

Astronomi og Astrobiologi

David Field, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Hvad er Astrobiologi?

Astrobiologi er studiet af det ældgamle spørgsmål om livets opståen, og hvorvidt der findes liv andre steder i Universet; et ældgammelt spørgsmål, så hvorfor er astrobiologi blevet et så spændende og aktuelt felt i de seneste få år? Hvorfor står emnet øverst på dagsordenen hos NASA og hos det Europæiske Rumagentur, ESA? Hvad ved vi i dag, som vi ikke vidste for ti år siden, eller kun havde de første anelser om? Svaret findes, som vi skal se, lidt hist og lidt pist, men det er tilstrækkeligt til, at det virker meget ansporende.

Astrobiologi forener astronomi og biologi: biologerne prøver ivrigt at grave en tunnel fra den ene side af barrieren, til forståelsen af livets opståen, mens astronomer, fysikere og kemikere graver lige så ivrigt fra den anden. En dag vil de mødes på midten, og vi vil forstå, hvad der skete for 3,5 milliarder år siden, da levende systemer udviklede sig på Jorden. Denne forståelse venter endnu ude i fremtiden, men vi gør fremskridt.

I denne artikel søger jeg at viderebringe nogle af de mest interessante opdagelser, der er blevet gjort for nylig i astronomi, og som er knyttet til livets opståen i Universet og har givet energi til feltet astrobiologi. Disse opdagelser er små isolerede, oplyste brudstykker, og det er vanskeligt at forbinde dem til et sammenhængende billede, men jeg vil alligevel forsøge at gøre det. Der stilles flere spørgsmål, end der besvares, men det er blot, som det skal være; vi forstår ikke livets opståen, men vi begynder at kunne samle nogle brikker af puslespillet.

Det store billede

Lad os først se på det store billede, med det forbehold, at der er mange usikkerheder. Universet opstod i Big Bang. Men i Big Bang blev kun de simpleste atomer dannet: brint, deuterium, helium og en smule lithium og beryllium. For at opbygge livet, som vi kender det, behøver vi ikke blot de lette grundstoffer ilt, kulstof, brint, kvælstof, i denne rækkefølge efter hyppighed, men også en lille smule af mange andre, som f.eks. magnesium, silicium, jern, aluminium, natrium, kalium, krom, mangan, fosfor og endnu flere, selv wolfram. Disse grundstoffer er blevet dannet i stjernernes indre i de 13,5 milliarder år, der er gået siden Big Bang. Den første stjerne i Universet [1] blev dannet omkring én million år efter Big Bang. Denne enorme stjerne, flere hundrede gange tungere end Solen, eksploderede som en supernova. I denne eksplosion blev der dannet små mængder af tungere grundstoffer gennem kernereaktioner ved de meget høje temperaturer under eksplosio-

nen. Samtidig blev elektronerne slået løs fra alle atomerne i Universet pga. den intense højenergi stråling, der var forbundet med supernovaeksplosionen.

Universet genetableredes så at sige efter denne ødelæggende begivenhed - der blev dannet en generation af nye stjerner i de første galakser, måske 100 millioner år senere. Disse stjerner var meget forskellige fra vores sol. De var meget tunge, hvidglødende og meget kortlevede, de overlevede kun i nogle få millioner år. Disse stjerner eksploderede også som supernovaer og spredte tungere grundstoffer gennem deres værtsgalakser. Dette skabte et medium beriget med tungere grundstoffer mellem stjernerne, det "interstellare medium". Her dannedes en ny generation af stjerner i turbulente knuder af gas med høj lokal tæthed og effektiv afkøling af mediet gennem udsendelse af stråling - delvis hjulpet af den kølende indflydelse fra det nyligt dannede kulstof og ilt - og endelig, som for alle stjerner, gennem den overvældende tyngdetiltrækning.

Nylige simuleringer antyder, at denne nye generation af stjerner bestod af stjerner med samme masse som Solen [2]. Med den lave masse har disse koldere stjerner været langlivede, og de har skabt det første miljø, hvor man måske kunne forestille sig liv. Der kan imidlertid endnu ikke have været liv, da hyppigheden af tungere grundstoffer stadig var meget lav, mindst 1000 gange mindre end i Mælkevejen. Der var stadig ikke nok råmaterialer til at danne klippeplaneter, endsige liv. Flere generationer af stjerner levede og døde, hver generation berigede mediet mellem stjernerne med tungere grundstoffer. I dag er 1,7 % af brintatomerne fra Big Bang omdannet til grundstoffer tungere end helium.

Ni milliarder år efter Big Bang, i én af Mælkevejens spiralarme, i en galakse blandt mere end 10^{11} andre, begyndte en bestemt gassky - den "præsolare tåge" - der indeholdt grundstoffer nødvendige for livet, at føle det uimodståelige træk fra tyngdekraften og dannede Solen. Der var tilstrækkelige mængder grundstoffer som ilt, silicium, jern, magnesium, aluminium og svovl til at danne klippeplaneter. På en eller anden måde kom flere af de grundstoffer, der er nødvendige for livet, til at optræde i langt større mængder på Jorden end i Universet som helhed. Et godt eksempel er fosfor, som er en afgørende bestanddel af ryggraden i DNA. Fosfor har en kosmisk hyppighed på 0,27 ppm, hvorimod hyppigheden er 700 ppm i biosfæren. Så tog naturen en ske og rørte rundt i gryden med alle de rigtige kemiske forbindelser, vand, aminosyrer, nukleobaser, sukkerarter, fosfater og fedtsyrer. Efter at der var blevet rørt i omkring to til tre hundrede millioner år, sprang der en éncellet organisme ud, som landede på en sten og

begyndte at danne en koloni. Det er selvfølgelig problemet: vi kan ikke se, hvordan en levende organisme kunne opstå spontant alene ud fra de kemiske ingredienser fra biokemien. Men det er et problem for biologerne, der graver løs fra den anden side af barrieren for at forstå livets opståen. Lad os nu træde et skridt tilbage og betragte astronomiske, frem for biologiske, sider af astrobiologien. Vi vil beskæftige os med, hvordan ingredienserne til biokemien kom ned i gryden, som naturen rører rundt i, men ikke med, hvad der foregår i selve gryden.

Unge stjerner og planeter omkring andre stjerner

Hvordan var de fysiske betingelser i gassen omkring den meget unge sol, da planeterne blev dannet? Hvilke molekyler var der til stede i denne soltåge, og i hvilken form blev de indlejret i Jorden: I en nøddeskal, hvordan er forbindelsen mellem Jorden og det interstellare rum? Svarene på disse spørgsmål kommer både fra astronomiske observationer og fra analyse af meteoritter. Tekniske fremskridt inden for begge områder har skabt feltet astrobiologi i det sidste årti.

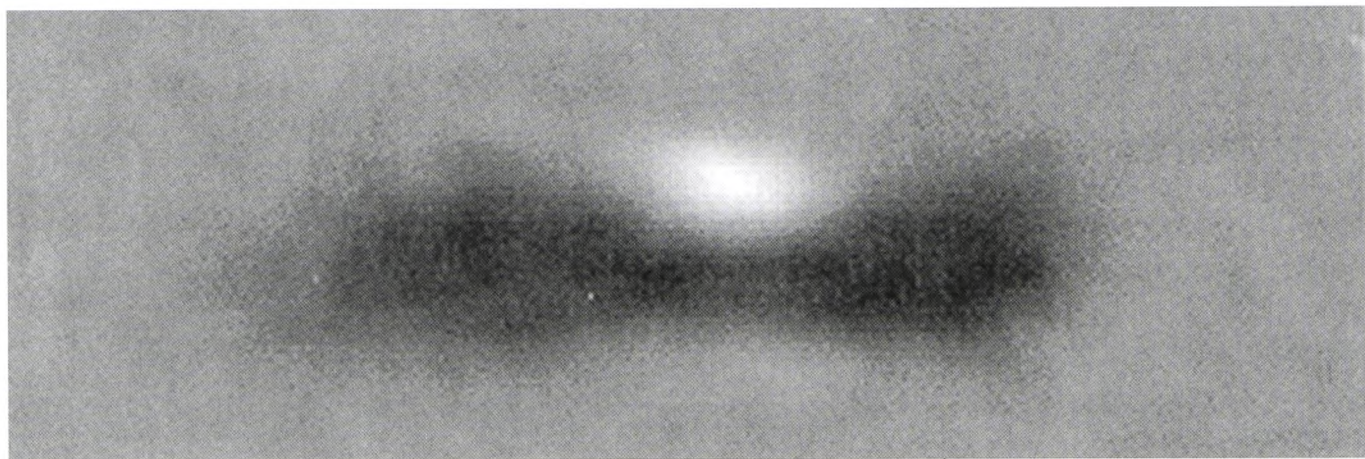
Først astronomi: For at undersøge, hvordan Solen og planeterne blev dannet, vender vi vores teleskop mod meget unge stjerner ("protostjerner"), som vi mener en dag vil komme til at ligne Solen, men som er under dannelse "nu" - dvs. som vi ser dem nu. Det nærmeste og mest velstuderede aktive stjernedannende område er Orion-tågen, som vi ser, som den var for 1500 år siden. Et infrarødt billede af dette område er vist i figur 2. Belligenheden på himlen er nogle få grader syd for Orions Bælte, der er synligt i vintermånederne på den nordlige

halvkugle. Det tekniske problem i studiet af stjernedannelse er rumlig opløsning og spektral opløsning. I de sidste ti år er vinkelopløsningen, og dermed den rumlige opløsning, ved hjælp af Hubble Rumteleskopet og jordbaserede teleskoper som Canada-France-Hawaii Teleskopet (CFHT) og det Europæiske Sydobservatoriums Very Large Telescope (VLT) blevet god nok til at opløse objekter så langt væk som Orion på skalaer mindre end Solsystemet, dvs. mindre end 100 gange afstanden mellem Jorden og Solen (100 Astronomiske Enheder eller AE).

Data fra Hubble Rumteleskopet viser, at meget unge stjerner i dannelsesøjeblikket kan være omgivet af skiver af en gas med støvkorn, med en skivediameter fra 50 til 1000 AE.

Figur 1 viser en stor, 1000 AE, protostellar skive set næsten fra siden i Orion Molekylskyen, og i midten skimtes lys, som er reflekteret fra støv fra den blokerede protostjerne. Massen af materialet i denne skive er stor nok til at danne mere end 700 Jordkloder - eller godt og vel to Jupiterer.

Den inderste, tættere del af skiven i Figur 1 er det område, hvor planeter kan være under dannelse, i et plan ligesom omkring Solen - men sådan en bemærkning hviler på den antagelse, at der er planeter omkring andre stjerner. Indtil for få år siden var det ikke muligt at afgøre denne gåde, og vi gættede nærmest på, at der var planeter omkring andre stjerner. Nogle argumenterede for - og argumenterer måske stadig korrekt for - at vores Solsystem, med dets beboelige planet (eller planeter?), er enestående, og at det eneste liv i Universet er dét på Jorden.



Figur 1. Et Hubble Rumteleskop billede af en skive af støvet gas omkring en protostjerne i Orion Molekyl Skyen optaget gennem et medium-bånd kontinuumfilter ved 547 nm. Diameteren af skiven er ca. 1000 AE (Jord-Sol afstande). Der er masse nok i denne skive til at danne mere end 700 Jordkloder og lidt mere end to Jupiterer. Den klare plet af lys midt i billedet er lys fra den skjulte protostjerne reflekteret af skyer af støv der omgiver dette område. Billedet er taget fra M.J. McCaughrean og C.R. O'Dell (1996), "Direct Imaging of Circumstellar Disks in the Orion Nebula", *Astron.J.*, bind 111, side 1977.

Vores uvidenhed om tilstedeværelsen af planeter omkring andre stjerner er nu forsvundet, men har blot afsløret vores uvidenhed om, hvordan planeter dannes. I 1995 rapporterede Mayor og Queloz en planet omkring stjernen 51 Pegasi [3]. Dette var den første påvisning af en ekstrasolar planet omkring en sol lignende stjerne, og den er blevet fulgt af påvisninger af mere end 100 planeter - faktisk vedrører den 123. planet-detektion, som blev offentliggjort i juli 2004, en stjerne 140 lysår fra Jorden. Nogle stjerner har vist sig at have to eller tre planeter i kredsløb omkring sig. Af tekniske årsager er der kun påvist tunge planeter [4], med en masse på nogle brøkdele af Jupiters, som er 300 gange Jordens. Derfor ved vi stadig ikke, om der er Jordlignende planeter i kredsløb omkring andre stjerner. Hvordan det end forholder sig, er der i mange tilfælde fundet tunge planeter, der bevæger sig i excentriske baner, hvor de kommer meget tæt på deres værtsstjerne, i modstrid med alle eksisterende teorier for planetdannelse. Sådanne baner kommer ikke blot på tværs af teorien, men - hvad der er af større betydning - de står også meget i vejen for liv, da ethvert begyndende biologisk system ville blive skiftevis nedfrosset og brændt levende. I modsætning hertil ville en god kandidat for liv være en planet (med en atmosfære), som holder sig inden for en bane med næsten konstant afstand fra værtsstjernen, dvs. i en cirkulær bane med en radius, så vand hverken koger eller fryser. Dette er den såkaldte "beboelige zone", hvor vand altid er flydende, en egenskab ved miljøet, der sandsynligvis er afgørende for udviklingen af liv. Jagten på lettere og mere bio-venlige planeter går i højeste gear med NASAs Kepler mission (2007), den i det væsentlige franske COROT mission (2007), det Europæiske Rumagentur ESAs EDDINGTON mission (måske) og GAIA missionerne (~2011), NASAs Terrestrial Planet Finder (2015) og det Europæiske Rumagentur ESAs DARWIN (2015+) mission. Senere missioner, f.eks. DARWIN, vil også søge efter spor af liv på ekstrasolære planeter gennem analyse af gasser i planetatmosfærerne.

Gas og støv omkring protostjerner

Lad os vende tilbage til den astronomi, der er inden for vores nuværende rækkevidde, og spørg om, hvad det er for en gas, som planeterne dannes i omkring protostjernerne? Først, hvad består den af? Gassen er 90 % molekylær brint, H_2 , med 10 % He, nogle få titusindele af den totale antalstæthed består af kulmonoxid, vand, ammoniak og snesevis af andre molekyler (og ioner), både velkendte, som f.eks. alkohol, og mindre velkendte, som f.eks. HCO^+ . Den totale antalstæthed spænder fra nogle få hundrede partikler per kubikcentimeter (cm^3) til mere end 10^{11} per cm^3 tæt på varme, tunge stjerner.

Gastemperaturen kan være så lav som 10 K, men i korte perioder, som uger, måneder eller år, kan gassen blive opvarmet til temperaturer så høje som 5000 K eller mere. Små partikler ("støvkorn"), bestående af

magnesium- og jernsilikater eller grafit-agtige stoffer opbygget af kulstof, udgør 1 % af gassens totale masse. Disse partikler varierer i størrelse fra "store molekyler" på en snes Ångstrøm til mikrometer, med langt flere små partikler end store. Støvkornene er meget kolde, typisk 10 K, og observationer viser, at de er dækket af en blanding af vand-, ammoniak-, kuldioxid- og andre typer is. Blokeringen af synligt stjernelys, der med Herschels udtryk skaber "huller i himlen", hvor der tilsyneladende ingen stjerner er, er et slående bevis for tilstedeværelsen af støvkorn. En af de mest dramatiske illustrationer af støvkorns skyggende effekt ses i figuren på forsiden, der viser Hestehovedtågen (Barnard 33), en sky af gas og støv, som i den synlige del af spektret skygger for stjernerne bagved. Hestehovedtågen ligger tæt på Orion-tågen i figur 2, som vi nu vil fokusere på.

For det første er der dannet mere end 1000 stjerner i Orion-tågen inden for den sidste million år, og mange af disse stjerner kan faktisk ses i figur 2. Orion er et af de vigtigste områder til observation af igangværende stjernedannelse [f.eks. 5,6]. For det andet er der observeret mange forskellige molekyler i gasfasen i Orion-tågen. I en nylig eftersøgning med radiobølger, der dækkede et ret smalt frekvensområde [7], blev der f.eks. fundet mere end 15 forskellige kemiske forbindelser, herunder metanol, dimetyllæter (CH_3-O-CH_3), etyl- and metylcyanid, svovldioxid, deutereret ammoniak og andre. Som en lille forsmag på fremtiden, om kun 4-5 år, kan det nævnes, at det Europæiske Sydobservatoriums Atacama Large Millimetre Array (ALMA) vil opnå en følsomhed, så man inden for ét til ti sekunders observationstid kan opnå, hvad der ville tage 100 timer med teleskopet anvendt ved radioobservationerne beskrevet i [7]. Når vi kommer til overvejelserne om informationen fra meteoritter, så husk den rige molekylære høst, som kommer fra radioastronomien, og den endnu rigere høst, som ligger lige rundt om hjørnet med ALMA.

Stjerne- og planetdannelse

Hvordan blev de tusinde stjerner i Orion dannet inden for den sidste million år, og hvordan kan planeter være dannet omkring dem? Stjerner dannes i kernerne af tætte molekylskyer med støv, som Orion Molekylskyen ved Orion-tågen. Vi ved dette, fordi vi ved lange bølgelængder kan fotografere meget unge stjerner begravet dybt inde i Orion Molekylskyen. Måden, hvorpå stjerner dannes, er imidlertid stadig et meget omdiskuteret spørgsmål og et vigtigt emne for studier i astronomien i dag. Naturen synes at udføre stjernedannelse - og måske planetdannelse - meget villigt, men det har ikke været muligt at skabe en sammenhængende model, som fremhæver den vitale fysik og kemi. Gravitationelt kollaps er afgjort dominerende i den korte afslutningsfase i den inderste del af den zone, hvor protostjernen dannes. Fysikken og kemien i skiven, hvor planeterne dannes, som i den på figur 1, og generelt

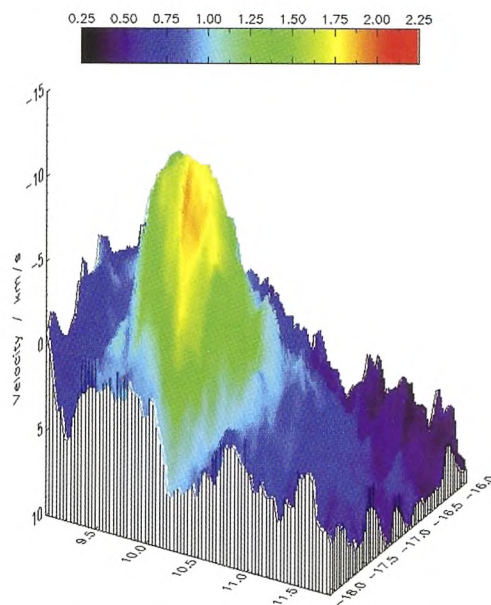
omkring protostjernen, er imidlertid genstand for stor diskussion. Det er tilstrækkeligt at nævne, at selv dannelsen af kæmpeplaneter er genstand for to konkurrerende modeller. Den ene involverer en langsom opbygningsproces over mange millioner år [8], og i den anden foregår planetdannelsen gennem turbulens, der i skiven danner klumper af gas og støv, der trækker sig sammen ved tyngdekraften, på en tidsskala på ca. 1000 år [9]. En faktor på 1000 eller mere mellem de to modellers tidsskalaer taler sit tydelige sprog om vores ufuldstændige forståelse af planetdannelse.



Figur 2. Orion-tågen fotograferet i det infrarøde med det Europæiske Sydobservatoriums Very Large Telescope. De klare Trapezium stjerner ligger i centrum af billedet. Nord for Trapez ses rød emission, der markerer Orion Molekylskyen, hvor unge stjerner ("protostjerner") er under dannelsen. Den protostellare skive, vist i figur 1, og den hurtigt udslyngede varme brint, vist i figur 3, befinder sig begge i dette stjernedannende område. Billedet er 180.000 AE (Jord-Sol afstande) på hver led, eller ca. 2,7 lysår.

Lad os nu vende blikket mod observationer. Hvad ser vi, når vi forsøger at kigge på områder, hvor meget unge stjerner dannes, de såkaldte "protostellare zoner"? Meget unge stjerner er stærkt blokerede i det synlige område, fordi det udsendte lys absorberes og spredes af støv i den tætte gas, der omgiver dem, ligesom synligt lys blokeres af støvet i Hestehovedtågen (figuren på forsiden). Emission er mindre blokeret i det infrarøde, og derfor foretages observationer af den meget tidlige fase af stjernedannelse ved infrarøde bølgelængder. Det viser sig, at et væsentligt træk ved de tidligste stadier af stjernedannelse er emission fra meget varm molekylær brint (H_2) i det infrarøde spektralområde omkring en bølgelængde på 2 mikrometer. Morfologien af H_2 -emissionen afslører gas slynget ud fra protostjernen i kolliderede udstrømninger vinkelret på skivens plan - hvis der da findes en skive. Forklaringen er, at der strømmer gas ud fra protostjernerne med supersoniske hastigheder mellem 5 og 50 km/s, og denne gas støder så ind i den omgivende gas og skaber såkaldte "in-

terstellare chok". Gassen, der udsættes for denne tortur, opvarmes og komprimeres af det supersoniske sammenstød, og H_2 , der som nævnt er den vigtigste bestanddel af gassen, udsender lys i det infrarøde, mens gassen efterhånden afkøles fra flere tusinde grader ned til de oprindelige 10 K.



Figur 3. Molekylær-brint-emission fra et stjernedannende område i Orion Molekylskyen (se figur 2) observeret i det infrarøde ved en bølgelængde på 2,121 mikrometer. Billedet viser himmelplanet, målt i buesekunder, på x- og y-akserne, hvor 1 buesekund = 450 Jord-Sol-afstande (AE). Skalaen er derfor ca. 200 gange mindre end skalaen i figur 2. Hastigheden i forhold til det lokale standard-hvilesystem er vist på den lodrette akse. Farverne refererer til styrken af emissionen. Canada-France-Hawaii Teleskopet: detaljer i ref. [10].

En grafisk afbildning af et chok begravet inde i Orion Molekylskyen er vist i figur 3 [10]. Her ses varm brint, der bevæger sig hurtigt imod os med hastigheder på op til ca. 20 km/s relativt til den omgivende koldere gas. Mens den gør det, pløjer den ind i kold gas foran chokket, og der sker en række kemiske processer. Dynamikken af hurtige udstrømninger fra protostjerner kompliceres af tilstedeværelsen af ladede partikler og magnetfelter, men nettoresultatet er, at højtemperaturkemi kan finde sted, støvkorn støder ind i molekyler med hastigheder på flere gange 10 km/s, isen på deres overflade fordamper eller blæses væk, og kornene kan ætzes og slippe f.eks. silicium ud i gasfasen. Disse processer finder sted i et medium, der allerede er af betragtelig kemisk kompleksitet, som vi har set ovenfor fra radioastronomiobservationer [7]. Gassen omkring protostjernen bliver derfor en veritabel heksekedel af organiske forbindelser. En del af disse kondenserer på overfladen af støvkornene og er klar til at deltage i yderligere processer med ultraviolet lys, hvor dette kan trænge igennem til mediet, og med kolde elektroner, der hele tiden bombarderer støvkornenes overflader, eller i spontane kemiske reak-

tioner på overfladen. Detaljerne i den komplicerede kemi omkring protostjerner er stadig ukendt, men det er et problem, som man er begyndt at undersøge i laboratorieeksperimenter. Det er for eksempel blevet vist, at ultraviolet bestråling af en blanding af vand-, metanol-, ammoniak-, kulmonoxid- og kuldioxid-is giver 16 forskellige aminosyrer [11].

Meteoritters kemiske rigdom

Mens vi måske er uvidende om, hvordan molekyler dannes omkring protostjerner, har vi helt uafhængig information om slutresultatet af nogle af de kemiske processer i den indre protostellare skive. Dette skyldes de nyttige budbringere fra det tidlige Solsystem, som lander på Jorden fra tid til anden, nemlig primitive meteoritter. Disse meteoritter er en million år gamle fragmenter af meget ældre moderlegemer. Så fragmenterne bærer den kemiske signatur fra den æra, da moderlegemerne blev dannet.

Der skete en vigtig begivenhed for astronomi og astrobiologi omkring kl. 10:45, søndag den 28. september 1969: en stor ildkugle eksploderede nær byen Murchison, Victoria, i Australien, og over 100 kg sortsvedne sten regnede ned over et 10-15 km² stort areal. Mærkeligt nok blev det rapporteret, at der lugtede af alkohol i byen. Uanset betydningen af den sidste observation var dette den dramatiske ankomst af den nu berømte Murchison meteorit. Dette er en af de mest primitive meteoritter, der kendes, og den bærer spor fra den æra, da Jorden blev dannet, for 4,5 milliarder år siden. Der er fundet mange korn inden i meteorittens grundmasse, og det er resterne af støvkornene fra de skyer, der dannede den præsolare og den solare tåge. Vi skal ikke gå nærmere ind på Murchisons interessante mineralogi, men nævnes skal lige tilstedeværelsen af vand, som måske kondenserede ved omkring 4 AE fra den tidlige Sol. Murchison indeholder også 2-2,5 % kulstof efter vægt og 0,09 % til 0,16 % kvælstof efter vægt i form af en række forskellige organiske stoffer, diamant, makromolekylære organiske forbindelser (f.eks. store polycykliske aromatiske hydrocarboner), grundstammer i DNA og RNA og mindst 79 forskellige aminosyrer. Af disse aminosyrer er der 8, som er kemisk identiske med dem, der findes i vore dages biokemi, hvor der er 20 aktive aminosyrer. Syv diaminosyrer er også blevet identificeret: de er bestanddele af peptid-nukleinsyrer [12], der er foreslået som de tidligste forløbere for liv, tidligere end RNA eller DNA.

I takt med at teknikken forbedres, bliver rækken af molekyler i Murchison stadigt mere omfattende, og den antyder mere og mere et uden-jordisk molekylært bidrag til livets oprindelse. Mange forskellige sukker typer og sukker-beslægtede forbindelser er blevet identificeret i mængder, der svarer til aminosyrerne [13]. Disse såkaldte polyhydroxylerede forbindelser er essentielle for alle kendte livsformer som komponenter i RNA, DNA og cellemembraner og som energikil-

der. Hertil kommer, at nylige studier viser, at mere end 50 organiske syrer (karboxylsyrer) op til C₁₀ findes i Murchison [14]. Disse og beslægtede molekyler er vigtige bestanddele af cellemembraner.

Den måske mest overraskende af alle opdagelserne er, at visse af aminosyrerne i Murchison tilsyneladende optræder som "ikke-racemiske" blandinger. En kemisk afstikker for at forklare dette: kulstof er tetra-valent, dvs. at det kan have fire kemiske grupper, f.eks. COOH, CH₃, H, OH, NH₂, fæstet til sig. Med kulstof i centrum peger disse vedhæftede grupper mod spidserne af et tetraheder. Hvis der er fire forskellige grupper hæftet til et kulstofatom, eksisterer forbindelsen i to former, som er hinandens spejlbilleder. Ligesom dine to hænder kan de ikke dække hinanden rumligt. Molekylet siges at være chiralt, og de to former kaldes "enantiomer". Disse to former kan skelnes fra hinanden gennem deres optiske egenskaber. Hvis plant polariseret lys passerer gennem en opløsning af "L-enantiomer", roterer polarisationsplanet til venstre, og passerer lyset gennem "D-enantiomer", roterer det til højre. En "racemisk blanding" er én, der indeholder præcis lige mange D- og L-enantiomer. Aminosyrer i jordisk biokemi, hvoraf 19 ud af 20 er chirale, kombinerer og danner proteiner, og i alle aktive proteiner findes der kun L-enantiomer, et fænomen som kaldes "homochiralitet". Homochiralitet er et molekylært træk, der er med til at definere livet på Jorden, og utvivlsomt også kulstofbaseret liv andre steder, idet den rumlige kompleksitet og den tilknyttede "håndethed" i kulstofkemi er en nøgle til molekylær genkendelse. I Murchison danner nogle aminosyrer racemiske blandinger, som f.eks. alanin, men andre, som isovalin, kan have en overvægt på op til 15 % af L-over D- [15]. Vi når til den højst uventede konklusion, at dannelsen eller overlevelsen af L-isovalin favoriseres over D- i et ikke-biologisk miljø, og at en vis grad af homochiral præference optræder i den interstellare og protoplanetariske fase af den kemiske udvikling gennem rent fysiske og kemiske ikke-biologiske processer. Det er usikkert, hvorledes det symmetribrud, der fører til ikke-racemiske blandinger i Murchison, er opstået, men mange "have had their tiny fling at it", for at citere Mark Twain.

Endnu et punkt understreger den interstellare forbindelse til Jorden. I kolde interstellare skyer ved 10 K, som er forstadierne til de præsolare og solare tåger, driver termokemiske og overfladekemiske mekanismer molekyler til at udskifte deres H-atomer med D-atomer, dvs. de deutererede bliver foretrukket. Deuterium til brint forholdet i Universet er ca. 2×10^{-5} . Det har imidlertid vist sig muligt, med radioastronomi, at observere så eksotiske arter som tre gange deutereret ammoniak (ND₃) [16] med en hyppighed på kun et hundrede gange mindre end NH₃ eller mange størrelsesordener højere end forventet på grundlag af det kosmiske D/H forhold. D/H fraktionering, som det kaldes, viser, at de kemiske processer har fundet sted inden i en meget kold interstellar sky, og at forbindelserne derfor er af interstellar

molekylær oprindelse. Aminosyrerne i Murchison har et D/H forhold, der er flere gange større end observeret i jordiske aminosyrer. Så Murchison aminosyrerne viser et tydeligt tegn på deres interstellare oprindelse ved deres slægtskab med forbindelser som deutereret ammoniak, formaldehyd (HDCHO, D₂CO), eddikesyre og andre mulige forløbermolekyler, hvorfra aminosyrer kan være dannet.

Den interstellare forbindelse til Jorden: levering af biomolekyler fra rummet

Det er afgjort fascinerende, når Murchison viser, at så forskellige og relevante biomolekyler blev syntetiseret i den solare tåge på det tidspunkt, da Jorden blev dannet. Men har det nogen betydning for livets opståen på Jorden? Er det muligt, at en betydelig del af forrådet af biomolekyler kan være blevet bragt til den tidlige Jord fra rummet? Kunne det være tilfældet, at den oprindelige suppe ikke blev mikset sammen i en mudret pøl ved en fortidig jordisk strand, men at det oprindelige køkken var selve rummet? Blev biomolekylerne leveret færdige til den tidlige Jord?

Når vi stiller disse spørgsmål, bevæger vi os ind på vurderinger og velinformeret spekulation. For det første er det almindeligt accepteret, gennem kratertællinger på Månen, at den unge Jord var udsat for en intensiv "periode med bombardement" af asteroider og kometter. Disse legemer kan i sig selv have leveret betydelige mængder materiale til den unge Jord. Der har faktisk mange gange været argumenteret for, og ligeså mange gange er det blevet tilbagevist, at kometter, som store himmelske isbjerge, kan have bragt store mængder vand til Jorden i denne tidlige periode. Hvad der end måtte have været tilfældet, må Jorden efter de massive nedslag, der dannede Månen, have været udsat for kraftige bombardementer indtil for 3,9 milliarder år siden, gradvist aftagende og stort set ophørt for 3,5 milliarder år siden.

Her introducerer vi mikrometeoritterne. Det er meget små meteoritter på typisk 100 mikrometer, større end interstellare korn, men meget mindre end de velkendte meteoritter. Forskere, specielt mikrometeoritpionéren Michel Maurette og hans kolleger [16], har med liv og sjæl og under meget ubekvemme forhold, i mange år, fisket i tilfrosne vandpytter i Antarktis og har fremdraget store mængder af disse meget små gæster fra rummet. De har klargjort, at antarktiske mikrometeoritter (AMM'er) er meget gamle og går helt tilbage til perioden med bombardement. De indeholder også en betydelig mængde "organisk kulstof", dvs. kulstof indeholdt i organiske stoffer. På grund af AMM'ernes lille størrelse kan analytiske teknikker ikke vise, at de indeholder den fantastiske samling af biomolekyler, som Murchison indeholder - men vi antager at nogle af dem gør det. Detaljerede observationer af AMM'erne viser, at mindre mikrometeoritter (50-100 mikrometer) passerede gennem Jordens atmosfære og dalede ned

ved ret lille gnidningsvarme, og 75 % er ikke smeltet i særlig grad. Derfor overlevede de skrøbelige organiske molekyler, som de antages at indeholde, rejsen til Jorden.

Næste skridt i argumentet: den nuværende samling af organisk kulstof, der falder til Jorden i form af mikrometeoritter, er på ca. 500 tons per år. Dette er i gennemsnit en halv million gange mere, end der falder til Jorden som nedslag af kulholdige meteoritter som Murchison. Konsekvensen er, at mikrometeoritter udgør det væsentligste bidrag til tilførslen af organisk kulstof til Jorden, ikke bare i dag, men igen hele Jordens historie. Nu kommer den vanskelige og usikre ekstrapolation tilbage i tiden: hvor meget organisk kulstof blev der tilført af mikrometeoritter til den tidlige Jord i perioden med bombardement? Michel Maurette sætter i [17] fluxen af mikrometeoritter til den tidlige Jord til en faktor 1000 højere end i dag. Dette medfører, at mængden af organisk kulstof tilført af mikrometeoritter i hele perioden med bombardement skulle have været mere end 100 gange større end den totale mængde organisk kulstof i den nuværende biosfære. Måske vil der blive sat spørgsmålstejn ved dette tal af andre eksperter, men der er i det mindste en stor fejlmargen. Tallet fører også til spørgsmålet om, hvor de andre 99 % organisk kulstof er forsvundet hen, et emne som jeg foretrækker at overlade til geologer og biologer at diskutere.

Dette er så langt, som vi kan komme i dag, hvis vi skal blive på rimelig sikker grund. For at resumere: Big Bang efterfulgt af supernovaer og flere generationer af stjerner i galakser førte til dannelsen af de 36 grundstoffer, der er nødvendige for alt liv på Jorden. Der blev dannet skyer af støv og gas mellem stjernerne, og i skyernes centre blev der dannet stjerner og planeter. Forstadier til biomolekyler dannedes i det interstellare rum, både i gasfasen og på de kolde overflader af støvkorn. På overfladen af støvkorn skaber naturen et laboratorium, hvor der lokalt er en meget høj koncentration af molekyler, modne til frembringelse af større molekyler. Vekselvirkning med højenergifotoner, kosmiske stråler og kolde elektroner tillader, at der udvikles komplekse molekyler. Omkring protostjerner leder opvarmning og ætsning til yderligere kemiske processer, både inden i den protostellare skive, hvori planeter dannes, og uden for den i supersoniske udstrømninger af gas. Den fremkomne ursuppe i rummet indeholder mange vigtige forløbere for biokemien, og ved en ukendt symmetribrydende proces skabes der oven i købet en overvægt af L- over D-aminosyrer.

Molekylerne omdannes atter og atter i et aktivt område som Orion, de går fra gas til overflade og tilbage igen, og til sidst bliver de indkapslet og beskyttet inden i større partikler. Nogle af disse partikler vokser ved sammenstød - måske til de danner klippestykker af alle størrelser op til planeter, eller måske til de bliver en del af den tidlige Jord ved den meget hurtigere proces gravitationelt kollaps. I soltågens miljø fyldt med

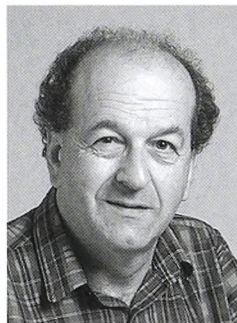
støv regner mikrometeoritter ned på den tidlige Jord for mellem 4,5 og 3,5 milliarder år siden og tilføjer Jorden de basale ingredienser til biokemien.

Hvis dette resumé indeholder de væsentlige elementer af et sandt scenario, fik udviklingen af liv på Jorden helt sikkert en fantastisk kick-start: ingredienserne til biokemien var fiks og færdige til, at udviklingen kunne begynde. Det store problem er selvfølgelig at forbinde, hvad vi ved om fysikken og kemien i stjernedannende områder, med den lange liste af molekyler i Murchison og andre meteoritter. Denne betydelige barriere kan kun overskrides ved mange års ihærdig forskning i laboratoriet og inden for astronomien.

Jeg slutter med to tanker. Den første er denne: lignende biokemisk materiale må være landet på Mars i perioden med bombardement. Hvis Mars til en vis grad er et fossil af den tidlige Jord, kan vi måske finde spor af tidligt liv på Mars, begyndt på samme måde som foreslået ovenfor for Jorden. Måske vil Mars-roverne Spirit og Opportunity, der "følger vandet" på Mars, som NASA formulerer det, kaste lidt lys over dette. Den sidste og afsluttende tanke er følgende: Solen er en ret typisk stjerne, og der er mere end 10 millioner stjerner ligesom Solen i Mælkevejen. Den ene præsolare og solare tåge ligner sandsynligvis meget den anden, og hvis Jordlignende planeter eksisterer andre steder, vil de derfor også blive bombarderet med molekylært manna, som det synes at have været tilfældet på den tidlige Jord. Dette festmåltid af biomolekyler serveres måske overalt, hvor der er Sol-lignende stjerner med planeter. Den store udbredelse af "ekstremofiler", dvs. bakterier, der elsker is eller varme, eller som sidder under en klippeoverflade og fortærer brint og metan, antyder, at hvis man blot skaber de rigtige biomolekyler og giver livet en halv chance for at udvikle sig, så udvikler det sig, selv under de barskeste betingelser. Derfor er der måske liv i hele Universet. Vi får se.

Litteratur

- [1] T. Abel, G.L. Bryan, M.L. Norman (2002), The formation of the first star in the Universe, *Science*, bind **295**, side 93.
- [2] V. Bromm, A. Loeb (2003), The formation of the first low-mass stars from gas with low carbon and oxygen abundances, *Nature*, bind **425**, side 812.
- [3] M. Mayor and D. Queloz (1995), A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature*, bind **378**, side 355.
- [4] M.A.C. Perryman (2000), Extra-solar Planets, *Rep.Prog.Phys.*, bind **63**, side 1209.
- [5] O'Dell (2001), The Orion Nebula and its associated Population, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, bind **39**, side 99.
- [6] F. Lacombe, E. Gendron, D. Rouan, Y. Clénet, D. Field, J.L. Lemaire, M. Gustafsson, A-M. Lagrange, D. Mouillet, G. Rousset and 5 coauthors (2004), VLT/NACO infrared adaptive optics images of small scale structure in OMC1, *Astr.Astrophys.*, bind **417**, side L5.
- [7] P. Schilke, D.J. Benford, T.R. Hunter, D. Lis, T.G. Phillips (2001), A line survey of Orion KL from 607 to 725 GHz, *Astrophys J.Supp.Ser.*, bind **132**, side 281.
- [8] J.B. Pollack, O. Hubickj, P. Bodenheimer, J.L. Lissauer, M. Podolak and Y. Greenzweig, (1996), Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas. *Icarus*, bind **124**, side 62.
- [9] A.P. Boss (2002), Evolution of the solar nebula. V. Disk instabilities with varied thermodynamics. *Astrophys.J.*, bind **576**, side 462.
- [10] M. Gustafsson, L.E. Kristensen, Y. Clénet, D. Field, J.L. Lemaire, G. Pineau des Forêts, D. Rouan and E. Le Coarer (2003), New insight into shocks and star formation in Orion: first light with GriF. *Astron.Astrophys.*, bind **411**, side 437.
- [11] G.M. Munoz Caro, U.J. Meierhenrich, W.A. Schutte, B. Barbier, A. Arconers Segovia, H. Rosenbauer, W.H-P. Thiemann, A. Brack and J.W. Greenberg (2002), *Nature*, bind **416**, side 403.
- [12] P.E. Nielsen (1999), Peptide Nucleic Acids. Methods and Protocols. Methods in Molecular Biology, Humana Press. ISBN. 0-89603-976-5
- [13] G. Cooper, N. Kimmich, W. Belisle, J. Sarinama, K. Brabham and L. Garrel (2001), Carbonaceous meteorites as a source of sugar-related organic compounds for the early Earth. *Nature*, bind **414**, side 879.
- [14] Y. Huang, Y. Wang, M. De'Rosa, M. Fuller and S. Pizzarello (2004), Molecular and compound-specific isotopic study of monocarboxylic acids in Murchison and Antarctic meteorites. *Lunar and Planetary Science*, bind **XXXV**, side 1888.
- [15] S. Pizzarello, M. Zolensky and K.A. Turk (2003), Non-racemic isovaline in the Murchison meteorite: chiral distribution and mineral association. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, bind **67**, side 1589.
- [16] F.F.S. van der Tak, P. Schilke, H.S.P. Müller, D.C. Lis, T.G. Phillips and E. Roueff (2003), Triply Deuterated ammonia in NGC1333, *Astron.Astrophys.*, bind **388**, side L53.
- [17] M. Maurette (1998), Micrometeorites on the early Earth. Kap. 7 af "The molecular origins of life: assembling pieces of the puzzle", ed. A. Brack. CUP 1998. ISBN 0 521 56475 1. Dette er en fremragende introduktionstekst til Astrobiologi, men er dog lidt forældet nogle steder.



David Field arbejder på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet inden for områderne observationel astronomi og kollision med kolde elektroner.