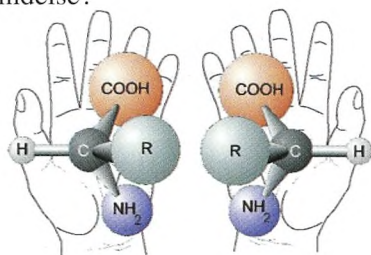


Er det en naturlov at aminosyrer er venstredrejede?

Anja C. Andersen, Axel Brandenburg og Tuomas Multamäki, NORDITA

Stort set samtlige aminosyrer¹ findes i to udgaver, som er *enantiomere* – en venstredrejet og en højredrejet, der er hinandens spejlbilleder (se figur 1). De aminosyrer som indgår i opbygningen af levende organismer er alle venstredrejede. Dette fænomen betegnes *homochiralitet*, der betyder 'samme chiralitet'. Umiddelbart er der ikke noget der taler for, at livet ikke lige så godt kunne bestå af højredrejede aminosyrer. Så man kan spørge om det er et tilfælde, at det kun er halvdelen af de tilgængelige aminosyrer, der benyttes af de levende organismer vi kender til, eller om der er noget særligt der gør, at kun venstredrejede bruges i opbygningen af liv? Er dét, at alle levende væsener benytter samme slags, et tegn på, at det er den eneste mulighed eller betyder det, at levende organismer på Jorden alle har samme oprindelse?



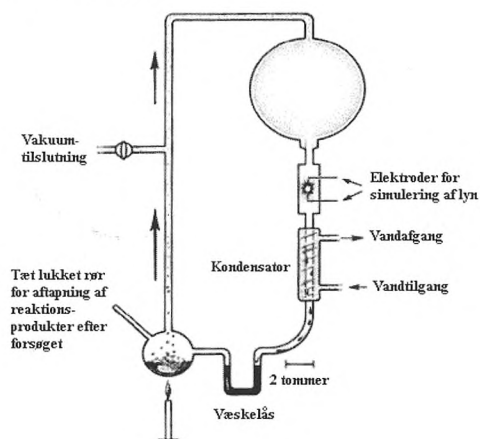
Figur 1. En 2-aminosyre kan have to *stereoisomere* former. Aminosyrer der indgår i levende organismer er alle L-aminosyrer, hvis rumlige struktur ses til venstre. R betegner en sidekæde, der varierer ganske meget fra aminosyre til aminosyre og kan for eksempel være H, CH₃ eller CH₂OH. Aminogruppen er -NH₂ og carboxylsyregruppen er -COOH.

Det var den franske kemiker og mikrobiolog Louis Pasteur, der i midten af 1800-tallet opdagede fænomenet chiralitet. Pasteur lavede krystallografiske undersøgelser af en nyopdaget vinsyre (druesyre), der havde samme kemiske opbygning og struktur som almindelig vinsyre. Imidlertid havde den tyske kemiker Eilhardt Mitscherlich vist, at mens almindelig vinsyre afbøjede planpolariseret lys, havde druesyre ikke en sådan effekt. Pasteur opdagede, at salte, som udkrystalliseredes fra druesyre, bestod af to typer af krystaller, som var spejlbilleder af hinanden. Når disse krystaller blev sorteret, og der blev sendt planpolariseret lys igennem, afbøjede de to krystaltyper lyset i hver sin retning. Druesyre bestod altså af en blanding af to forbindelser, der var spejlbilleder af hinanden. Det viste sig senere, at almindelig vinsyre i virkeligheden var identisk med den ene af de to spejlbilledformer af druesyre. På baggrund af Pasteurs opdagelser klassificeres chirale forbindelser efter, hvilken vej de drejer planpolariseret

lys. Forbindelser, der drejer lyset venstre om betegnes L – afledt af latin; laevus (=venstre), mens forbindelser der drejer lyset til højre får betegnelsen D – fra latin dexter (=højre). Forskellen på L-aminosyrer og D-aminosyrer er, at H-atomet og aminogruppen, NH₂, på kulstofatom nr. 2 har byttet plads (se figur 1 – det kræver drejning om flere akser for at indse!).

Millers forsøg med aminosyrer

I 1953 udførte Stanley L. Miller et forsøg på University of Chicago, hvori han eksperimentelt viste, at spontan dannelse af visse organiske forbindelser kan finde sted, under de forhold og med de reaktanter, som evolutionister mener eksisterede på Jorden for ca. 3,5 mia. år siden. Miller konstruerede et lukket system (se figur 2 og [1]), som tilførtes en blanding af luftarterne metan, brint og ammoniak samt vanddamp. To elektroder tilførte energi i form af gnister imellem dem (simulerede "lyn"). Blandingen i systemet fik lov at cirkulere uberørt en uge, hvorefter den blev undersøgt. Undersøgelserne viste, at der var dannet organiske forbindelser, såsom aldehyder, carboxylsyrer og forskellige aminosyrer. Forsøget viser, at det i Jordens daværende atmosfære formentlig har været forholdsvis enkelt, at danne organiske forbindelser. Man kan forestille sig, at disse forbindelser er blevet opkoncentreret i oceanerne og har udgjort en slags "ursuppe" for livets oprindelse. Det antages, at livet er opstået på havoverfladen i kontakt med atmosfæren. Argumentet er, at den række af aminosyrer, der opstod spontant under Millers forsøg, er grundbyggstenene i *proteiner*, og proteiner betragtes som den vigtigste forudsætning for liv, da disse indgår i celler, enzymer og hormoner.



Figur 2. Millers forsøg bestod af et lukket system, hvori man forsøgte at genskabe de forhold, der mentes at have været gældende ved livets spontane opståen på Jorden.

¹Ord i kursiv er forklaret i boksen på næste side.

Ordforklaringer :

Aminosyre: Organisk forbindelse der er karakteriseret ved, at indeholde både en aminogruppe og en carboxylsyregruppe. Når aminosyrer bindes sammen sker det under dannelse af en såkaldt peptidbinding, hvor syregruppen fra den ene aminosyre reagerer med aminogruppen fra den anden aminosyre under fraspaltning af vand. (www.biosite.dk/staabi/aa.htm)

D-form: D står for dexter – dvs. højre – og angiver, at molekylet vil dreje polariseret lys højre om.

Enantiomer: Spejlbillede af samme molekylære struktur.

Homochiral: 'Homo' betyder 'ens' eller 'samme'. Homochiral bruges ofte om de venstrehåndede (L-form) aminosyrer, som livet anvender.

Chiral: Et chiralt molekyle kan ikke bringes til at dække dets spejlbillede således at alle ens grupper dækker hinanden. Ordet chiral kommer af 'cheiros', der på græsk betyder hånd. Et stof er chiralt, når det rumligt er forskelligt fra sit spejlbillede. Chiralitet i kemien opstår typisk, når et kulatom i et molekyle er bundet til fire forskellige grupper. Et sådant kulatom kaldes asymmetrisk.

L-form: L står for laevo – dvs. venstre – og angiver, at molekylerne drejer polariseret lys venstre om.

Nukleotider: Byggesten i makromolekylerne DNA og RNA. En nukleotid består af et sukkermolekyle (deoxyribose), der er bundet til fosforsyre og til en kvælstofholdig base, hvoraf der findes fire typer: guanin, adenin, thymin og cytosin.

Peptid: Kort kæde af aminosyrer.

Polymerisering: Kemisk reaktion mellem umættede mindre molekyler, hvorved der dannes større molekylforbindelser.

Protein: Længere kæde af aminosyrer der er viklet om sig selv så den har en tredimensional struktur. Kæderne består typisk af fra ca. 50 op til over 1000 aminosyrer. Det er sammensætningen af aminosyrer i kæden, som bestemmer proteinets form og funktion. Et eksempel på et protein er insulin, der kontrollerer blodsukkerets niveau i hvirveldyr.

Racemat: En blanding der består af L- og D-formen. En racematblanding består af en blanding af flere enantiomere former af et chiralt molekyle.

Stereoisomer: Isomere molekyler er kendetegnet ved at bestå af de samme atomer, at have de samme grupper og næsten de samme kemiske egenskaber. Biologisk spiller de en stor rolle idet enzymer, membrantransportsystemer og receptorer har forskellig evne til at binde de forskellige isomere molekyllformer, hvorved de har forskellig biologisk effekt.

Nye vidnesbyrd har skabt tvivl om, hvor realistiske bestanddelene af Millers atmosfære var. Men hans teori om den oprindelige suppe, som forklarer, hvordan livets ingredienser blev dannet i en varm dam eller et varmt hav på planetens overflade, har stadig mange tilhængere. Nogle forskere har for nylig flyttet suppen til havbunden, hvor de forestiller sig, at mudrede mineralskyer, der blev spyet ud af varme kilder, kunne have dannet molekylerne til livets forstadier. Men en voksende gruppe andre forskere ser på en helt anden kilde til livgivende molekyler: *Rummet*.

Aminosyrerne i Millers forsøg forekom med 50 % af D-formen og 50 % af L-formen, en såkaldt *racematblanding*. Men for alle proteiner gælder – med nogle yderst sjældne undtagelser, at de kun kan fungere, når de udelukkende er opbygget af aminosyrer med samme chiralitet. De to typer af aminosyrer reagerer omtrent lige let med hinanden som med sin egen type. For en given sådan reaktion mellem to tilfældige aminosyrer er der altså en sandsynlighed på $1:2 = 0,5$ for, at to aminosyrer af samme form finder sammen. Da et gennemsnitligt protein indeholder omtrent 410 aminosyrer, alle af samme form, giver dette nu en sandsynlighed på $1 : 2^{410} \approx 1 : 10^{123}$, svarende til at slå krone 410 gange i træk med en mønt. Det vil sige, at hvis man 10^{123} gange gentager en proces, hvor 410 vilkårlige aminosyrer – f.eks. fra en stor "ursuppe" – finder sammen, vil der kun i ét af tilfældene dannes en kæde, udelukkende bestående af aminosyrer på L-formen.

Proteinerne består typisk af 100-1000 aminosyrer, mens DNA består af mange millioner *nukleotider*. Både aminosyrer og nukleotider er chirale. I aminosyrer findes årsagen til chiraliteten hos det asymmetriske kulstof. Dette kulstof er bundet til fire forskellige grupper: til venstre en amin, til højre en syre, bagved et brintatom og foran en kort kæde af atomer, der giver aminosyrerne deres forskellighed (se figur 1). I DNAs nukleotider findes chiraliteten i sukkerenheden 2-deoxyribose, som er på D-formen (se evt. artiklen om DNA i Kvant nr. 4, dec. 2004 [2]). Alt dette har skabt en livlig debat om hvorvidt homochiralitet er en forudsætning for livets tilblivelse eller er en konsekvens af livets tilblivelse [3].



Figur 3. Et stykke af den primitive kulchondrit "Allende". Meteoritten indeholder Calcium-Aluminum-rige Inklusioner (CAIs) og 'chondruler' (på dansk: chondrer), der udgør de første kondensater under Solsystemets dannelse. Mellem inklusionerne findes den finkornede matrix.

Homochiralitet – en universel egenskab?

Hvis dét at livet på Jorden består af D-form sukre og L-form aminosyrer er en tilfældighed, er det meget sandsynligt, at der på den tidlige Jord har eksisteret 'liv' af begge former, dvs. D-formen og L-formen. Det rejser spørgsmålet: Hvor længe kunne to sådanne livsformer sameksistere før den ene fik overtaget?

Vi har udviklet en simpel matematisk model (med nogle rate-ligninger), som beskriver dannelsen af *polymerer* ud fra monomerer samt konkurrencen mellem de to mulige typer. Med denne model [4,5] finder vi, at de to former kan have sameksisteret i op til 100.000 år, afhængig af hvilke antagelse der gøres om havstrømmene og dermed opblandingen af havene. Hovedantagelsen i modellen er dog, at homochiralitet er opstået ved en tilfældighed og at den anden livsform havde samme overlevelseshancer. Der er ikke nogen umiddelbar fysisk grund til at antage, at den ene form skulle være mere levedygtig end den anden. Ikke desto mindre indikerer nye fund i meteoritter, at der er en overvægt af L-formen, hvilket antyder at der måske er en grund til, at livet på Jorden netop har slået sig på L-formen.

Omkring 70 aminosyrer – ud af 159 mulige – er blevet fundet i den sjældne type af meteoritter, der kaldes kulchondritter (se evt. artiklen om Astronomi og astrobiologi i Kvant nr. 3, november 2004 [6]), men kun 8 af de 20 aminosyrer, som anvendes i levende organismer, er indtil videre blevet identificeret med sikkerhed i meteoritterne. Det er et stort arbejde at identificere aminosyrerne med sikkerhed, fordi det er svært helt at udelukke, at der kan være tale om jordisk forurening. Det er dog lykkedes Pizzarello sidste år [7] at godtgøre, at kulchondritter indeholder en overvægt på 2-9 % af L-formen i aminosyrerne; 2-amino-2,3-dimethylpentanoic, -methyl norvaline og isovaline. De to første er blandt de aminosyrer der *ikke* anvendes af levende organismer og det tredje findes kun i en sjælden svampetype. Derfor er der ingen grund til at tro at resultatet skyldes jordisk forurening.

Kulchondritterne er det ældste materiale vi kender til. Disse meteoritter var noget af det første som ud-kondenserede da Solsystemet opstod for 4,56 milliarder år siden. De er dannet i udkanten af Asteroidebæltet, eller endnu længere ude, og har derfor ikke været udsat for nogen videre opvarmning ($< 50^{\circ}\text{C}$) siden deres dannelse. Dette ved vi fordi de indeholder en del flygtige gasarter samt organisk materiale der ville være henholdsvis afgasset eller ødelagt hvis temperaturen havde været højere. Bestanddelen af kulchondritter er Calcium-Aluminum-rich Inclusions (CAIs) og chondruler der er 'kittet' sammen med et finkornet materiale, kaldet matrix. De hvidlige CAIs (se figur 3) indeholder som navnet antyder forholdsvis store mængder af kalium og aluminium. Chondrulerne er små glaskugler med en størrelsesfordeling fra millimeter til centimeter. Mellem CAIs og chondrulerne ligger matrix materialet der består af det mikrometer-store støv og de molekyler der fandtes i den interstellare sky der blev til Solsystemet. Det er i matrix-materialet, at organiske forbindelser er fundet.

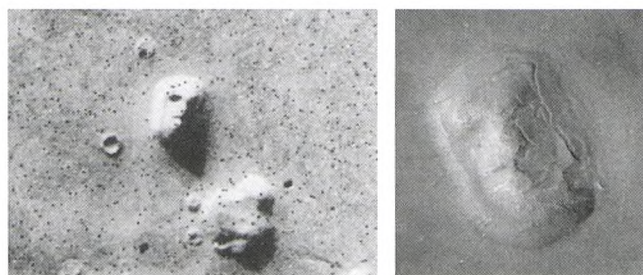
Når kulchondritter indeholder en overvægt af homochirale organiske molekyler, som Pizzarello har vist, peger det på, at det ikke kun er på Jorden at homochiralitet er normen men at der derimod også i det

tidlige Solsystem var en tendens til homochiralitet. Da overvægten kun er lille kan man sagtens forestille sig, at Jorden på et tidligt tidspunkt har huset livsformer af både L- og D-formen, men at L-formen fra starten har haft den fordel at være lidt i overtal.

I vores model [4,5] har vi som startbetingelse antaget, at de to former var ligeligt repræsenteret, hvilket førte til, at den ene af formerne fik overtaget indenfor en periode på mindre end 100.000 år. I modellen var udfaldet for om den ene eller anden form fik overtaget lige hyppige, men hvis den ene form havde blot en lille fordel fra starten ville det selvsagt påvirke resultatet. En lille fordel for L-formen vil resultere i, at det er mest sandsynligt, at det bliver L-formen der ender med at dominere.

Homochiralt liv på Mars?

Det kan meget vel vise sig, at der er liv på Mars i dag. Der er nemlig rejst tvivl om hvorvidt NASAs metoder til sterilisering af rumfartøjer er tilstrækkelig effektiv. Under steriliseringen varmebehandles rumfartøjerne hvorved kondensvand tørrer ind til små perler af brint-syre forbindelser, hvilket efterlader en noget nær ideel 'kuvøse' for mikrobielle livsformer. Når bakterier og vira tørrer ud, krystalliserer de hvorved de kan overleve endog meget barske omgivelser. Selvom sandsynligheden for at jordiske livsformer på denne måde skulle have sneget sig med som blinde passagerer til Mars og at muligheden for at de ville kunne overleve på Mars er nærmest forsvindende, så vil det for altid efterlade tvivl hvis vi finder levende organismer på Mars.



Figur 4. Ansigtet på Mars (t.v.) blev opdaget i forbindelse med Viking-missionerne i 1976. Det er 2 km bredt og 2 km højt. Billedet bidrog til mange spekulationer om mulige livsformer på Mars. Billedet til højre er taget af Mars Global Surveyor i 2001 og har en højere opløsning end billedet til venstre. Det viser, at der er tale om en naturlig formation.

Det eneste der med sikkerhed kan overbevise os om, at en given organisme fundet på Mars virkelig er en Marsorganisme er, hvis den adskiller sig markant fra jordisk liv. En sådan forskel kan f.eks. være hvis organismen er opbygget af aminosyrer med modsat chiralitet af de jordiske livsformer. Hvis chiralitet er en spontan proces, som er opstået ved en tilfældighed, er der en sandsynlighed på 50 % for, at Mars har samme type. MEN hvis chiralitet er et resultat af en form for symmetribrud så levende organismer alle steder i

Universet som oftest vil være af L-formen (homochirale), vil vi for altid stå med dilemmaet om hvorvidt vi 'blot' har opdaget slægtninge til samme oprindelige livsformer.

Hvis mulige Marsorganismer har samme chiralitet som på Jorden, kan det skyldes flere ting:

1. Homochiralitet kan være universel og alt levende vil altid besidde denne egenskab,
2. Livet på Jorden kan stamme fra Mars,
3. Vi finder en jordisk forurening på Mars,
4. Kimen til liv stammer fra et andet sted i Universet og Mars og Jorden er begge blevet 'sået' af mikroorganismer eller biokemisk materiale fra et andet sted.

Den sidste mulighed går under betegnelsen "panspermia" og den er forholdsvis populær MEN den flytter blot problemet med livets oprindelse til et andet sted i Universet uden at bidrage yderligere til en løsning af hvorvidt homochiralitet er en universel egenskab eller en tilfældighed.

Litteratur

- [1] En let forståelig indføring til emnet (chiralitet og liv): Gilmour I., Sephton M.A. (2004), *An Introduction to Astrobiology*, Cambridge University Press.
- [2] Steinsvoll, O. (2004), "DNAs fysisk/kjemiske struktur kjent i 50 år", Kvant nr. 4, december 2004.
- [3] En noget teknisk bog om chiralitet: Palyi, G., Zucchi C., Caglioti L. (2004), *Progress in Biological Chirality*, Elsevier Science.
- [4] Brandenburg A., Multamäki T. (2004), "How long can left and right handed life forms coexist?", *International Journal of Astrobiology* bind 3, 209-219.
- [5] Brandenburg A., Andersen A.C., Höfner S., Nilsson M. (2005), "Homochiral growth through enantiomeric cross-inhibition", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* bind 35, 225-242.
- [6] Field, D. (2004), "Astronomi og astrobiologi", Kvant nr. 3, november 2004.

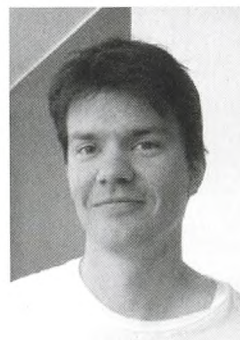
- [7] Pizzarello, S. (2004), "Chemical evolution and meteorites: An update", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* bind 34, 25-34.
- [8] Brandenburg & Andersen (eds.) (2005), conference-proceedings for astrobiologimøde i januar 2005 – *Astrobiological problems for physicists. International Journal of Astrobiology* bind 4, Sep. 2005.



Anja C. Andersen har været astrofysik fellow ved Nordita siden 2002. Hendes primære forskningsfelt er interstellart støv, med hovedvægten på hvor det støv der findes i Universet bliver dannet. De næste par år vil hun være at finde i det nye Dark Cosmology Center ved Niels Bohr Institutet (www.astro.ku.dk/dark).



Axel Brandenburg har været professor i astrofysik ved Nordita siden år 2000, med speciale i astrofysisk fluid-dynamik. For et par år siden tog han initiativ til at danne et Nordisk Astrobiologi netværk (www.nordita.dk/~brandenb-astrobiology/) med henblik på at identificerer områder inden for astrobiologi hvor de Nordiske lande har særlige kompetencer.



Tuomas Multamäki har været astrofysik fellow ved Nordita siden 2003 og starter til oktober som Academy of Finland Research Fellow ved Turku Universitet. Hans primære forskningsområde er partikelfysik og kosmologi.

KVANT udgives af:

Astronomisk Selskab (AS)
www.as-dk.org

Michael Quaade (formand)
Hviddingvej 48
2610 Rødovre
Tlf. 36723634 (privat)
43386947 (arbejde)
mq@spacecenter.dk

Aksel Gashjerg (kasserer)
Tlf. 48245514, ag@atp.dk

Inge Frederiksen (medlem.)
Tlf. 46756676
inge.frederiksen@mail.dk

Dansk Fysisk Selskab (DFS)
www.nbi.dk/dfs

Jan W. Thomsen (formand)
Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
2100 København Ø
Tlf. 35320463
jwt@fys.ku.dk

Erik H. Pedersen (kasserer)
horsdal@phys.au.dk

Dansk Geofysisk Forening (DGF)
dgf.gfy.ku.dk

Karen G. Schmidt (formand)
Niels Bohr Institutet/Is og Klima
Juliane Maries Vej 30
2100 København Ø
Tlf. 35320613
kgs@gfy.ku.dk

Bo Vinther (kasserer)
Tlf. 35320518, bo@gfy.ku.dk

Lars Stenseng (sekretær, web)
Tlf. 35325792
stenseng@spacecenter.dk

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU)
www.naturvidenskab.net

Dorte Olesen (formand)
UNI-C
Vermundsgade 5
2100 København Ø
Tlf. 35878804 (sekretær)
bente.egaa@uni-c.dk

Jørn Johs. Christiansen
(sekretær, medlemmer)
Tlf. 39695818
jjchr@tdcadsl.dk