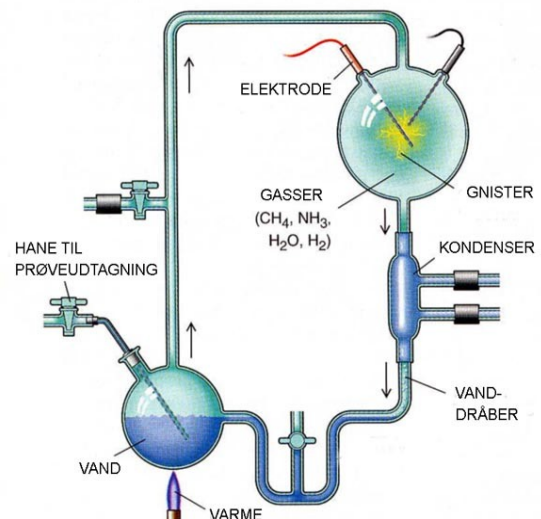
I 1908 fremsatte den svenske kemiker Arrhenius den ide, at liv var opstået tidligt i universet, og med solvind fra stjernerne var det blevet spredt over hele kosmos, bl. a. til Jorden. Denne *panspermia-hypotese* (panspermia = "sæd overalt") har fascineret mange lige siden – tildels nok fordi den umiddelbart fjerner mange forklaringsproblemer og samtidigt stimulerer fantasien om liv på andre kloder. Hvis vi skulle finde organismer på Mars, der har ligheder med former, vi kender på Jorden, kunne det være en bekræftelse på hypotesen.

Imidlertid har hypotesen nogle svagheder. Jorden modtager meget materiale fra rummet – nogle beregninger anslår "regnen" til at udgøre 20.000 t pr. år. Alligevel er det endnu ikke lykkedes at finde verificerede spor af organismer i meteoritter, heller ikke centrale molekyler som RNA eller DNA, men man har identificeret en del aminosyrer og mange andre mindre organiske molekyler. Man har indsamlet støv i den øverste del af atmosfæren – meget af det er "komet-støv" – men i intet tilfælde har der været indikationer på mikrobielt liv. Mange astrobiologer mener, at det er ret usandsynligt, at organismer ville kunne overleve det særdeles hårde strålingsmiljø i verdensrummet i længere tid. Andre er mere optimistiske, idet eksperimenter med bakterier i rummet har vist, at mange faktisk overlever stålingen på en rumrejse helt fint. Men selv om en overlevende, fremmed mikroorganisme eller et stykke DNA skulle dumpe ned i en samling vand på Jorden, er det jo slet ikke ensbetydende med, at der begyndte at være liv i den. Panspermia-hypotesen har stadig enkelte fortalere, måske især i populærvidenskabelige kredse. En diskussion herom kan se på netsiderne <http://www.google.com/search?hl=en&q=panspermia+site:nai.arc.nasa.gov> og [www.panspermia.com](http://www.panspermia.com).

Endelig kan man sige, at panspermia ikke giver nogen egentlig forklaring på, hvordan livet er opstået, men blot skubber problemstillingen bagud og derfor er intellektuelt utilfredsstillende.

### Suppegryden

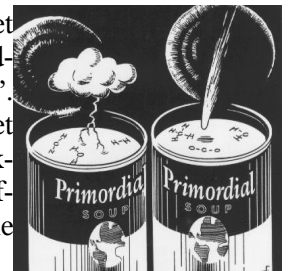
I de seneste mange årtier har der derfor været overvejende enighed om, at livet er spiret frem på Jorden. Mange ser som en forudsætning en tidlig ophobning af simple organiske forbindelser i vand. Regnen af meteoriter, der som nævnt ovenfor kan indeholde en del forskellige organiske stoffer, herunder nogle aminosyrer, har sandsynligvis bidraget væsentligt hertil. Men kulstofforbindelser kunne måske også dannes med udgangspunkt i jordens tidlige atmosfære, der bestod af  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  og vanddamp og mindre mængder  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  og  $\text{H}_2\text{S}$ . (Det er vigtigt at lægge mærke til, at den unge atmosfære var  $\text{O}_2$ -fri – den var kemisk reducerende, dvs. rig på hydrogen.) Elektriske udladninger som lyn kunne levere energi til en kemisk syntese af organiske stoffer ud fra disse bestanddele. At det kan lade sig gøre, blev eftervist af kemikerne Miller og Urey i 1953 med en laboratorieopstilling som vist på figuren nedenfor. Efter nogle dages kørsel indeholdt det kogende vand bl.a. forskellige aminosyrer og carboxylsyrer.



#### Miller's eksperiment

(efter L. E. Orgel, *Scientific American*, 271-4, Oct. 1994)

Således har man forestillet sig, at vandet på Jorden udviklede sig til en "ursuppe". Men den har nok været særdeles tynd, og de reaktioner mellem kulstofforbindelserne, som kunne føre til levende systemer,



er sandsynligvis foregået i mere isolerede områder, fx knyttet til overfladen af lerminerale, på skumhinder eller nær varme kilder på havbunden – områder, der kunne føre til en opkoncentrering af stofferne.

## Liv i suppen

Men et er af have en samling organiske stoffer, noget andet er at få dem organiseret i et samarbejde til de første, primitive levende celler. Vender vi tilbage til definitionen på liv og vores kendskab til celler, kan vi se, at de kræver et system, der kan levere energi, og udviklingen af vigtige molekyler som RNA, DNA og proteiner, som er ansvarlige for styringen af cellens biokemiske reaktioner og dens formering. Desuden skal alt dette foregå isoleret fra omgivelserne, dvs. at der skal udvikles en membran, der afgrænser systemet til et selvstændigt individ (se nærmere nedenfor).

I mange år er der ført en ”hønen-eller-ægget”-diskussion om, hvad der opstod først, fordi der er mange teoretiske dilemmaer på området. Et eksempel: proteiner fungerer som enzymer og er således forudsætningen for, at DNA kan syntetiseres og kopieres – men DNA indeholder opskriften på proteinernes sammensætning!? Således er der fremsat membran-først hypoteser, protein-først hypoteser, energistofskifte-først hypoteser osv. Her skal der kun gennemgås to mulige scenarier, der i dag er stillet frem som de mest plausible. Begge indeholder dog stadig ret store huller i deres sammenhæng.

## RNA-verdenen

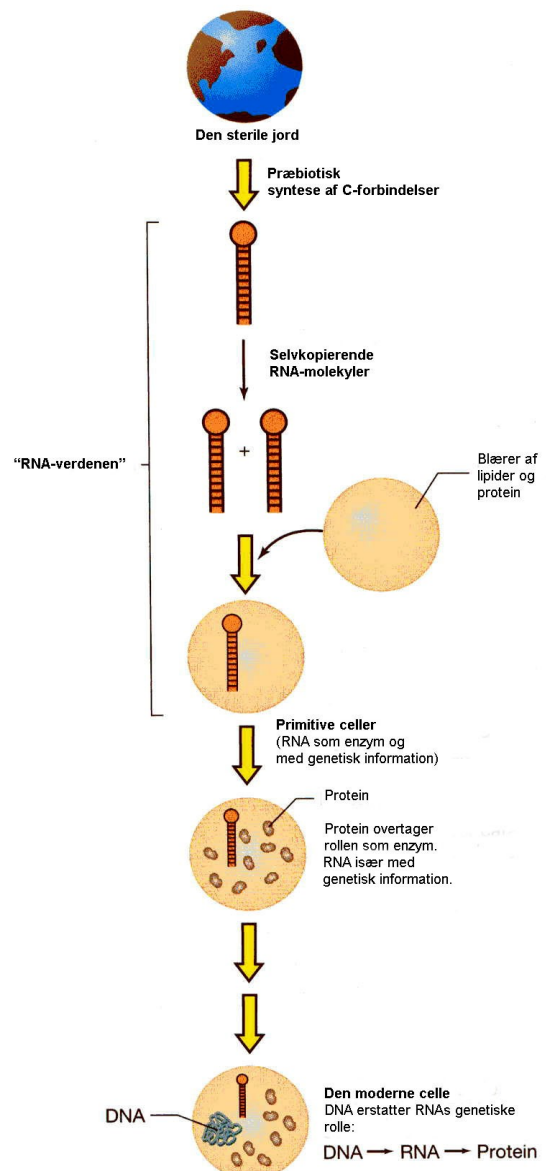
Primitive former for liv må dels have været i stand til at katalysere biokemiske processer ved hjælp af en form for enzymer, dels have indeholdt et genetisk system, der kunne styre en korrekt formering. Hverken protein eller DNA kan hver for sig udføre begge disse funktioner, og det er vanskeligt at forestille sig, at to så komplicerede stoftyper uden videre kunne dannes i ”ursuppen” for derefter at fungere i sammenhæng.

Imidlertid har det vist sig, at RNA kan klare begge dele. RNA har en enzymeffekt (fx i ribosomerne) og kan skære og sammensplejse andre RNA-stykker. Desuden kan RNA jo indeholde en genetisk information, som det stadig gør som budbringer mellem DNA og proteinsyntesen, og lave kopier af sig selv. Flere vigtige medspillere i cellens stofskifte, de såkaldte coenzymmer som fx ATP, er bygget op omkring et RNA-nukleotid.

Således forestiller man sig, at der er opstået primitive organismer omkring RNA-molekyler, der kunne lagre genetisk information, kopiere sig selv og udføre en basal styring af et energistofskifte. Små forbedringer i form af ændringer i baserækkefølgen, der gjorde systemet mere effektivt, blev automatisk ført videre til de næste

generationer, en evolution kunne altså finde sted.

Undervejs i forløbet, måske fra starten, har de nævnte stoffer samlet sig i små blærer af fedtstoffer. Mange forsøg har vist, at vandige opløsninger af lipider, proteiner og andre store molekyler har en tendens til at danne blærer, fordi deres overflade har både hydrofile og hydrofobe afdelinger. I laboratorier har man påvist, at RNA gerne knytter sig til overfladen af lerminerale, og tilsætter man fedtsyrer, lægger de sig som en hinde omkring mineralerne og RNA. På den måde kan den vigtige forudsætning for et levende systems individualitet, nemlig celledannelsen, være opstået.



Livets udvikling ifølge RNA-først hypotesen.

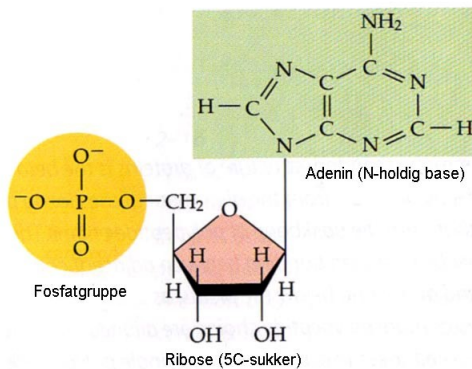
(efter Madigan m. fl.: Brock-Biology of microorganisms)

Det har sikkert været ret sent, at DNA er ”opfundet” som bærer af cellens genetik – det er et mere stabilt, men også mere kompliceret opbygget molekyle end RNA. Er DNA-nukleotiderne til stede sammen med de rette enzymer, kan det

imidlertid let syntetiseres som en kopi af RNA's information. Stabiliteten har sikret den genetiske information bedre og derfor været en evolutionær fordel (se appendiks 2).

### Liv-med-små-molekyler-hypotesen

RNA er bygget op som kæder af 4 forskellige nukleotider, der igen består af en N-holdig base, sukkerstoffet ribose og fosfat.



RNA-nukleotidet adenosinfosfat (= AMP)

Ingen nukleotider eller lignende molekyler er blevet fundet hverken i meteoritter eller efter et udladningseksperiment som Miller's. Ganske vist er det lykkedes i laboratoriet på anden vis at danne et par N-holdige baser ud fra simple stoffer som HCN og urinstof, men under nogle betingelser, der har været højst usandsynlige i "ursuppen". Disse og andre indbyggede svagheder har gjort, at RNA-hypotesen i de senere år har mødt stigende skepsis. En kritiker har sagt, at chancen for, at et RNA-molekyle skulle opstå spontant i "ursuppen", svarer til, at en golfkugle selv spiller sig igennem en 18-huls bane ved hjælp af naturkræfter som jordskælv, storme, tornadoer og oversvømmelser. Det er altså i princippet ikke fysisk umuligt, men...!

Det er dog væsentligt at bemærke, at det lange geologiske tidsspand er en faktor, som er vanskelig for os at erkende. Begivenheder, der på baggrund af vores normale horisont synes helt usandsynlige, er måske ikke umulige "under evighedens synsvinkel".

Alligevel er en del forskere begyndt i højere grad at fokusere på udgangspunktet: hvordan kan en form for liv udvikle sig i det oprindelige miljø med dets små molekyler? – end på slutmålet: hvordan er levende celler, som vi kender dem i dag, opstået?

Overvejelserne kan stilles op til at dreje sig om 5 behov:

### 1. Vi skal have en grænse, der kan adskille liv fra ikke-liv.

Termodynamikkens 2. lov fortæller, at alle strukturer i universet bevæger sig fra orden til ikke-orden – entropien stiger. Kun i lukkede systemer kan der midlertidigt skabes mere orden, fx gennem en syntese af komplicerede stoffer ud fra simple småmolekyler. Omkostningen er varmeafgivelse. I moderne celler sørger cellemembranen for afgrænsningen, ved livets begyndelse kunne mineraloverflader, jernsulfidmembraner, vanddråber eller lignende uorganiske forekomster have fungeret som det isolerende rum.

### 2. Vi skal have en energikilde, som kan få processen til at forløbe.

Levende organismer er mellemlid i en energistrøm. De udnytter fri energi fra omgivelserne i form af lysenergi eller potentiel kemisk energi. Fotosyntesen har krævet et kemisk maskineri, der sandsynligvis ikke har været mulig fra begyndelsen. Derimod har den unge klode kunnet stille et kemisk potentiale til rådighed i form af reducerede stoffer som  $H_2$ ,  $H_2S$  eller  $FeS$ , fx i forbindelse med varme kilder på havbunden (hydrotermale væld - se nedenfor).

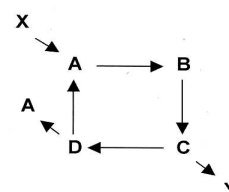
Redox-reaktioner, der indebærer en overførsel af elektroner fra et elektronrigt (reduceret) stof til et elektronfattigt (oxideret) stof, er stadig basale for livet på Jorden, og mange prokaryoter får deres energi fra oxideringen af uorganiske stoffer. Fx oxiderer *Methanobacterium* – som hører til archaeaer'ne –  $H_2$  med  $CO_2$ , hvorved der dannes  $CH_4$ .

### 3. Vi skal kunne overføre energi, frigjort fra en redox-reaktion, til processer, der opbygger liv.

Koblingen kræver en fælles mellemkomst, som kan overføre energien – i alle moderne celler er det især stoffet ATP (et RNA-nukleotid!) i samarbejde med et enzym. Oprindeligt kan det have været en primitiv uorganisk katalysator.

### 4. Vi skal have dannet et netværk af kemiske processer, der kan tilpasse sig og udvikle sig.

Et sådant netværk kunne opstå som et auto-katalytisk kredsløb af organiske stoffer, koblet til en energileverende redox-reaktion:





Hvis stoffet X hele tiden tilføres og bindes til A, og "affalds"-produktet Y fjernes fra systemet, vil A kunne gendannes og opformeres via B, C og D, forudsat at processen  $X \rightarrow Y+A$  giver et fald i fri energi. Laboratorieforsøg har vist, at simple kemiske systemer kan have denne egenskab. Ændrede miljøet sig, fx ved en pH-ændring, kunne et af stofferne i kredsløbet hobe sig op, indtil en ny rute var etableret. På denne måde kunne der udvikles et kemisk netværk og nye stoffer blive dannet. Et eksempel på et sådant netværk er citronsyre-cyklus i nutidige cellers respirationsproces.

### 5. Netværket skal kunne vokse og formere sig

Diffusion af ophobede stoffer væk fra det afgrænsede rum, eller af affaldsstoffer på gasform, vil dræne systemet for stof. Derfor må det udvikle omsætningsveje og -hastigheder, som kompenserer herfor, hvis det skal overleve.

Endelig må det "opfinde" en måde at formere sig på. Hvis det er omsluttet af en membran, kan det splittes i to, når det har multipliceret sig og får større krav til den fysiske plads. Eller hvis det har til huse i hulheder i porøse mineraler, kan overskud flyde ind i naborum.

Sidste skridt er frisætningen til selvstændige enheder, fritlevende celler, som må konkurrere med hinanden om energi og føde. Og hermed er banet vej til et liv med en stadig tilpasning til omgivelserne og en darwinistisk evolution.

### Hypotesen konkretiseret

Overvejelser som de ovennævnte er baggrunden for en del forskeres undersøgelser i dag. Som et illustrerende eksempel vises her en hypotese hentet fra en artikel af William Martin og Michael J. Russell<sup>4</sup>. Se figuren på næste side.

Livet opstod for ca. 4 mia. år siden i tilknytning til hydrotermale væld på havbunden, nærmere bestemt i grænseområdet mellem varmt, basisk, reduceret og sulfidholdigt jordskorpevand og det køligere, mere oxiderede og sure havvand.

Her optrådte nemlig over geologisk set lang tid en temperatur- og pH-gradient samt et redox-potentiale, der kunne levere energi til kemiske reaktioner mellem organiske molekyler. Samtidig leverede det varme vand fra jordskorpen gasser som CO, H<sub>2</sub> og N<sub>2</sub> sammen med reducerede stoffer som NH<sub>3</sub>, CN<sup>-</sup>, HS<sup>-</sup> eller CH<sub>3</sub>SH.

På havbunden blev udfældet FeS (jern-2-sulfid), der på grund af de udsivende gasser blev porøs med små blærer – man har fundet sådanne strukturer som fossile små "skorstene" fra de varme væld og har genskabt dem i laboratoriet.

Blærerne kunne fungere som de isolerende rum, hvor et kemisk system kunne udvikles ved hjælp af en elektronstrøm og energitilførsel fra den konstante redox-gradient, der omgav dem.

Hypotesen argumenterer for et primitivt stofkredsløb med methylthioacetat (CH<sub>3</sub>COSCH<sub>3</sub>) som et centralt molekyle, fremkommet med jern (FeS) og nikkel (NiS) som katalysatorer. Stoffet er nært beslægtet med acetyl-coenzym A, der er et knudepunkt i moderne cellers biokemi. Laboratorieeksperimenter har eftervist nogle mulige veje hertil.

Med dette udgangspunkt kunne der skabes en syntese af forskellige organiske stoffer som forløbere for RNA, protein, ATP og DNA – alt sammen stadig i jernsulfidblæernes beskyttende miljø. Endelig udvikledes forskellige typer fedtstof til dannelsen af en egentlig cellemembran, og først da gjorde cellerne sig fri fra jernsulfidlaget på havbunden.

### Og hvad skal vi så mene?

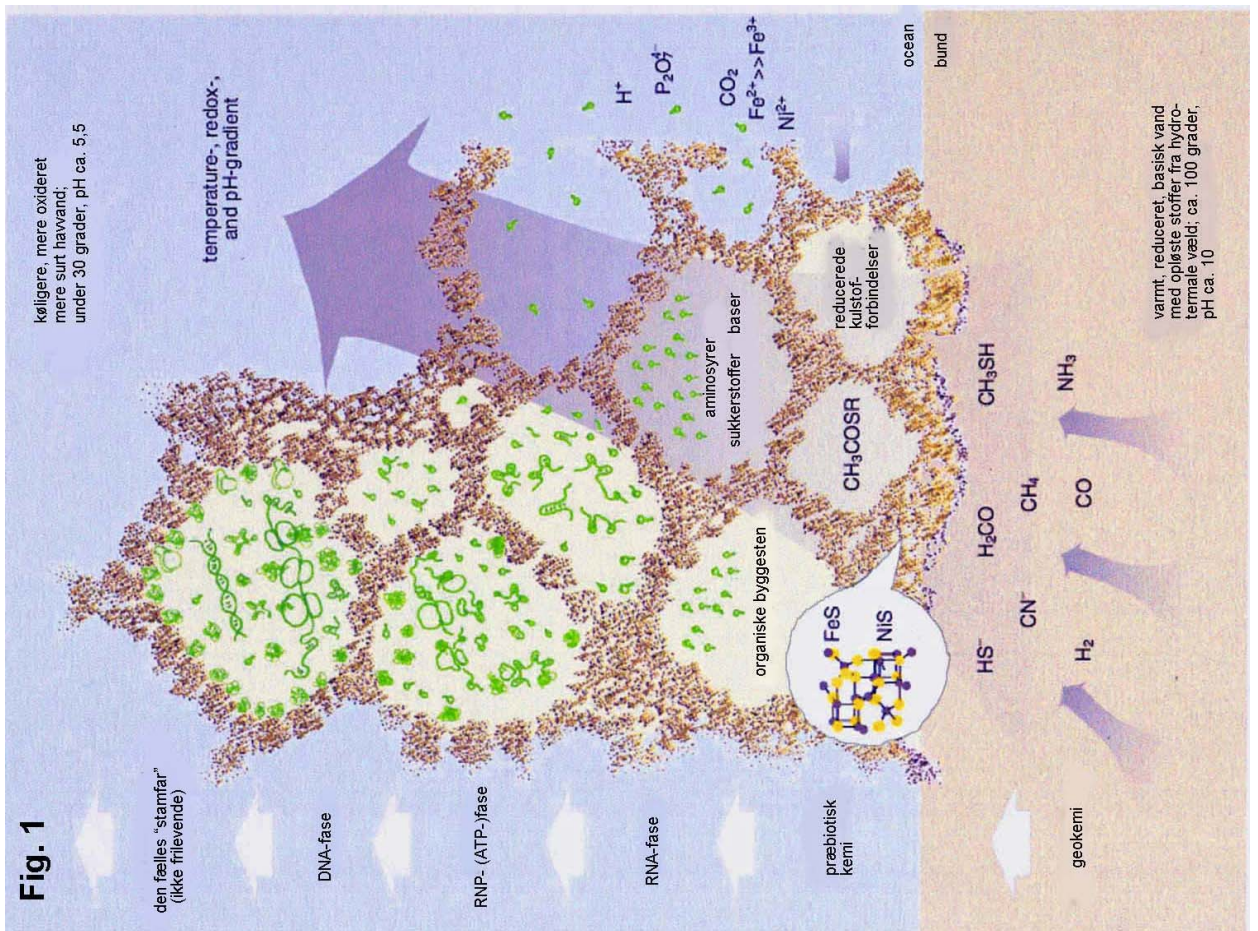
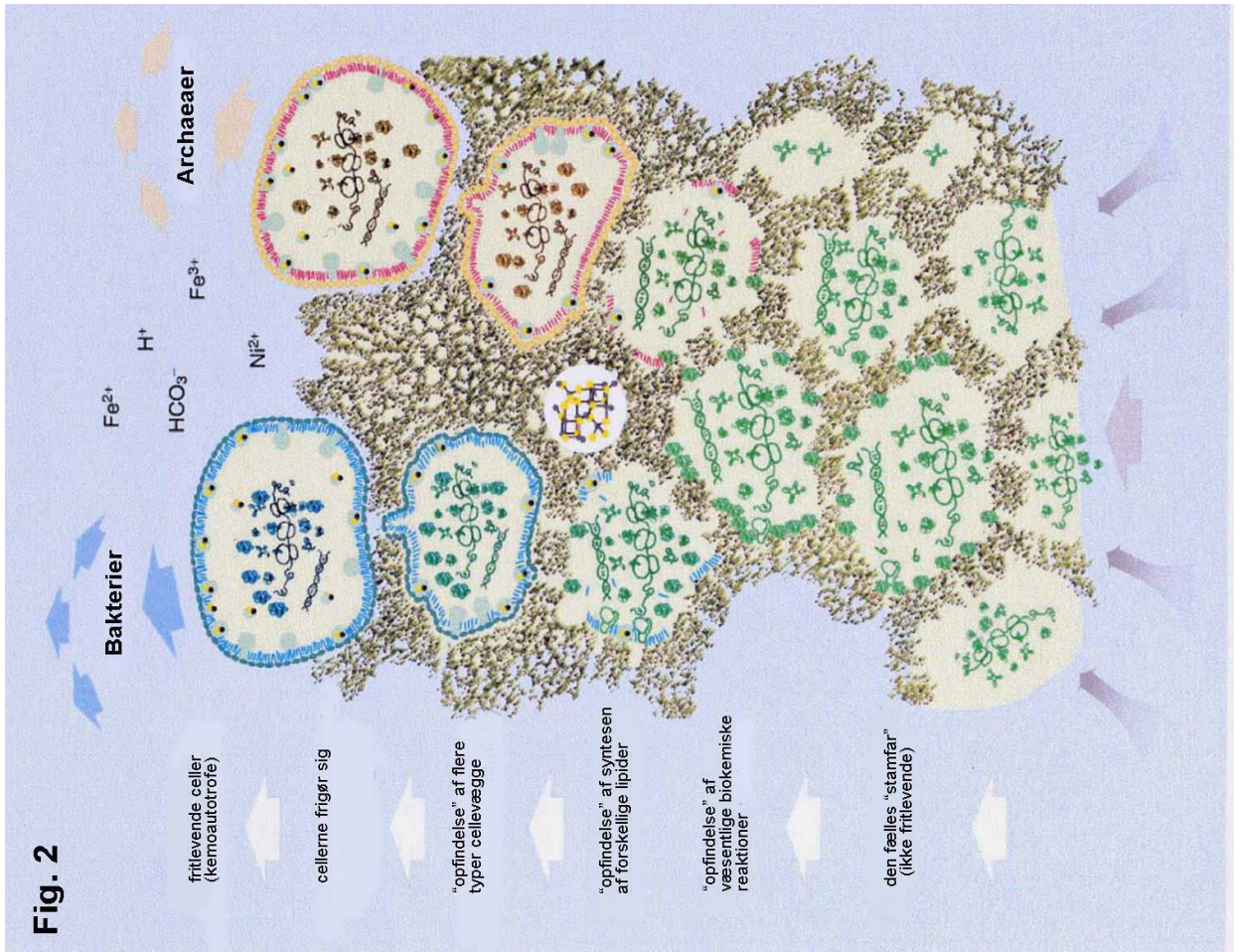
Det er jo tydeligt, at livet-med-små-molekyler-hypotesen leverer en forklaring, der glider over i en RNA-verden. Forskellen ligger i fokuseringen på, at de fysiske-kemiske forhold i særlige miljøer på den unge jord har kunnet igangsætte nogle kemiske reaktionsmønstre, der gennem en trial-and-error proces har udviklet sig til noget på en gang kompliceret og vedholdende. Grænsen mellem, hvornår vi kan tale om livløs kemi og den levende organisme er således flydende.

Den beskrevne hypotese udelukker heller ikke, at organiske stoffer tilført med meteoriter har haft betydning. Måske er de indgået fra processens begyndelse, måske har de induceret dannelsen af lignende molekyler.

På næste side er hypotesen skitseret. Fig. 1 viser udviklingen mod et grundlæggende levende system i den fælles "stamfar". Fig. 2 viser, hvordan udviklingen senere – stadig i små kamre i jernsulfiden – splittes op i to retninger, især defineret af forskellige typer cellemembranmateriale. Så ved frigørelsen får vi to typer mikroorganismer: de egentlige bakterier og archaeaerne.

Det er væsentligt at bemærke, at figuren skal forstås som et tids- og udviklingsforløb over flere hundrede millioner år.

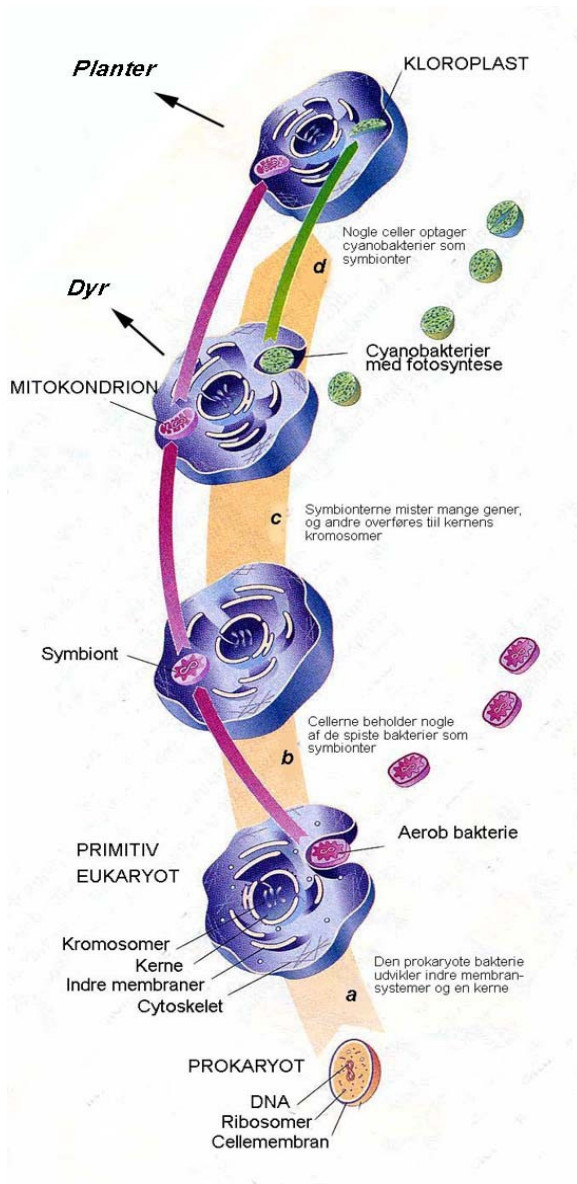
<sup>4</sup> Martin, W. & M. J. Russell (2003): On the origin of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic procaryotes, and from procaryotes to nucleated cells. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 358, 59-85



**Livet derefter**

Som nævnt har man fundet spor af liv i 3,8 mia. gamle klipper. Fossile stromatolitter, pudeformede dannelser skabt af cyanobakterier, som kan foretage fotosyntese, er fundet i 3,5 mia. gamle aflejringer. De første eukaryoter, dvs. celler med en kerne, dukker op for omkring 2 mia. år siden. Hermed er grundlaget skabt for den ekspansion af livsformer, der har præget Jorden siden. Men det er værd at bemærke, at de første livsformer – bakterier og archaeer – med stor succes har overlevet lige til i dag parallelt med de mere spektakulære plante- og dyrearter, som har afløst hinanden i de seneste 5-600 mio. år.

Evolutionshistorien skal ikke gennemgås her, kun kort en hypotese om udviklingen af de eukaryote celler:

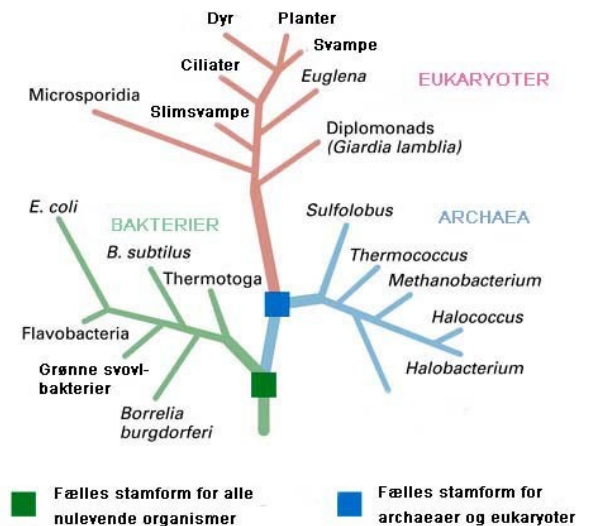


*Endosymbiont-hypotesen (efter W. F. Doolittle, Scientific American 282-2, Febr.2000)*

Ud over en kerne finder man i eukaryote celler også mitokondrier og hos planteceller desuden kloroplaster (grønkorn).

Meget tyder på, at disse vigtige organeller oprindeligt har været fritlevende bakterier, der har valgt at leve inde i andre mikroorganismer i en såkaldt endosymbiose. Mitokondrierne, der i cellerne har en vigtig funktion i respirationsprocessen, har oprindeligt været aerobe bakterier, og planternes grønne korn er efterkommere af cyanobakterier (= blågrønne alger). De to organeltyper indeholder stadig deres eget cirkelformede DNA-molekyle, og også andre molekylære særtæk vidner om deres slægtskab med bakterier. Desuden kender vi efterhånden mange andre symbiotiske forhold, hvor bakterier spiller en afgørende rolle, fx de nitrogensamlende knoldbakterier i bælgplanterets rødder.

Således er cellernes sofistikerede funktioner i nutidens planter og dyr, herunder os selv, skabt ud fra et samarbejde mellem ældgamle, primitive celletyper.



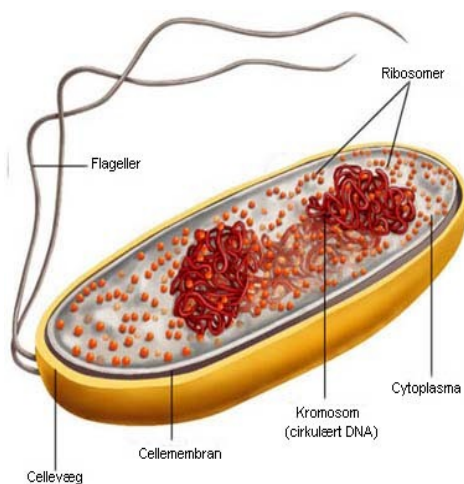
*Stamtræ, der viser et muligt evolutionært slægtskab mellem de tre organismegrupper. Relationen mellem archaea'er og bakterier er under diskussion.*

## Appendiks 1

### Prokaryoter og eukaryoter

Af gode grunde kender vi ikke detaljerne i de tidligste cellers strukturer og funktion. Men fossilfund viser, at for 1,5-2 mia. år siden begynder der at optræde en kerne i cellerne. Vi taler derfor om prokaryote ("før kerne") og eukaryote ("med kerne") celler. I dag finder vi stadig prokaryoter, nemlig archaea'er og bakterier, mens alle andre organismer er eukaryoter.

*Prokaryoterne* er små encellede organismer, der normalt er under 2  $\mu\text{m}$  lange. En bakteriecelle er relativt simpelt opbygget, men dens biokemiske funktion kan alligevel være ret kompleks.



Bakteriecellen er omgivet af en cellemembran og en ydre væg bestående af kulhydrat og aminosyrer. Cytoplasmaet (cellevæsken) indeholder opløste stoffer, enzymer og ribosomer. De sidstnævnte er små partikler, der er sammensat af protein og RNA – her foregår proteinsyntesen. Der findes op til 10.000 ribosomer i en celle. Bakteriens genetiske materiale er et kromosom, dannet af et cirkulært, nøgent DNA-molekyle. Herudover kan findes små cirkulære DNA-stykker, som kaldes plasmider og som kan udveksles med andre bakterier.

Mange bakterier kan bevæge sig ved hjælp af en eller flere roterende flageller. Hver flagel består af et enkelt, snoet proteinrør.

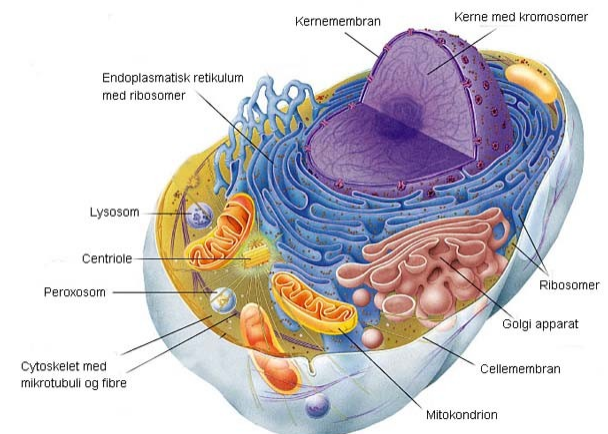
Typisk for bakterieceller er således, at deres indhold af vigtige molekyler som DNA og enzymer ligger øjensynligt ret uorganiseret i cytoplasmaet. Mange enzymer er dog knyttet til cellemembranens inderside, og DNA'et ligger oftest samlet i et bestemt område af cellen.

Archaeaer adskiller sig fra bakterier især ved cellemembranens kemi. Bakteriens membran er sammensat af glycerol og fedtsyrer, ligesom det er

tilfældet hos eukaryoter. Archaeaernes membran indeholder ikke fedtsyrer, men kæder af isoprenenheder.

I begge membrantyper sidder proteiner, som regulerer transporten af stoffer ind i og ud af cellen.

*Den eukaryote celle* er kendetegnet ved at være større og meget mere organiseret, så forskellige funktioner er knyttet til særlige rum (organeller), der er dannet af membranmateriale.



*Dyrecelle. Planteceller er omgivet af en fast væg af cellulose og indeholder desuden grønkorn, men ikke centriole.*

Cellens DNA er viklet op om proteiner og er fordelt på et sæt kromosomer, som er særligt tydelige ved celledelingen. Den samlede mængde DNA (genomet) ligger beskyttet i en kerne.

Som hos prokaryoterne foregår proteinsyntesen på ribosomer, men de fleste af disse er knyttet til en membranstruktur, som kaldes det endoplasmatiske retikulum. De dannede proteiner opsamles i membranrummet, og kan herfra med membranblærer transporteres rundt i cellen eller sendes uden for cellen. De fleste enzymer er ligeledes bundet til membranstrukturer, ofte samlet i "arbejdsenheder".

Den oxidative del af energistofskiftet foregår i mitokondrierne, som er fyldt med de enzymer, der er ansvarlige for respirationen. Mitokondrierne indeholder deres eget cirkulære DNA-molekyle, hvilket tages som et tegn på, at de engang har været selvstændige, aerobe mikroorganismer (se s. 11).

Planternes kloroplaster (grønkorn) er tilsvarende fyldt med fotosyntesens enzymer og desuden det lysabsorberende stof klorofyl. De indeholder også DNA..

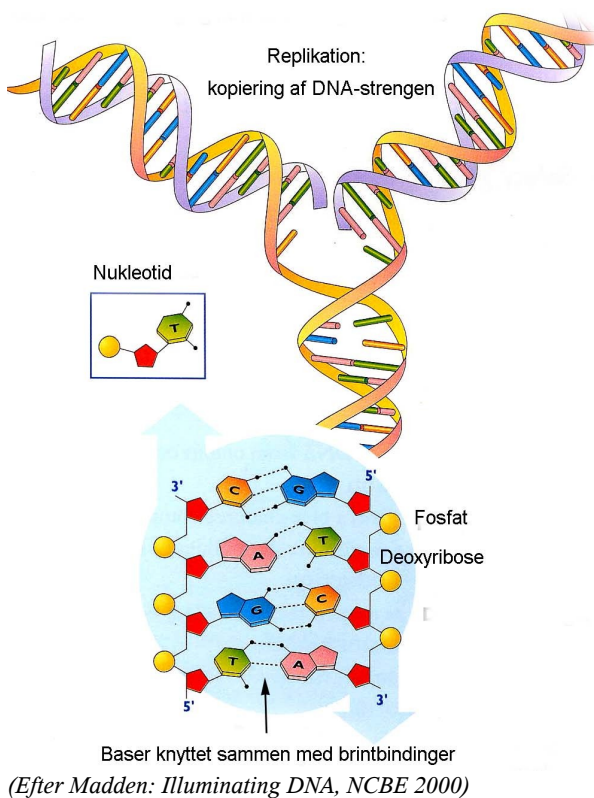
Nogle eukaryote celler bærer flageller (fx sædceller) eller cilier, som er betydeligt mere kompliceret bygget end bakterieflagellen og bevæger sig på en anderledes måde.

## Appendiks 2

### RNA, DNA og protein

Som det fremgår af det foregående, har livet en lang historie. Den har været turbulent undervejs, og den har frembragt myriader af forskellige livsformer – før vi indtil videre står med den samling organismer, vi kender i dag. Betingelsen for, at livet på den ene side har haft mulighed for at frembringe stadig nye forsøg, når levevilkårene strammede til, og på den anden side har kunnet fastholde succesfulde former over mange generationer, har været overskriftens tre typer stof.

Det er **protein** i form af enzymer, som er ansvarlig for, at et befrugtet zebraæg vil udvikle sig til en zebra med dens særlige udseende og funktioner. Opskriften på zebra-celleres enzym-indhold og på balancen i deres funktioner ligger i zebraens genom, dens **DNA**. Og **RNA** spiller en vigtig rolle i kontrollen af genomet og realiseringen af enzymproduktionen.

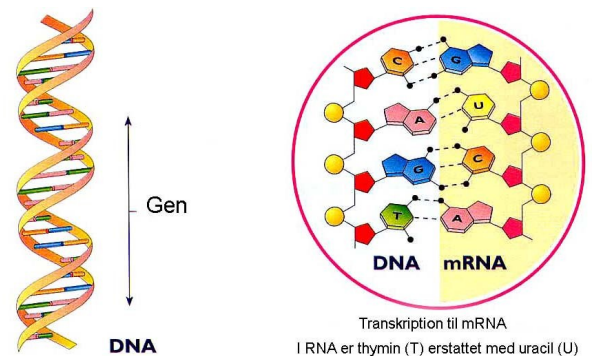


DNA er opbygget af *nukleotider* (se figuren af adeninfosfat s. 8). Hvert nukleotid består af sukkerstoffet deoxyribose, fosfat og en af 4 forskellige baser: Thymin, Cytosin, Adenin og Guanin. Med kovalente bindinger mellem skiftevis sukker og fosfat kan nukleotiderne danne en kæde. Men overfor placerer sig en modsvarende kæde, idet A og T samt G og C kan binde sig løsere til hinanden med brintbindinger. Samlet

danner de to strenge det spiralformede DNA-molekyle.

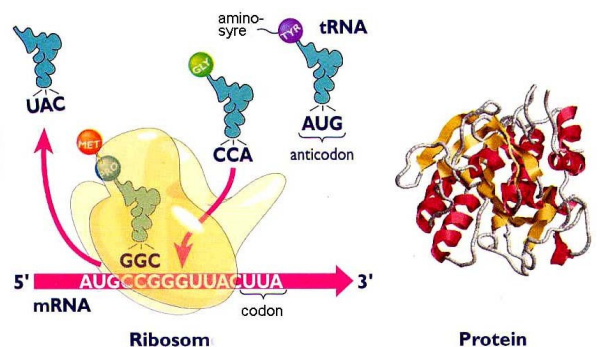
Før hver celledeling vil DNA-spiralen kopiere sig selv til to identiske molekyler, som fordeles på døtre-cellerne. Det sker ved hjælp af et DNA-polymerase-enzym og kan lade sig gøre på grund af den faste baseparring.

Rækkefølgen af baser på en streng indeholder en informationsmængde som bogstaverne her på siden. Et sæt på tre baser (en *triplet* eller *codon*) koder nemlig for en aminosyre, og på den måde bliver en basestrækning (et *gen*) en opskrift på, hvordan et protein skal sammensættes af aminosyrer.



Når cellen har brug for et bestemt protein, vil genet for det aktiveres, dvs. at et enzym ”åbner” DNA-spiralen i den pågældende basestrækning. Her overskrives baserækkefølgen til et RNA-molekyle. RNA er ligesom DNA sammensat af nukleotider – forskellen ligger i, at sukkerstoffet i RNA er ribose, og at basen thymin er udskiftet med Uracil; desuden optræder RNA oftest som en enkelt streng. RNA-kopien af genet kaldes for **mRNA** (m = messenger).

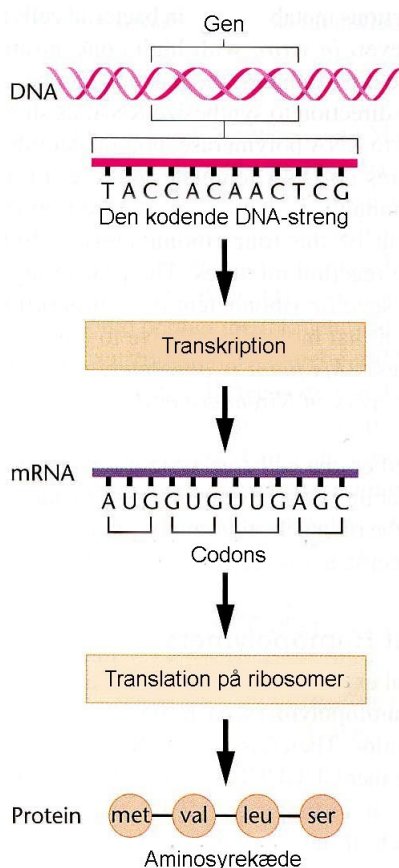
mRNA transporteres til ribosomerne, hvor syntesen af proteinet foregår. Proteiner består af en eller flere lange aminosyrekæder (ofte med flere hundrede a.s.), der efter produktionen vil folde sig sammen til en tredimensional struktur. I proteinerne kan indgå 20 forskellige aminosyrer – det samlede antal og rækkefølgen er specifik for det enkelte protein.



mRNA knytter sig til ribosomet, og nu bliver de enkelte aminosyrer hentet ind og bragt i en rækkefølge, der er bestemt af basesekvensen på mRNA.. Det sker ved hjælp af tRNA-molekyler. De er små, sammenfoldede RNA-stykker, der har den egenskab, at de i den ene ende kan binde sig til en aminosyre, og i den anden har en fri sekvens på 3 baser (en anticodon), der korresponderer til aminosyrens "bestillingscodon" på DNA-genet. I takt med, at mRNA arbejder sig forbi ribosomet, opbygges aminosyrekæden.

Når 4 forskellige baser skal sammensættes i grupper på 3, kan der dannes 64 forskellige codons – men som nævnt bruges der kun 20 forskellige aminosyrer, så mange aminosyrer "bestilles" af flere codons. "Ordbogen", der viser sammenhængen, kaldes for *den genetiske kode*.

Den skitserede forbindelse mellem DNA, RNA og proteinsyntesen omtales undertiden som *det centrale dogme* i biologien:



I princippet er det centrale dogme og den genetiske kode fælles for alt levende på Jorden – uanset om vi taler om "primitive" bakterier eller os selv. Det er således en væsentlig forudsætning for, at vi i dag kan manipulere med gener og fx få en bakteriecelle til at arbejde med et menneskegen.

Det tyder på, at systemet er en gammel opfindelse i den biologiske verden og fra starten har haft en stabil succes. I hypotesen om livets opståen, som beskrives s. 9, tænkes maskineriet bag det centrale dogme da også udviklet allerede hos "den fælles stamfar".

Det er tydeligt at se, at RNA i sig selv kan bære en information om proteiners sammensætning. Da RNA samtidig er simplere end DNA, er dette begrundelsen for, at de fleste forskere ser RNA som det oprindelige genetiske molekyle. Desuden kan RNA-molekyler have enzymatisk funktioner (*ribozymer* findes i eksisterende organismer), og for nyligt er det i et laboratorium lykkedes at udvikle et RNA-enzym, som kan replikere en RNA-streng.

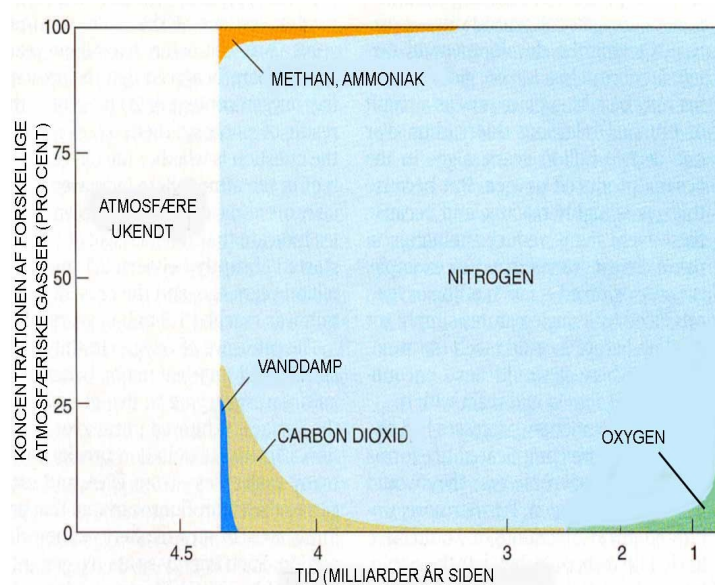
Det foregående giver også indblik i, at en korrekt rækkefølge af baser i princippet er forudsætningen for, at proteinet bliver dannet korrekt. Udskiftes nogle baser – eller ændres antallet – bliver aminosyresammensætningen en anden, og vi får et protein med ændrede egenskaber. En *mutation* er sådan en ændring i baserækkefølgen. I mange tilfælde er en mutation fatal for en organisme, men undertiden giver et lidt ændret protein nogle egenskaber, som kan være en fordel. Dette princip er basis for organismers *evolution* og tilpasning til ændrede miljøforhold.

RNA er på grund af sin struktur og direkte involvering i proteinsyntesen meget udsat for mutationer, og derfor har der været grænser for, hvor kompliceret og ensartet RNA-liv kunne blive. Dobbeltspiralen DNA er kemisk set mere stabil, og ved replikationen er der mulighed for, at der kan foregå en slags "korrekturlæsning" af baserækkefølgen. Så udviklingen af DNA som det bærende genetiske molekyle har klart været en fordel, fordi mutationsrisikoen blev reduceret betydeligt.

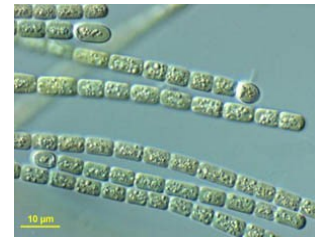
### Appendiks 3

## Oxygen

Oxygenindholdet i vore dages atmosfære er 21 %, og vi regner ilt for en fundamental betingelse for liv. Da jorden blev dannet, opstod atmosfæren af vulkanske gasser, sikkert overvejende  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ , måske også mere reducerende gasser som  $H_2$ ,  $CO$  og  $H_2S$ . Frit oxygen fandtes kun i meget små mængder, fordi den straks ville blive brugt til oxidation af især jern og svovl.



(Efter Allegre&Schneider, *Sci. Am.* 271-4, Oct. 1994)



Cyanobakterier (øverst). Banded iron formation (nederst)

Det var i et sådant anoxisk miljø, at de første organismer opstod. De må have været anaerobe, dvs. i stand til at kunne klare et energistofskifte uden et  $O_2$ -forbrug.

Blandt mikroorganismene finder vi stadig i dag mange former, som får energi fra gæringsprocesser, og som slet ikke kan tåle oxygen i deres omgivelser. Faktisk er ilt et giftigt stof, fordi det sammen med dets frie radikal  $O_2^*$  (superoxidion med en ekstra elektron i yderste skal) er særdeles reaktivt med andre stoffer. Frie radikaler kan føre til ødelæggelse af RNA, DNA, fedtsyrer og andre molekyler, ligesom en række enzymer er meget følsomme over for ilt. Derfor er vores celler vel-forsynet med beskyttende antioxidanter som C- og E-vitaminer.

For mindst 3,5 mia. år siden udviklede nogle bakterier evnen til at udnytte solenergi i en fotosynteseprocess. Der er fundet fossiler af såkaldte *stromatolitter*, der består af kalkholdige lag med cyanobakterier (= blågrønner). Ved fotosyntesen udskiller bakterierne  $O_2$  til omgivelserne. Fra begyndelsen blev ilt som nævnt hurtigt bundet til fx jern, hvad der resulterede i dannelsen af røde jernoxider. Vidnesbyrdet herom er flere hundrede

meter tykke lag af bandede jernmalme (Banded Iron Formations = BIF), som man i dag kan finde mange steder på kloden, og som er dateret til at være 1,9-3,8 mia. år gamle.

Men langsomt blev mængden af fotosyntetiserende organismer i havet større, en del organisk stof blev begravet i sedimenter på havbunden, og iltproduktionen oversteg iltforbruget. Da eukaryoter med effektive grønkorn kom på banen for ca. 1,5 mia. år siden, begyndte fotosyntesen rigtigt at gøre sig gældende. Resultatet blev, at atmosfærens  $O_2$ -indhold steg, så det

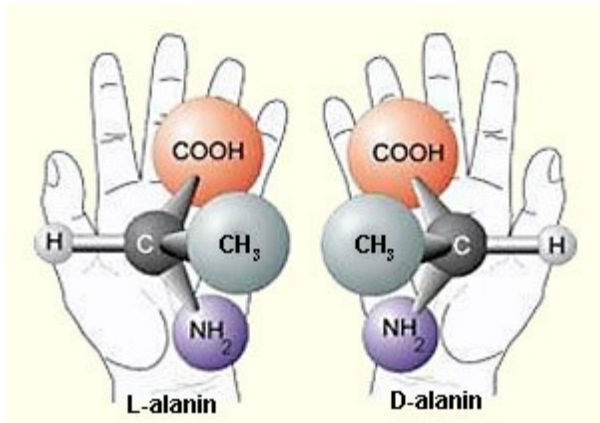
for et par mia. år siden var ca. 1-2 % og for 600 mio. år siden 10 % af det nuværende indhold. Parallelt hermed udvikledes den  $O_2$ -baserede respirationsproces, som energimæssigt er næsten 20 gange så effektiv som den primitive gæring.

Frit  $O_2$  spaltes i den øverste del af atmosfæren af UV-stråling og solpartikler og kombineres igen til  $O_3$ . Denne proces og ozonen i sig selv absorberer UV-stråling. Før ilt ophobedes i atmosfæren, blev jordoverfladen så kraftigt bestrålet af UV, at organismer kun kunne overleve i havet. Med den stigende  $O_2$ -mængde blev landjorden mere gæstfri, og for ca. 400 mio. år siden begyndte den at blive koloniseret – livet gik på land.

## Appendiks 4

### Chiralitet

Et carbonatom, der er bundet til 4 forskellige atomer eller grupper, kaldes asymmetrisk eller *chiralt*. Stoffer med chirale C-atomer kan danne spejlbilleder af sig selv, som det fx ses af figuren med aminosyren alanin. Stofferne er isomere, fordi de har samme bruttoformel, men de har forskellige fysiske og delvist også kemiske egenskaber.



Vi taler her om spejlbilledisomeri eller *optisk isomeri*. Hvis vi sender planpolariseret lys igennem vandige opløsninger af hver af de to former, vil de dreje lyset forskelligt. Traditionelt betegnes de med henholdsvis L (af latin *laevus* – venstre) og D (af latin *dexter* – højre), alt efter om de drejer polariseret lys mod eller med uret (kemikere bruger ofte bogstaverne S- og R-). En blanding af lige dele L- og D-molekyler kaldes *racemisk* og resulterer i en ikke-drejet lysgennemgang – den er altså ikke optisk aktiv. Har man i laboratoriet en opløsning med et anderledes blandingsforhold, vil den efterhånden af sig selv nærme sig en racemisk tilstand.

Oftentimes har optisk isomere former forskellige biologiske egenskaber. Fx findes plantestoffet carvon i både mynte og kommen, men som spejlbilledisomerer. Alene det er tilstrækkeligt til, at stoffet påvirker næsens duftreceptorer forskelligt og giver to forskellige duftindtryk.

Når det drejer sig om aminosyrer, anvender alle levende organismer L-formen i proteinsyntesen. Blev der indbygget en D-form af en aminosyre, ville det give en rumlig ændring i proteinet, og det vil derfor være ubrugeligt. Tilsvarende er enzymerne udviklet til kun at ville arbejde med L-former. I modsætning til aminosyrerne er sukkerstoffer, fx ribose og glucose, D-isomerer i biologisk materiale.

Chiralitet er et omstridt emne i diskussionen om, hvordan livet er opstået. Det skyldes, at den ikke-biologiske verden er racemisk. Når der i Miller's eksperiment dannes aminosyrer, optræder L- og D-former i et stort set 1:1-forhold. Blandt de aminosyrer, man finder i meteoritter, er der en lille overvægt af L-formen (forurening med jordisk materiale kan dog gøre analyserne usikre), og det bruges som et argument blandt dem, der støtter teorien om, at vigtige biologiske molekyler skulle være ført til Jorden udefra.

Vi må alligevel undre os over, hvorfor livet så godt som eksklusivt har valgt L-aminosyrer (D-former indgår dog i bakteriers væg). Det kan være en tilfældighed, der måske er blevet fremmet af, at hver af de to typer foretrækker at knytte sig til ligesindede. Derfor kan en vand- eller mineraloverflade have været dækket af et tyndt lag L-former i områder, hvor et levende system er udviklet. I de primitive stofkredsløb, som er fundamentet i "liv-med-små-molekyler-hypotesen", har chiralitet ikke været afgørende fra begyndelsen – først ved udviklingen af nukleotider til ATP og RNA er en homochiralitet nødvendig. Hvis et kemisk maskineri baseret på L-aminosyrer er opstået først, kan det have fungeret som et slags filter, der kun tillod anvendelsen af andre L-aminosyrer, ligesom det er årsag til, at også sukkerstoffers dannelse er styret i en bestemt retning, nemlig D-formen.

Nyere forskning har afsløret, at et magnetfelt har indflydelse på den måde, en opløsning af optisk isomere former af et stof absorberer lys. Hvis opløsningen udsættes for upolariseret lys og et parallelt magnetfelt, kan en af isomererne komme i overskud, fordi den anden form absorberer lyset mest og bliver ustabil. Måske kan det være en forklaring på L-aminosyrernes dominans ved livets begyndelse.



## Kilder

- Bionyt, nr. 134/135, okt. 2006: *Livets opståen og udvikling*  
 Fenchel, Tom: *Det første liv*; Gad 2000  
 Hansen, Poul: *Livets opståen og udvikling*; Natur og Museum, 42. årg. nr. 4, 2003  
 Madigan M. T., J. M. Martinko & J. Parker: *Brock – Biology of Microorganisms*; Prentice - Hall 2000  
 Madsen, Jørn: *Livets udvikling A-Å, 4 milliarder års evolutionshistorie*; Gyldendal 2006

◇◇◇◇

- Martin, W. & M. J. Russell: *On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic procaryotes, and from procaryotes to nucleated cells*; Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 2002  
<http://www.gla.ac.uk/projects/originoflife/index.htm>  
 Mix, L. J.: *The Astrobiology Primer: An Outline of General Knowledge*; Astrobiology vol.6-5, 2006  
<http://www.liebertonline.com/toc/ast/6/5>  
 Robinson, R.: *Jump-Starting a Cellular World: Investigating the Origin of Life, from Soup to Networks*; PLoS Biology, vol. 3-11, Nov. 2005  
 Shapiro, R.: *A Simpler Origin for Life*; Scientific American.com, Febr. 12, 2007  
<http://sciam.com/article.cfm?chanID=sa004&articleID=B7AABF35-E7F2-99DF-309B8CEF02B5C4D7>  
 Wächtershäuser, G.: *Origin of Life: RNA World versus Autocatalytic Anabolism*; Procaryotes 1, 2006

◇◇◇◇

- Brignol, E. & J. McDowell: *Amino Acid Racemization*; Today's Chemist at Work, vol. 10-2, Febr. 2001  
<http://pubs.acs.org/subscribe/journals/tcaw/10/i02/html/02brignole.html>  
 Joyce, G. F.: *A Glimpse of Biology's First Enzyme*; Science vol. 315, 16 Mar. 2007  
 Kashefi, K. & D. R. Lovley: *Extending the Upper Temperature Limit for Life*; Science vol. 301, 15 Aug. 2003

◇◇◇◇

- <http://www.astrobiology.com/extreme.html>  
 Life in Extreme Environments  
<http://serc.carleton.edu/microbelife/extreme/index.html>  
 Microbial Life in Extreme Environments

## Gode links

Antallet af netsider, som beskæftiger sig med astrobiologi, er overvældende og uoverskueligt. Her nævnes nogle få, hvorfra man også kan linke sig videre og dybere.

<http://nai.arc.nasa.gov/index.cfm>

NASA Astrobiology Institute

<http://www.astrobiology.com>

Stor privat netside om astrobiologi

[http://www.resa.net/nasa/xlife\\_index.htm](http://www.resa.net/nasa/xlife_index.htm)

Undervisningsside om liv på andre planeter

<http://www.imb-jena.de/RNA.html>

The RNA-World Website

[http://www.strangehorizons.com/2001/20010604/origins\\_of\\_life.shtml](http://www.strangehorizons.com/2001/20010604/origins_of_life.shtml)

Om organisk syntese i rummet

[http://www.lyon.edu/projects/marsbugs/astrobiology\\_links.html](http://www.lyon.edu/projects/marsbugs/astrobiology_links.html)

Linksamling om astrobiologi fra Lyon College, Arkansas