

Hvordan dannes beboelige planeter?

Martin Bizzarro og Anders Johansen, Globe Institutet, Københavns Universitet

Solsystemet blev længe anset for at være det eneste beboelige planetsystem. Denne opfattelse er blevet anfægtet ved opdagelsen af, at planeter omkring solignende stjerner er almindelige i vores galakse, herunder kloder, der minder om Solsystemets jordlignende planeter. Dette giver mulighed for, at planeter som Jorden og liv findes andre steder i universet. I de seneste år har ny forskning fra Københavns Universitet ændret på vores forståelse af, hvordan jordlignende planeter dannes. Denne forskning kombinerer analyse af gamle meteoritter med planetdannelsesteori og viser, at Jorden blev dannet på kun få millioner år, mens den unge Sol stadig var omgivet af en protoplanetar skive af gas og støv. I dette nye paradigme, hvor planeter dannes hurtigt, erhverver de jordlignende planeter både vand og organiske molekyler, mens de vokser sig store i den protoplanetare skive. Tilstedeværelsen af vand på Jorden er ved denne teori en forudsigelig konsekvens af vores planets hurtige dannelse. Disse resultater har betydning for hyppigheden af beboelige planeter uden for vores Solsystem.

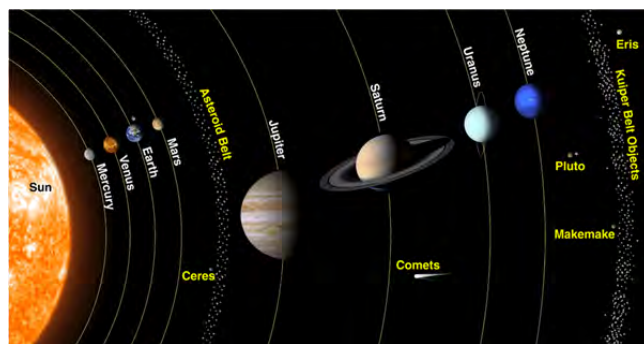
Solsystemet og beboelige planeter

Vores Sol omkredses af otte store planeter, et par håndfulde mindre dværgplaneter og et væld af asteroider, der hovedsageligt befinder sig mellem Mars og Jupiter og uden for Neptuns bane (se Figur 1). De fire planeter, der er tættest på Solen – det vil sige Merkur, Venus, Jorden og Mars – er kendt som de jordlignende planeter. De er kendetegnet ved at have en metalkerne og en kappe af sten. De jordlignende planeter har en række meget forskellige atmosfærer: Merkur har ingen atmosfære, Mars har en tynd atmosfære af kuldioxid (CO_2), Jordens atmosfære er domineret af nitrogen (N_2) og ilt (O_2), mens Venus har en knusende CO_2 -atmosfære med næsten 100 gange højere tryk end på Jorden. Jorden er en meget speciel planet, fordi Jorden er den eneste planet i Solsystemet, som har et omfattende hav på overfladen – og naturligvis fordi livet opstod på Jorden for mere end 4 milliarder år siden. Livets evne til at omdanne CO_2 ved fotosyntese til biologisk anvendeligt kulstof (C) og molekylær ilt (O_2) har haft stor betydning for atmosfærens sammensætning.

Det er vigtigt at forstå dannelsen og udviklingen af de jordlignende planeter i Solsystemet for at få indsigt i, hvor mange beboelige planeter, der potentielt findes i vores galakse. Forståelsen af, hvordan de jordlignende planeter blev dannet, er nøglen til at forstå livets oprindelse. De fire jordlignende planeter i Solsystemet giver os meget forskellige eksempler på, hvordan sådanne planeter kan dannes og udvikle sig. Merkur blev dannet for tæt på Solen til at holde på sin atmosfære, og planetens overflade ligner i dag Månens: grå og domineret af ældgamle kratere. Venus startede sandsynligvis med oceaner som Jordens, men Venus' placering tættere på Solen udløste en løbsk drivhuseffekt, hvorved vanddamp i atmosfæren opvarmede oceanerne, så de frigjorde mere og mere damp i en feedback-proces. Vandmolekylerne (H_2O) blev spaltet til hydrogen (H_2) og ilt (O) af Solens intense ultraviolette stråling. De lettere H_2 -molekyler undslap atmosfæren og efterlod en planet uden oceaner.

Jorden slap af med sin tykke, oprindelige CO_2 -

atmosfære ved, at CO_2 blev opløst i havene, og kulstoffet blev begravet som karbonatsten i kappen. Denne proces kunne ikke finde sted på den udtørrede Venus, hvilket forklarer Venus' tætte atmosfære. Mars kredser længere væk fra Solen end Jorden, men Mars' lave masse og svage tyngdekraft betød, at det meste af dens atmosfære forsvandt inden for 100 millioner år efter dens dannelse. I dag har Mars kun en tynd CO_2 -atmosfære tilbage. Manglen på en betydelig drivhuseffekt på Mars afkølede det resterende vand, der dannede et lag af permafrostis, som i dag befinder sig under overfladen og ved polerne. Jorden undgik den løbske drivhuseffekt, da Jorden blev dannet i større afstand fra Solen end Venus i kølligere omgivelser, og Jorden lykkedes med at bevare sin atmosfære ved tyngdekraftens hjælp, da Jorden er ti gange tungere end Mars.



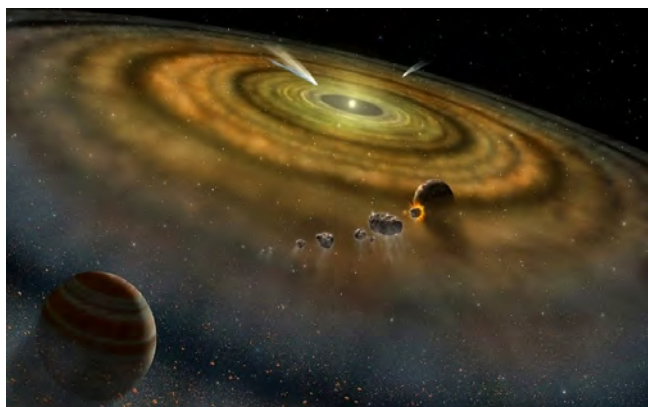
Figur 1. Billedet viser Solsystemet. Afstandene er ikke gengivet i korrekt skala. De jordlignende planeter kredser tættest på Solen. Asteroidbæltet adskiller dem fra kæmpeplaneterne. Bag Neptuns bane ligger endnu et asteroidebælte, Kuiperbæltet. Dværgplaneterne Ceres, Pluto, Makemake og Eris er også markerede. Kilde: NASA.

I dag er der kendskab til mere end 5.000 planeter omkring andre stjerner [1]. Disse planeter kaldes for exoplaneter og kan potentiel være værter for liv. Der er en masse data tilgængelig om exoplanetsystemer, mens der stadig er meget lidt viden om andelen af stjerner, der er vært for små stenplaneter med samme masse og kredsløb som Jorden. De fleste exoplaneter, som vi kender, kredser enten tættere på deres værtsstjerne end

Jorden eller er meget tungere. Det skyldes, at exoplaneter med disse karakteristika er nemmere at opdage med de mest almindelige teknikker til at observere planeter. Karakteristika for de opdagede exoplaneter med hensyn til masse og kredsløb er derfor ikke nødvendigvis repræsentative for alle typer exoplaneter, som faktisk kredser om stjernerne.

Gamle sten fra rummet giver spor om Jordens dannelse

Planetsystemer som vores eget dannes ved, at en kæmpe molekylesky kolliderer under sin egen tyngdekraft (se figur 2). Det meste af den kollapsede masse samles i midten og danner en central stjerne, mens resten af massen spreder sig ud i en fladtrykt og roterende protoplanetarisk skive, der består af støv og gas. Astronomiske observationer viser, at disse skiver kun eksisterer i nogle få millioner år. Skivens relativt korte levetid skyldes, at skivematerialet langsomt falder ind mod den centrale stjerne. Noget støv samler sig imidlertid til millimeterstore partikler. Disse småsten danner større planetesimaler, som minder om asteroiderne i det nuværende asteroidebælte mellem Mars og Jupiter. Planetesimalerne udgør de første byggesten for større planeter. Observationer af protoplanetariske skiver giver således en direkte indsigt i forholdene, hvorunder planeter dannes.



Figur 2. En kunstners afbildning af en planetdannende skive, der omgiver en ung sollignende stjerne. Kilde: NASA.

Kort efter sin fødsel for 4,5 milliarder år siden var vores unge Sol omgivet af en skive, som indeholdt det materiale, som senere dannede Solsystemets planeter. De eneste bevarede spor af denne fjerne fortid kommer fra meteoritter. Det vil sige gamle rumsten, der styrter ned på Jorden. De fleste meteoritter er fragmenter af asteroider, der blev dannet, da Solens protoplanetariske skive stadig eksisterede for cirka 4,5 milliarder år siden. Derfor kan disse gamle sten anvendes som tidskapsler til at studere processer og forhold, der eksisterede, da planeterne i Solsystemet, herunder Jorden, blev dannet. Meteoritter kan groft sagt opdeles i to grupper, nemlig primitive og differentierede meteoritter. Differentierede meteoritter er stykker af asteroider, der ligesom Jorden engang har været smeltet og dannet en metallisk kerne, en silikatkappe og silikatskorpe. I modsætning til differentierede meteoritter kommer primitive meteoritter – kondritter – fra asteroider, som undgik at smelte

og dermed har været uforandret i 4,5 milliarder år. Kondritter indeholder fortsat alle de grundstoffer, der fandtes i Solens protoplanetariske skive, og de giver os mulighed for at bestemme, hvilket materiale de jordlignende planeter blev dannet af. Kondritterne kan studeres i laboratorier. Her analyseres deres kemiske, isotopiske og kronologiske karakteristika for at opnå en forståelse af kondritternes dannelseshistorie ved at se på, hvilket materiale de har arvet fra skiven, og hvornår de forskellige komponenter i kondritterne blev dannet.

Kondritter består primært af kondruler. Kondruler er millimeterstore kugler, der engang må have været små, smeltede sten, som svævede frit rundt i den protoplanetariske skive. Kondrulerne bindes sammen af en finkornet matrix (figur 3). Matrixen består af støv i mikrometerstørrelse, som var til stede i den protoplanetariske skive, herunder materiale, der er direkte nedarvet fra molekyleskyen, som skiven dannedes af. Detaljerede undersøgelser af matrixen i kondritter har afsløret, at den indeholder stjernestøv. Stjernestøv er små krystaller, der er dannet i døende stjerner før Solens fødsel, og omfatter støv dannet i gigantiske supernovaeksplosioner.

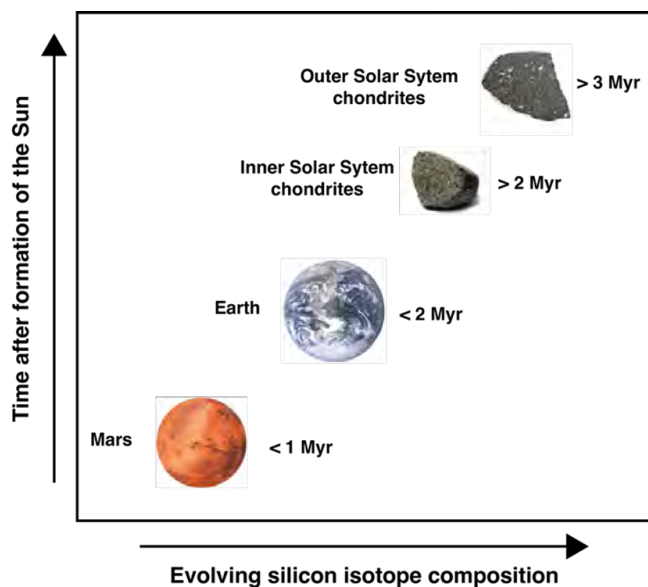
En vigtig observation, som har store konsekvenser for forståelsen af planeternes oprindelse, er, at asteroider, der er dannet i det iskolde, ydre solsystem, indeholder meget mere supernova-støv end asteroider, der er dannet i det varme, indre solsystem. Denne forskel giver mulighed for at identificere kilden til det materiale, der dannede planeterne, selvom årsagen til kontrasten mellem det indre og det ydre solsystem diskuteres blandt forskere. Ved at se på planeternes og asteroidernes isotopsammensætning kan man bestemme deres relative andel af materiale fra det indre og det ydre Solsystem. Planeternes isotopsammensætning er derfor ligesom DNA, fordi den fortæller os, hvor deres oprindelsesmateriale kommer fra i Solsystemet.



Figur 3. Et udsnit af Allendekondritten. De små afrundede objekter er kondruler, og det grå materiale er CAI'er (Calcium-Aluminium rich Inclusions), som kondenserede tæt på Solen kort efter Solens dannelse. Mellem kondrulerne ses den finkornede matrix. Terningen er en cm i størrelse. Kilde: Martin Bizzarro.

I de senere år har flere undersøgelser vist, at Jorden er lavet af en blanding af materiale fra det indre og ydre Solsystem [2,3]. Denne observation har afgørende betydning for forståelsen af, hvordan Jorden er dannet, og årsagen til, at Jorden har fået det vand

og organiske materiale, som er nødvendigt for, at liv kan udvikle sig. En af de seneste undersøgelser har fokuseret på isotopsammensætningen af grundstoffet silicium i forskellige meteoritter samt på Jorden og Mars. Silicium er det mest hyppigt forekommende grundstof i jordlignende planeter. Derfor er målinger af planeternes sammensætning af siliciumisotoper et effektivt redskab til at forstå deres oprindelse [4]. Det vigtigste resultat af dette arbejde er, at isotopsammensætningen af materialet, der var til stede, hvor de jordlignende planeter blev dannet, udviklede sig fra en sammensætning som i det indre Solsystem til en sammensætning som i det ydre Solsystem inden for nogle få millioner år efter Solens fødsel (figur 4). Denne tidsmæssige ændring i skivematerialets sammensætning kan bruges som et ur til at bestemme, hvornår Jorden blev dannet. Jordens isotopsammensætning viser, at Jorden ikke er lige så udviklet i retning af det ydre Solsystems sammensætning sammenlignet med isotopsammensætningen for kondritmeteoritterne. Det betyder, at vores planet afsluttede sin vækst inden for få millioner år. Jorden må derfor være blevet dannet, mens der stadig var en skive af støv og gas omkring den unge Sol, og Jordens vækst blev drevet af materiale, der blev transporteret indad gennem den protoplanetariske skive. Dette materiale inkluderede småsten, som var dækket af is og indeholdt store mængder organiske molekyler. Disse resultater giver en fuldstændig omlægning af både modeller og tidsskalaer for planeternes dannelse. Dette har en dramatisk indvirkning på vores forståelse af de betingelser, der muliggør dannelsen af jordlignende planeter.



Figur 4. Tegningen viser forskellige legemers dannelses-tidspunkter i forhold til deres sammensætning i siliciumisotoper. Små planeter som Mars blev dannet indenfor en million år (Myr) efter Solens fødsel. Kondriternes moderlegemer blev dannet i slutningen af den protoplanetariske skives levetid, mere end to til tre millioner år efter Solens dannelse. Jordens silicium viser, at vores planet blev dannet før kondritterne. Kilde: Martin Bizzarro.

En ny teori – planeter dannes ved at indfange småsten

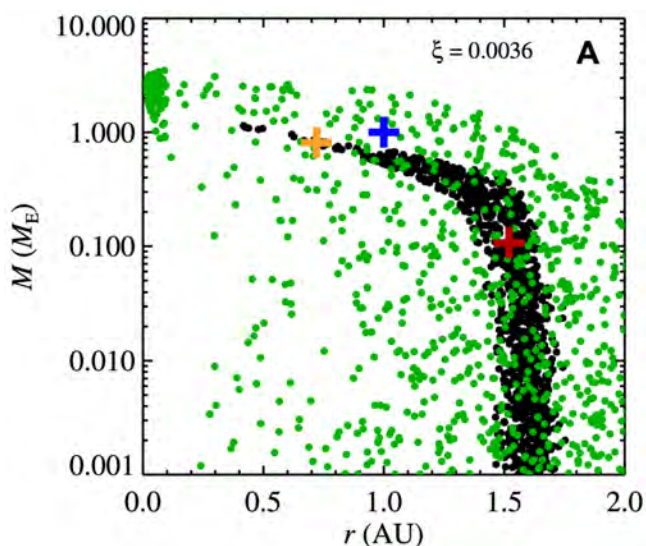
I 2015 rettede astronomer de nystartede ALMA-teleskoper i Chile mod den unge stjerne HL Tau, som befinder sig cirka 500 lysår fra Solen. ALMA er en samling af 66 radioteleskoper, der observerer stråling ved millimeterbølgelængder med meget høj opløsning. Stjerner udstråler meget lidt lys ved sådanne bølgelængder, og derfor er ALMA et fremragende instrument til at detektere varmestrålingen fra koldt støv, der kredser omkring unge stjerner. HL Tau viste sig at være omgivet af en protoplanetarisk skive af støv og gas af samme størrelse som vores Solsystem. Størrelsen af de partikler, der udsender varmestråling, bestemmes ud fra hvordan varmestrålingens intensitet afhænger af strålingens bølgelængde. Partikler, der er meget større end den observerede bølgelængde, absorberer og udsender stråling fra hele deres geometriske tværsnit, mens mindre støvpartikler lader det meste af millimeterstrålingen passere igennem sig. Støvet mellem stjernerne i Mælkevejen er typisk meget mindre end 1 mikrometer i størrelse. Den store mængde varmestråling fra HL Tau og andre unge stjerner ved lange bølgelængder giver et klart bevis på, at støvet er vokset fra mikrometerstørrelse til småstenstørrelse. ALMA havde derfor observeret det første skridt i planetdannelsen. Tilstedeværelsen af småsten i protoplanetariske skiver var allerede blevet observeret et årti tidligere med andre instrumenter, men med ALMA blev det muligt at producere højopløste billeder af sådanne skiver.

Det næste spørgsmål er, hvordan kan planeter vokse sig større end bare småsten? Laboratorieeksperimenter viser, at kollisioner mellem småsten fører til ødelæggelse af småstenene snarere end til vækst, når kollisionshastigheden er højere end 1 m/s. Men supercomputersimuleringer har afsløret et overraskende nyt fænomen. De småsten, der bevæger sig rundt i gassen, samler sig spontant i tætte klumper. Effekten kaldes for tostrømsinstabiliteten (eller streaming instability). Tostrømsinstabiliteten kan sammenlignes med, hvordan fugleflokke på træk og cykelryttere i Tour de France samler sig i grupper for at reducere den samlede luftmodstand på gruppen. Klumperne trækker sig sammen under småstenenes indbyrdes tyngdekraft og danner planetesimaler med en typisk størrelse på 100 km. Asteroidebæltet mellem Mars og Jupiter er rester af sådanne planetesimaler, som blev dannet for mere end 4,5 milliarder år siden.

Det næste trin i planetdannelsen viser sig imidlertid at være lige så vanskeligt. Planetesimalerne kolliderer alt for sjældent til at danne kæmpeplaneter. Kæmpeplaneter som Jupiter og Saturn består af en tæt kerne med en masse, der er 10 gange så stor som Jordens. Efterhånden som denne kerne vokser i den protoplanetariske skive, opnår den tilstrækkelig tyngdekraft til at tiltrække brint- og heliumgas og vokse sig til en kæmpeplanet på flere hundrede jordmasser. Det kræver en kerne for at få dannet en kæmpeplanet, men kernen vokser alt for langsomt ved indfangning af planetesimaler.

Tilstedeværelsen af store populationer af småsten i den protoplanetariske skive viste sig at være en plausibel løsning på dannelsen af kæmpeplaneter. Sådanne småsten indfanges meget effektivt af en voksende

kerne, fordi gassen bremser småstenene, hvilket gør dem meget lettere at fange. Det ser derfor ud til, at småstensindfangning (eller pebble accretion) er en absolut nødvendighed for dannelsen af kæmpeplaneter. I dette lys var det naturligt at tage de klassiske modeller for Jordens dannelse op til fornyet overvejelse. De klassiske modeller antager, at planetesimalerne tæt på Solen kolliderede og dannede større protoplaneter, som senere kolliderede i gigantiske sammensmeltninger i en periode på 100 millioner år for at danne de jordlignende planeter. Denne model var hovedsageligt baseret på tilstedeværelsen af asteroiderne mellem Mars og Jupiter, og modellen blev formuleret længe før der blev observeret småsten i protoplanetariske skiver. Der er en fascinerende lighed mellem de jordlignende planeter og kæmpeplaneterne: de større planeter (Jorden/Venus og Jupiter/Saturn) kredser tættere på Solen end de mindre planeter (Mars og Uranus/Neptun). Vi ser her bort fra Merkur, som sandsynligvis blev dannet ved sammenstød mellem jern-asteroider tæt på Solen. Denne arkitektur kan naturligt forklares, hvis planeterne vokser ved småstensindfangning i den protoplanetariske skive, fordi større planeter dannes over længere tid og derfor er tvunget til at bevæge sig tættere på Solen af tyngdekraften fra den protoplanetariske skive.



Figur 5. Computersimuleringer af hvordan forskellige jordlignende planeter kan dannes ved småstensindsamling under forskellige forhold. x-aksen viser afstanden fra stjernen målt i AU (afstanden mellem Jorden og Solen) og y-aksen viser planetens masse i enheder af Jordens masse [5]. Venus, Jorden og Mars er indikeret med plussymboler (hhv. orange, blå og rød). De sorte planeter startede deres vækst fra et snævert bælte af asteroider ved 1,6 AU fra stjernen, hvorimod de grønne planeter viser resultatet af at starte planeterne i et bredere område. De jordlignende planeter er under alle omstændigheder lette at danne ved småstensindfangning.

Figur 5 viser, hvordan forskellige jordlignende planeter dannes i computersimuleringer af småstensindfangning og migration [5]. Småstensindfangning forklarer naturligt, hvorfor Jorden og Mars roterer om deres akse i samme retning, som de kredser om Solen, da rotationen om egen akse er en simpel konsekvens af bevarelsen af småstenenes impulsmoment (Venus har en retrograd rotation, men roterer ekstremt langsomt om sin akse

i dag; dette skyldes formentligt, at tidevandskraften fra Solen på Venus' tætte atmosfære har ledt til en kraftig reduktion af Venus' oprindelige rotation). I småstensindfangningsmodellen dannes de jordlignende planeter i løbet af nogle få millioner år inde i den gasrige protoplanetariske skive, hvilket er meget hurtigere end i den klassiske model. I løbet af denne tid driver småstenene gennem den protoplanetariske skive mod stjernen. Småstensindfangning forklarer, hvordan Jorden kunne samle materiale fra både det indre Solsystem og fra det ydre Solsystem. Dette stemmer overens med, hvad målingerne af siliciumisotoperne viste.

Vandets oprindelse på Jorden

I den gamle teori for planetdannelse foreslås det, at de jordlignende planeter dannes i etaper. Først klæber små støvpartikler sig sammen til planetesimaler med en diameter på 10-100 km. Disse planetesimaler støder derefter sammen og danner protoplaneter og planeter. Dette sker over en tidshorizont på 50-100 millioner år. I denne teori foregår tilførslen af flygtige grundstoffer og organiske molekyler, hvis indhold af kulstof og kvælstof er afgørende for liv, ved tilfældige kollisioner med isrige asteroider sent i planeternes dannelseshistorie. I det nye paradigme med småstensindfangning dannes stenplaneter som Jorden derimod indenfor den protoplanetariske skives levetid. Dette giver mulighed for, at vand og organiske molekyler blev leveret til Jorden under planetens dannelsesfase.

Et vigtigt begreb inden for planetvidenskab er den såkaldte islinje. Det er den afstand fra Solen i den protoplanetariske skive, hvor det er koldt nok til, at flygtige molekyler som is, ammoniak, metan, kuldioxid og kulilte kan kondensere til faste iskorn. Temperaturen i den indre del af den protoplanetariske skive, hvor Jorden blev dannet, blev gradvist koldere over de første få millioner år efter Solens dannelse. Derfor må islinjens position være vandret indad mod de jordlignende planets dannelsesområde [6]. Det betyder, at planeterne ud over at indsamle små klippestykker også kunne indsamle mere og mere is, efterhånden som islinjen bevægede sig indad. Computersimuleringer af småstensindfangning har nu vist, at Jordens indhold af vand, kulstof og kvælstof kan gengives inden for rammerne af den nye teori. Kulstof og kvælstof er vigtige bestanddele af de organiske molekyler, som findes i meteoritter. Resultaterne fra disse simuleringer viser, at det er muligt nøje at reproducere Jordens vand- og kulstofindhold kvantitativt, inklusiv den del som i dag findes utilgængelig opløst i jernet i Jordens kerne. Dette vand og kulstof opløstes i smeltet sten og jern i Jordens kappe, som var opsmeltet til et flydende magmaocéan på grund af den store mængde varme, som planetens dannelse udløste. Det tunge jern, som indeholdt store mængder vand og kulstof, regnede langsomt ned og dannede Jordens kerne. Den resterende mængde vand og kulstof i magmaocéanet blev udgasset til Jordens første atmosfære efter magmaocéanet størknede. Dette er et vigtigt resultat, fordi det i bund og grund betyder, at vand og organiske molekyler var en del af Jordens byggesten. Ud fra dette nye perspektiv må mængden

af vand, der er tilført Jorden, være et direkte resultat af planetens dannelse ved at indfange millimeterstore småsten.

Er der andre jordlignende verdener i galaksen?

De tidligste spor af bakteriel aktivitet på Jorden findes i sten, der er mindst 3,8 milliarder år gamle, blot 700 millioner år efter planetens dannelse. Det tog sandsynligvis et par hundrede millioner år for den nyfødte Jords kvælende CO₂-atmosfære at blive opløst i havene og blive begravet som karbonatsten i kappen. Det korte tidsrum mellem Jordens afkøling og livets opståen må betyde, at livet kan udvikle sig så snart de rigtige betingelser er til stede.

Astronomer kender i dag til adskillige planeter omkring andre stjerner med samme størrelse som Jorden, og som kredser i den såkaldte beboelige zone. Den beboelige zone er defineret som de afstande fra stjernen, hvor der kan være flydende vand på overfladen. Alle disse planeter kredser dog om røde dværgstjerner, der er langt mindre lysstærke end Solen. Et berømt eksempel er TRAPPIST-1-systemet, der ligger 40 lysår fra Solen, og hvor 4 af de 7 planeter befinder sig i den beboelige zone. James Webb-rumteleskopet blev opsendt i 2021 og har observationer af TRAPPIST-1-systemet som et vigtigt videnskabeligt mål. De første observationer af den inderste planet, TRAPPIST-1b, viste, at planeten sandsynligvis mangler en atmosfære. Små stjerner som TRAPPIST-1 har en meget høj udstråling i det energirige røntgenområde af spektret. Når en planet bombarderes med røntgenstråler over milliarder af år, kan dette føre til en omfattende erosion af atmosfæren. Det bliver spændende at følge, når flere af TRAPPIST-1-planeterne bliver observeret i de kommende år. Måske vil observationerne resultere i flere planeter uden atmosfære, og i så fald vil vi lære mere om de mekanismer, der fører til tab af atmosfære. Eller måske vil vi få de første beviser på tilstedeværelsen af en atmosfære omkring en jordlignende planet i kredsløb om en anden stjerne. Sådanne observationer vil under alle omstændigheder give os vigtig indsigt i de betingelser, der er nødvendige for at gøre en planet beboelig og muliggøre livets oprindelse.

Litteratur

- [1] W. Zhu og S. Dong (2021) “Exoplanet Statistics and Theoretical Implications”, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, bind 59, side 291–336.

- [2] M. Schiller, M. Bizzarro og V.A. Fernandes (2018) “Isotopic evolution of the protoplanetary disk and the building blocks of Earth and the Moon”, *Nature*, bind 555, side 507–510.
- [3] M. Schiller, M. Bizzarro og J. Siebert (2020) “Iron isotope evidence for very rapid accretion and differentiation of the proto-Earth”, *Science Advances*, bind 6, eaay7604.
- [4] I.J. Onyett, M. Schiller, G.V. Makhatadze, Z. Deng, A. Johansen og M. Bizzarro (2023) “Silicon isotope constraints on terrestrial planet accretion”, *Nature*, bind 619, side 539–544.
- [5] A. Johansen, T. Ronnet, M. Bizzarro, M. Schiller, M. Lambrechts, Å. Nordlund og H. Lammer (2021) “A pebble accretion model for the formation of the terrestrial planets in the Solar System”, *Science Advances*, bind 7, eabc0444.
- [6] S. Ida, T. Yamamura og S. Okuzumi (2019) “Water delivery by pebble accretion to rocky planets in habitable zones in evolving disks”, *Astronomy and Astrophysics*, bind 624, side A28.



Martin Bizzarro er professor ved Globe Institutet på Københavns Universitet. Hans forskning er fokuseret på at forstå den tidligste udvikling af vores solsystem gennem brug af isotopforholdsmålinger med høj præcision i ekstraterrestriske materialer. Han er desuden direktør for Center for Stjerne- og Planetdannelse (www.starplan.dk).



Anders Johansen er professor ved Globe Institutet på Københavns Universitet. Hans forskning fokuserer på dannelsen af planeter, egenskaberne af de første atmosfærer af klippeplaneter og livets oprindelse.

Odin

Odin er den viseste af alle de nordiske guder. Han holder sig konstant orienteret om universets tilstand – og søger i og udforsker det ukendte. I sin uafbrudte jagt efter kundskab, bruger han, blandt andet, sine to ravne, Huginn og Munin. “Huginn” betyder “tanke/den som tænker” – evnen at tænke og iagttagelse – mens “Munin” betyder “minde/den som husker” – evnen at huske, og erfaring.

Huginn og Munin

“Huginn og Munin flyver hver dag hen over Jordens grunde. Jeg frygter at Hugin ej kommer hjem, men ængstes dog mere for Munin.”

Fra Odins omtale af sine to ravne i det oldnordiske eddakvad “Grimnirsmál”. Odin er bekymret for at miste evnen til at tænke, men endnu mere for at miste evnen til at huske.