

Historien om hvordan alting blev til: Meteoritter og Solsystemets oprindelse

Af Henning Haack

Set med et menneskes forholdsvis begrænsede tidshorisont vil de fleste nok opfatte Jorden og resten af Solsystemet som evige og uforanderlige. Trods denne tilsyneladende uforanderlighed er vi vant til, at alting har en begyndelse og en afslutning, og vi har derfor spekuleret over hvordan verden opstod, lige så længe som vi har været intelligente nok til at fundere over andet end at overleve og føre slægten videre. De fleste religioner har derfor en skabelsesberetning, der vidner om vores higen efter svar på det nok største spørgsmål, vi kan stille: "Hvorfor er vi her?". Det er den samme higen efter svar der driver forskerne, og vi er nu kommet så langt, at vi, i store træk, kan beskrive den serie af begivenheder, der begyndte med Big Bang og ultimativt endte med at mennesket havde udviklet sig til en niveau, hvor vi kan begynde at rekonstruere vores egen forhistorie.

Vores intellektuelle og tekniske formåen har gennemgået en ufattelig udvikling på bare 50.000 år (svarende til 0,01 promille af Jordens alder), og vi er nu nået et stade, hvor vi for alvor kan finde svaret på det store spørgsmål: "Hvorfor er vi her?". Vi har opnået en dyb forståelse for naturens love og vi har undersøgt os selv, planeten, Solsystemet, galaksen og store områder omkring os i Universet. En af menneskehedens store triumfer er derfor, at det er lykkedes os, ved en gigantisk intellektuel kraftanstrengelse, i store træk at rekonstruere de sidste 13800 millioner års udvikling, baseret på de opdagelser og de erkendelser vi har gjort. Hvis man kunne se hele udviklingen udefra, ville man derfor kunne konstatere, at den suppe af brint og helium, der opstod efter big bang, nu har udviklet sig til mindst en intelligent livsform, der er istand til at se tilbage i tiden og forstå sin egen oprindelse.

En væsentlig forskel på den videnskabelige model for universets udvikling og de religiøse bud er at vi véd at den videnskabelige er forkert! Netop det at finde fejl er en afgørende drivkraft i vores jagt på den store historie om, hvordan hele vores verden blev til. Hver gang vi finder en fejl, går vi i tænkeboksen, måler noget nyt eller sørger for på anden vis at få rettet op på historien. Umiddelbart kan det være frustrerende, når man laver en stribe observationer for at få bekræftet en model – og de så viser sig at passe dårligt med modellen. På længere sigt kan det ikke desto mindre vise sig at være langt mere værdifuldt. Jo mere overraskende data er, jo mere tvinger de os til at ændre vores opfattelse. Overraskende data indeholder derfor langt mere information end de data, der dybest set blot bekræftede det, vi mente at vide i forvejen. Historien om hvordan Solsystemet opstod handler derfor også om de mange gange, hvor vi er blevet overraskede og har måtte forholde os kritisk til det vi troede på.

Alt hvad vi omgiver os med i vores verden, mennesker, dyr, planter, planeten vi bor på, og stjernen, der giver os lys, liv og varme er resultatet af en skelsættende begivenhed, der fandt sted for 4567,3 millioner år siden [7]. Da Solsystemet blev til var Universet allerede over 9000 millioner år gammelt, og det er der flere gode grunde til. Til at starte med fandtes der stort set kun to grundstoffer: brint og helium. I de første 9000 millioner år omdannede generationer af stjerner brint og helium

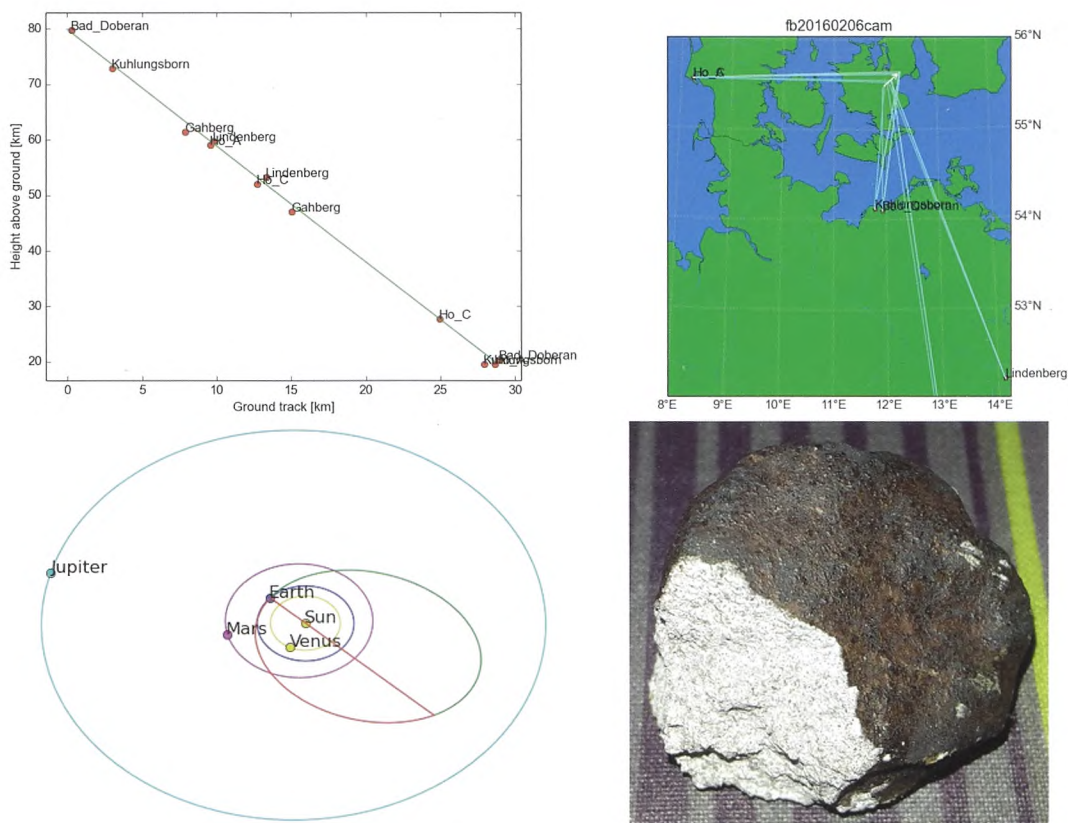
til alle de andre naturligt forekommende grundstoffer i det periodiske system. Alle de grundstoffer, der skulle til at danne Jorden, livet og ikke mindst os selv, var dermed tilstede og scenen sat til at lave et Solsystem, med en planet hvorpå livet kunne udvikle sig.

Det tog mange millioner år at opbygge Jorden, så det er ikke materiale fra vores egen klode vi skal studere, hvis vi vil finde ud af hvordan Solsystemet blev til og hvad der skete i de første få millioner år, hvor støv og gas begyndte at blive til planeter, måner m.m. Det er her meteoritterne kommer ind i billedet. Meteoritter indeholder det ældste faste stof vi nogen sinde kommer til at studere. Det er helt unikt, at vi kan stå med en meteorit i hånden, der ikke bare er ældre end den planet vi står på, men som indeholder partikler og informationer om Solsystemets oprindelse for 4567,3 millioner år siden! Ved at bruge sporene i meteoritterne kan vi, ligesom en retsmediciner der skal opklare en forbrydelse, rekonstruere begivenheder, der ikke bare ligger ufatteligt langt tilbage i tid – men som også er ansvarlige for, at vi er her i dag.

Meteoritternes information om Solsystemets oprindelse er fascinerende i sig selv – men deres ankomst til Jorden er ikke mindre spektakulær. Inden vi dykker ned i, hvad meteoritterne kan lære os om vores oprindelse vil jeg lige give et eksempel på hvad man kan opleve, hvis man er så heldig at opleve et meteoritfald.

Ejby-meteoritten

Den 6. februar 2016 kl 22:07:19 oplystes himlen over Sjælland af en meget kraftig ildkugle. Det var skyet over Sjælland, men skyerne blev gennemlyst og badede landskabet nedenunder i et blåhvidt skær. Jeg sad selv og så en film i min stue, men selv om jeg ikke så direkte på vinduerne, lagde jeg alligevel mærke til at haven pludselig oplystes i det kraftige blå-hvide lys. Kort efter begyndte det at vælte ind med observationer via vores hjemmeside www.ildkugle.dk. For at kunne håndtere de mange øjenvidneberetninger, der kommer ind når der er ildkugler over Danmark, lavede vi for nogle år siden siden ildkugle.dk, hvor man kan indrapportere observationer af ildkugler. Alle oplysninger samles i en database, hvorfra vi kan gå ind og trække særligt vigtige observationer ud – f.eks. dem, der har set ildkuglen passere lige hen over sig eller dem, der har befundet sig i nærheden af et eventuelt nedfaldssted.



Figur 1. Billederne og videoen af Ejby-ildkuglen kan bruges til at kortlægge meteoridens bane gennem atmosfæren. (1) Ildkuglens højde over Jorden langs sporet op over Sjælland. De røde punkter er pejlinger baseret på de fire fotografier og videoen af ildkuglen. (2) Ildkuglens bane op over Sjælland (hvid pil) og pejlingene fra de fem observationssteder. (3) Ejby-meteoridens bane om Solen inden den ramte Jorden. Banen hælder lidt i forhold til ekliptika. Den grønne del ligger over ekliptika og den røde del ligger under. (4) Det første fragment, der blev fundet af Ejby-meteoritten. Meteoritten måler ca. 5 cm i bredden. Læg mærke til den karakteristiske smelteskorpe, der ses som et sort lag på meteorittens overflade. Den er ca. 0,1 mm tyk og skarpt afgrænset mod det indre af meteoritten, der ses nederst t.v. hvor der er brækket et stykke af i nedslaget på fliserne. Afsmeltningen i atmosfæren har givet meteoritten blødt afrundede former. Figurer fra bl.a. [1]. Grafik: Anton Norup Sørensen.

Ildkuglen var så kraftig, at den blev fotograferet på over 900 kms afstand – fra de Østrigske Alper. Den blev også fanget af tre kameraer i Tyskland og af et overvågningskamera på et sommerhus ved Ho på den danske vestkyst. Efter at have læst de første øjenvidneskildringer på ildkugle.dk var vi enige om at sporet endte over det østlige Sjælland, men meget nærmere kunne vi ikke umiddelbart komme det. Der var ganske vist rigtig mange øjenvidner fra København – men det kunne jo godt skyldes, at der bare er langt flere mennesker på gaden i København. Enkelte øjenvidner fortalte om at have hørt overlydsbrag og det tydede på, at objektet havde overlevet turen gennem det meste af atmosfæren. Meget tydede på at der kunne være faldet en meteorit!

Dagen efter var jeg på turne, fra kl. 6 om morgenen, fra det ene nyhedstudie til det andet, hvor jeg fortalte om at man i dag havde en helt enestående chance for at gå ud og finde nyfaldne sten fra Solsystemets oprindelse. Da jeg kom hjem midt på eftermiddagen, var der allerede over hundrede mails i min indbakke, fra folk der mente at have fundet en meteorit. Min erfaring med den slags mails er, at der er meget langt mellem succeserne, så jeg havde ikke de store forhåbninger til at der ville være gevinst. Heldigvis tog jeg fuldstændig fejl! Den allerførste mail jeg læste, havde et par vedhæftede billeder af noget, der kun kunne være en meteorit (figur 1). En dame i Ejby havde set mig i nyhederne,

hvor jeg viste et eksempel på en meteorit frem, og var derefter gået ud for at ryge foran hoveddøren. Da hun åbnede døren, fik hun øje på en mærkelig sten på fliserne lige foran døren. Hun kikkede nærmere på den og kunne straks se, at den lignede de meteoritter, jeg havde vist frem i fjernsynet.

Som man kan se på billedet, manglede der et stykke af meteoritten og jeg tænkte derfor, at der måtte ligge nogle flere stumper på findestedet. Det var lige ved at blive mørkt, så jeg skyndte mig at overtale min 14-årige søn til at tage med. Jeg tænkte at han kunne kravle op på taget og lede rundt om huset, mens jeg talte med finderen og så på meteoritten. Heldet var hurtigt med os. Min søn fandt et cm-stort stykke nogle meter nede af havegangen og lidt efter fandt jeg et lidt mindre stykke.

Dagen efter dukkede der et meget større stykke op. Jeg blev ringet op af Rene Rasmussen, der undrede sig over at der lå en masse sten-fragmenter på fliserne ved hans firma. Han kunne også se, at der var knust nogle fliser i midten. Som de fleste andre danskere havde han hørt om meteoritfaldet og var ret sikker på, at det var et stykke af den, der var landet i hans gård. Det viste sig, at et stykke på ikke mindre end 6,5 kg havde ramt hans fliser, hvor det var blevet knust. Meteoritter bremses ned til det vi kalder terminalhastigheden – dvs. den hastighed hvor luftmodstand modsvares af tyngdekraft. Jo tungere meteoritten er, jo højere er terminalhastighe-

den. For en sten på 6,5 kg er terminalhastigheden knap 400 km/t, så det var noget af et held, at det bare var fliser, det gik ud over. Havde meteoritten ramt et hustag var den formentlig endt i kælderen.

I de følgende dage dukkede der yderligere ni stykker af meteoritten op. Fire af dem blev fundet i et kolonihaveområde i Ejby. De havde alle brudflader uden smelteskorpe, hvilket tyder på at de stammer fra et fragment, der delte sig ved lav hastighed lige over kolonihaveområdet. Et andet stykke blev fundet af en 6-årig pige på legepladsen ved en skole i Glostrup, og et stykke på 18 gram var ført af vinden helt til Vanløse.

Hvor kom Ejby-meteoritten fra?

Takket være Anton Norup Sørensen på Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet har vi også et dansk kameranetværk, der holder øje med nattehimlen. Der er opstillet otte kameraer i Jylland, et på Fyn og et på Sjælland, der automatisk optager en video af nattehimlen, hvis der registreres en ildkugle. Hvis en ildkugle opfanges på mere end ét kamera, beregnes der automatisk en bane og en hastighed for objektet. Oplysningerne bruger vi til at finde ud af, om dele af objektet har overlevet turen gennem atmosfæren, og hvor de i givet fald kunne tænkes at være landet som en meteorit. Systemet beregner også en bane omkring Solen for meteoriden, inden den ramte Jorden. Der er ikke kameranetværk ret mange steder i verden og det er derfor desværre sjældent at det, som i tilfældet med Ejby, lykkes at bestemme en bane omkring Solen. I de få tilfælde, hvor det er lykkedes, gør det selvsagt meteorittens informationer meget mere værdifulde, fordi man kan knytte dem til det område i Solsystemet, hvor meteoritten kom fra. Desværre var det overskyet over alle kameraer, da Ejby-meteoritten faldt, og kameranetværket var derfor ikke til nogen hjælp, da vi skulle finde meteoritten. Det gjorde selvfølgelig ikke så meget, da vi jo ret hurtigt fandt nedfaldsområdet. Mere ærgerligt var det, at vi heller ikke umiddelbart kunne se hvor i Solsystemet, Ejby-meteoriden kom fra. Det er heldigvis lykkedes os at bruge billederne fra Tyskland og videoen fra Ho til at beregne Ejby-meteoridens bane om Solen, inden den ramte os (figur 1, [2]). Som man kan se på figuren, kom meteoriden fra en eliptisk bane med det yderste vendepunkt i Asteroidebæltet og det inderste vendepunkt tæt på Jordens bane. Det passer fint med, at alle kendte meteoritter kommer fra vores eget Solsystem og mere specifikt med, at kondritter, som Ejby-meteoritten, menes at komme fra asteroider.

Meteoritter fra andre solsystemer?

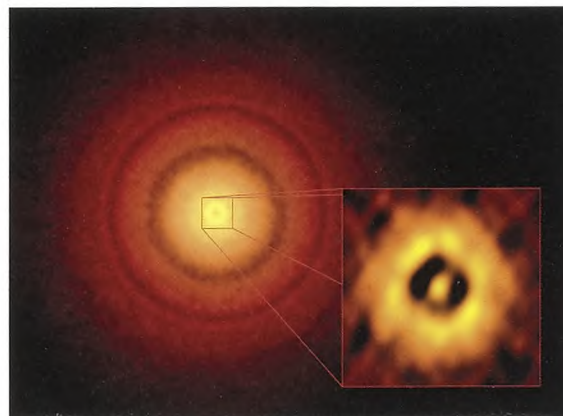
I princippet kunne man selvfølgelig også godt forestille sig, at vi blev ramt af et objekt, der ikke var i bundet kredsløb omkring Solen – men det har vi endnu aldrig set. Alle de objekter, der falder på Jorden, kommer fra vores eget Solsystem. Meteoritter fra andre Solsystemer ville være fantastisk spændende at studere, men man kan argumentere for at de er uhyre sjældne [3] – og vi har desværre til gode at finde en. Jeg er dog ikke i tvivl om, at vi meget hurtigt ville blive klar over det, hvis vi rent faktisk fandt en sådan interstellar meteorit.

Den ville sandsynligvis have en helt anden alder og isotopsammensætning end meteoritter fra Solsystemet, og det er også meget tænkeligt, at den ville indeholde partikler, der er dannet under andre omstændigheder end dem vi kender fra Solsystemet.

Ejby-meteoritten kommer med andre ord fra vores eget Solsystem. Den består af materiale, der kredsedde i en skive omkring den unge Sol. Jorden blev opbygget af den samme type materiale, så vi har at gøre med Jordens byggesten – faktisk også det samme materiale, som vi selv og alt andet liv på Jorden er lavet af. For at forstå hvordan urstoffet i Ejby-meteoritten blev til, skal vi lige spole tiden lidt tilbage – historien starter et sted i vores galakse, Mælkevejen, lige inden dannelsen af Solsystemet blev sat i gang.

Fra molekylskyer i Mælkevejen til dannelsen af nye Solsystemer

Vi har hverken adgang til observationer eller materiale fra den periode, der kom lige før Solsystemets dannelselse. Uden data, hvordan kan vi så sige noget som helst om, hvad der rent faktisk skete? Der er heldigvis flere ting, man kan gøre for at blive klogere på, hvad der skete dengang! Først og fremmest så kan vi se, at der hele tiden dannes nye Solsystemer i vores galakse. Større og større teleskoper på Jorden og i rummet tillader os at se processen i bedre og bedre opløsning. Det er derfor i princippet muligt at se en gentagelse af vores Solsystems dannelses ved at kikke ud i galaksen. Teknikken har desværre også nogle begrænsninger, fordi der er grænser for, hvor små detaljer man kan se i billederne.



Figur 2. Billede af en protoplanetar skive omkring stjernen TW Hydrae, der befinder sig 124 lysår fra Jorden. TW Hydrae er lidt mindre end Solen og "kun" otte millioner år gammel. De to mørke bånd i skiven kunne tyde på, at der er ved at blive dannet planeter. Det inderste bånd er tre milliarder km fra stjernen – svarende til Uranus' afstand fra Solen – og det yderste er seks milliarder km fra stjernen – omtrent lige så langt ude som Plutos afstand fra Solen. Forstørrelsen viser, at der også er et hul helt tæt på stjernen – svarende til Jordens afstand til Solen – hvor der muligvis er ved at blive dannet en planet i stil med Jorden. Billedet er taget med ALMA (Atacama Large Mm-Array).

Figur 2 viser det til dato skarpeste billede, der er taget af en såkaldt protoplanetar skive omkring den unge stjerne TW Hydrae. TW Hydrae er en af de bedste unge stjerner at observere, fordi den er ung, tæt på os og den er orienteret, så vi ser den næsten lige ovenfra. Trods de optimale betingelser kan verdens største

teleskop ALMA (Atacama Large Mm -Array) kun lige præcis opløse detaljer på størrelse med Jordens afstand fra Solen (figur 2). Da der ikke er bedre systemer at observere, og der ikke umiddelbart er planer om at bygge større teleskoper end ALMA, så kommer det nok til at tage lang tid, før vi ser skarpere billeder. Et andet problem med billederne er, at det i sagens natur kun er øjebliksbilleder. Der går flere millioner år fra en stjerne dannes, til der er dannet større planeter omkring den. Et så langt forløb kan vi naturligvis ikke følge, og vi må derfor tage andre teknikker i brug for at kunne følge hele udviklingen.

Det er primært tre ting, man kan gøre for at undersøge, hvordan de unge stjerner udvikler sig. For det første kan man observere nye solsystemer, der er ved at blive dannet i vores galakse. De unge stjerner dannes i gigantiske molekylskyer, hvor gas og støv fra mange tidligere generationer samler sig og bliver til nye solsystemer. Der er taget mange fantastiske billeder af molekylskyer (figur 3). Med bedre og bedre teleskoper, bliver det muligt at se stadigt finere detaljer.



Figur 3. Mælkevejens molekylskyer fylder mere end de fleste gør sig klart. På dette billede af den nordlige nattehimmel er området omkring Orions bælte gjort mere lysstærkt, så man kan se hele den enorme molekylsky, som Orion-tågen er en lille del af. Inde i den røde firkant ses de tre lysstærke stjerner i Orions bælte og Orion-tågen som det lidt diffuse lysende område nederst i den røde firkant. De farvede strukturer er gas og støv, der er udsendt fra mange tidligere generationer af stjerner. Orion-tågen er lysstærk, fordi der dannes en masse unge stjerner i den. (APOD/R.B. Andreo).

Når man sammenligner gamle og nye billeder af molekylskyer, ser det ikke ud til at de forandrer sig med tiden. Man kan derfor fristes til at tro, at de ikke har forandret sig siden tidernes morgen – men det er helt forkert – både computermodeller og astronomiske observationer fortæller en helt anden historie. Chok-

bølger fra supernova-eksplosioner pløjer gennem skyerne, mens bipolare jets, der udsendes fra unge stjerner nord- og sydpol, og stjernevinde fra kæmpestjerner sørger for at gassen er i evig bevægelse. Astronomerne kan måle gassens hastighed ved at måle dopplerforskydning af kendte absorptionslinjer i gassen. Målingerne viser, at hastigheder på flere hundrede km/s ikke er usædvanlige. Når molekylskyerne ikke ser ud til at ændre sig, så er det fordi de er ufatteligt store. Selv gas, der bevæger sig med flere hundrede km/s vil bruge flere millioner år på at komme fra den ene ende af skyen til den anden.

Skyerne er faktisk så dynamiske, at de typisk ender med at gå i opløsning, inden de bliver 100 millioner år gamle. Det betyder bl.a., at den sky Solsystemet blev dannet i, for længst er gået i opløsning – og de stjerner, der blev dannet i den sammen med Solen, er fordelt i store dele af Mælkevejen. Solen bruger ca. 250 millioner år på et omløb omkring Mælkevejens centrum. Efter 4500 millioner år har vi været 18 gange rundt, og det betyder, at de stjerner vi blev dannet sammen med formentlig er fordelt hele vejen rundt om Mælkevejens centrum. Det bliver desværre meget svært at lokalisere dem.

Et andet meget spændende nyt felt, der har lært os meget om hvordan planetsystemer udvikler sig, er forskningen i *exoplaneter*. For bare 25 år siden vidste vi ikke, om der fandtes planeter om andre stjerner, men nu er der fundet tusindvis af dem og mange af dem, optræder i de samme planetsystemer. Det betyder, at vi i dag ikke kun kan studere ét Solsystem – men masser af planetsystemer, der har vist sig at være overraskende forskelligartede. Det kan du læse meget mere om i artiklen om exoplaneter i dette nummer. Exoplanetforskningen har vist os, at andre planetsystemer typisk har meget lidt til fælles med vores eget. Faktisk har vi endnu ikke fundet et eneste planetsystem, der ligner Solsystemet.

Det tredje man gør, er i stil med det som meteorologerne gør, når de skal forudsige vejret de næste uger eller klimaet årtier frem i tid. Man kan lave en computermodel, der regner hele forløbet igennem. Astronomer kan lave model-beregninger af, hvad der foregår i de store molekylskyer, hvor man kan se der dannes stjerner i dag. For at kunne følge udviklingen, skal man lave en computermodel af et område, der har en meget stor fysisk udstrækning – og man skal følge det i rigtig lang tid. Det kræver, at man har adgang til en meget hurtig computer – i lang tid. Det er et forskningsfelt i rivende udvikling og vi ser til stadighed nye modelberegninger, der viser udviklingen i større og større detalje. Med stadigt hurtigere computere er der ingen tvivl om, at vi kommer til at se mange spændende nye resultater fra de astronomer, der regner på stjernedannelse.

Hvad er det så, vi helt konkret skal gøre, for at få en bedre forståelse af, hvordan solsystemer opstår? Målet er selvfølgelig at lave en realistisk model for stjerne- og planetdannelse, der passer med alle de oplysninger vi har. Den største udfordring lige nu er ikke, at vi mangler observationer, men derimod at konstruere computermodeller, der både passer med alle observationerne og håndterer den fysiske og kemiske udvikling korrekt.

Det er meget kompliceret at bygge alt fra kemiske reaktioner på støvkorn til supernovaeksplosioner ind i modeller, der dækker over enorme afstande og meget lange tidsrum. Hvis man laver modellerne for komplicerede, så vil selv de hurtigste computere skulle bruge flere hundrede år på at regne processen igennem, og det er naturligvis urealistisk. Kunsten er derfor at lave modeller, der er realistiske og alligevel tilstrækkeligt enkle til at de kan regnes igennem. Når modellen kører, så tester man om fx antallet og størrelsesfordelingen af de stjerner, der dannes i modellem, passer med det vi kan se i vores teleskoper. Hver gang man finder en uoverenstemmelse mellem modellen, og noget der kan observeres, så forbedrer man modellen, indtil vi til sidst forhåbentlig har noget, der kan genskabe alle de data vi har fra exoplaneter, meteoritter og astronomiske observationer.

Computermodellerne viser, hvordan de dynamiske forhold i molekylskyerne resulterer i, at gassen i nogle områder bliver så tæt, at den begynder at falde sammen i sit eget tyngdefelt. De tætte områder optræder ofte som trådlignende filamenter i skyen. Når gassen kolliderer vil den, ligesom en skøjteprinsesse, der trækker armene ind til kroppen, rotere hurtigere og hurtigere således at impulsmomentet bevares. Da gasskyen ender med at blive mange størrelsesordner mindre, ender den med at rotere hurtigt, og der dannes en skive omkring den voksende stjerne.

På billedet af TW Hydrae (figur 2) er det lykkedes at opløse detaljer i ringens struktur, der måske kan hjælpe os til at forstå, hvordan planeterne dannes fra skiven.

Vores eget Solsystems oprindelse

På samme måde som i skiven omkring TW Hydrae samledes materialet i skiven omkring vores unge Sol sig efterhånden og blev bl.a. til de planeter, vi kender i dag. I de indre varme dele af skiven var det kun støvkorn bestående af metaller og silikater, der samlede sig sammen og blev til de jordlignende (terrestriske) planeter. Længere ude i skiven var der koldt nok til, at de enorme mængder af vanddamp, der var i skiven, kunne kondensere til is. De store mængder af is i de ydre dele af Solsystemet betød, at de fire ydre planeter voksede meget hurtigere – og blev meget større. De voksede så hurtigt, at de opnåede en masse på 10-15 gange Jordens masse, mens der stadig var enorme mængder af brint og helium i skiven omkring Solen. Det betød, at deres tyngdefelt var tilstrækkeligt kraftigt til at de kunne støvsuge skiven for gas og de endte derfor med at blive langt større end de indre planeter. Omvendt havde de indre planeter ikke adgang til iskorn, og deres tyngdefelt var ikke tilstrækkeligt kraftigt til at tiltrække vanddamp. Det er derfor i dag noget af et mysterium, hvorfor vi i det hele taget har vand på Jorden.

En populær teori [4, 5] foreslår, at en resonans mellem Jupiter og Saturn udløste en instabilitet i Solsystemet for 4 milliarder år siden. Instabiliteten fik Neptun og Uranus til at bytte plads og slyngede dem væk fra Solen, til de baner de har i dag. De havnede i et område med masser af islegemer, der blev sendt i alle retninger, da de store iskæmper ankom. Det gav et massivt bombardement af det indre Solsystem

med islegemer og kan derfor potentielt forklare vandet på Jorden og også, hvorfor Månen blev bombarderet for knap 4 milliarder år siden. Endelig kan teorien forklare, hvorfor den yderste planet er tungere end den næstyderste – og hvorfor Neptun og Uranus befinder sig i baner hvor der var for lidt materiale, til at de kunne være dannet.

De indre terrestriske planeter har gennemgået en voldsom geologisk udvikling siden de blev skabt, og vi kan derfor hverken finde spor af det oprindelige materiale på vores egen planet – eller nogen af de andre planeter. Heldigvis blev ikke alt materialet brugt til at bygge planeter af. Noget af det endte i smålegemer, der ikke havde nogen nævneværdig geologisk udvikling. Mange af asteroiderne, der kredser i baner mellem Mars og Jupiter, er eksempler på sådanne primitive objekter, der aldrig har været varme nok til at opsmelte deres bestanddele. Asteroiderne indeholder derfor velbevaret materiale, der er dannet i Solsystemets tidligste faser – længe inden Jorden var færdigdannet. Det tog ca. 35 millioner år at samle tilstrækkeligt meget materiale sammen fra skiven til at opbygge Jorden, til den størrelse den har i dag. Når stumper af asteroiderne lander på Jorden, i form af meteoritter, får vi derfor en enestående chance for at studere Solsystemets ældste materiale i vores laboratorier her på Jorden. Meget af det vi ved om Solsystemets oprindelse, er derfor baseret på undersøgelser af meteoritter. I de ydre dele af Asteroidebæltet indeholder asteroiderne også is, og det kan derfor tænkes, at det har været isholdige asteroider eller kometer, der har bragt vand til Jorden. Den meteorit, der faldt nær Maribo i 2009, kom formentlig fra en af de isholdige asteroider i den ydre del af Asteroidebæltet [6].

Ordforklaringer:

Asteroide: Kilometerstort legeme, primært bestående af klippe eller metal, der kredser om Solen. De fleste asteroider har baner mellem Mars og Jupiter.

Komet: Islegeme i en bane om Solen, der bringer den tilstrækkelig tæt på Solen til at den begynder at fordampe og udvikler en hale.

Kondrit: Primitiv meteorittype, der består af materiale fra Solsystemets oprindelse, der aldrig har været smeltet op. Kondritter indeholder kondruler, små smeltedråber, dannet i skiven omkring den unge sol.

Meteoride: Det samme som en asteroide, men for lille til at kunne ses astronomisk.

Meteorit: Meteoride, der har overlevet turen ned gennem atmosfæren og er landet intakt på Jorden.

Meteoritter

Meteoritter er små stumper klippe, der er slået løs som følge af meteornedslag på nogle af Solsystemets andre faste legemer. Meteoritter indeholder det eneste tilgængelige materiale fra Solsystemets oprindelse. De ældste jordiske sten er "kun" omkring 4000 millioner år gamle og vi kan derfor ikke bruge jordiske bjergarter til at få indsigt i Solsystemets tidligste udvikling og de stjerner, der leverede materiale til Solsystemet. Der er formentlig også bevaret materiale fra Solsystemets

oprindelse i kometer, men da kometer primært består af is kan fragmenter af dem ikke overleve turen til Jordens overflade. I 2004 indsamlede NASAs Stardust mission partikler fra halen af kometen Wild 2 og analyserne af materialet tyder på, at kometer også indeholder primitive materialer i stil med dem der findes i kondritter. I kometerne er partiklerne formentlig endnu mere velbevarede, da de ikke har været opvarmet lige så meget, som de har i asteroiderne.

Asteroiderne er meget forskelligartede, afhængigt af hvor tæt på Solen de er dannet og hvor tidligt de blev dannet. Nogle af dem har været totalt opsmeltede, andre har næppe nogensinde været varmet op til mere end 0 °C. Nogle er dannet i tørre, iltfattige omgivelser, mens andre har indeholdt store mængder is og vand. Heldigvis ser det ud til, at meteoritterne har forsynet os med et bredt udsnit af prøver fra alle forskellige typer asteroider.

De første asteroider, der blev dannet, havde højt indhold af den kortlivede radioaktive isotop ^{26}Al . Henfaldet af ^{26}Al frigjorde varme i så store mængder, at disse tidlige asteroider smeltede op. Halveringstiden for ^{26}Al er "kun" 720.000 år og der er derfor intet tilbage af den i dag – over 6000 halveringstider senere. Omvendt kan man konkludere, at den ^{26}Al , der fandtes i det tidlige solsystem må være dannet umiddelbart før Solsystemet blev til. Selvom det oprindelige ^{26}Al er væk, kan man påvise, at der var ^{26}Al tilstede da Solsystemet blev dannet, fordi de aluminiumsrige mineraler i kondritterne

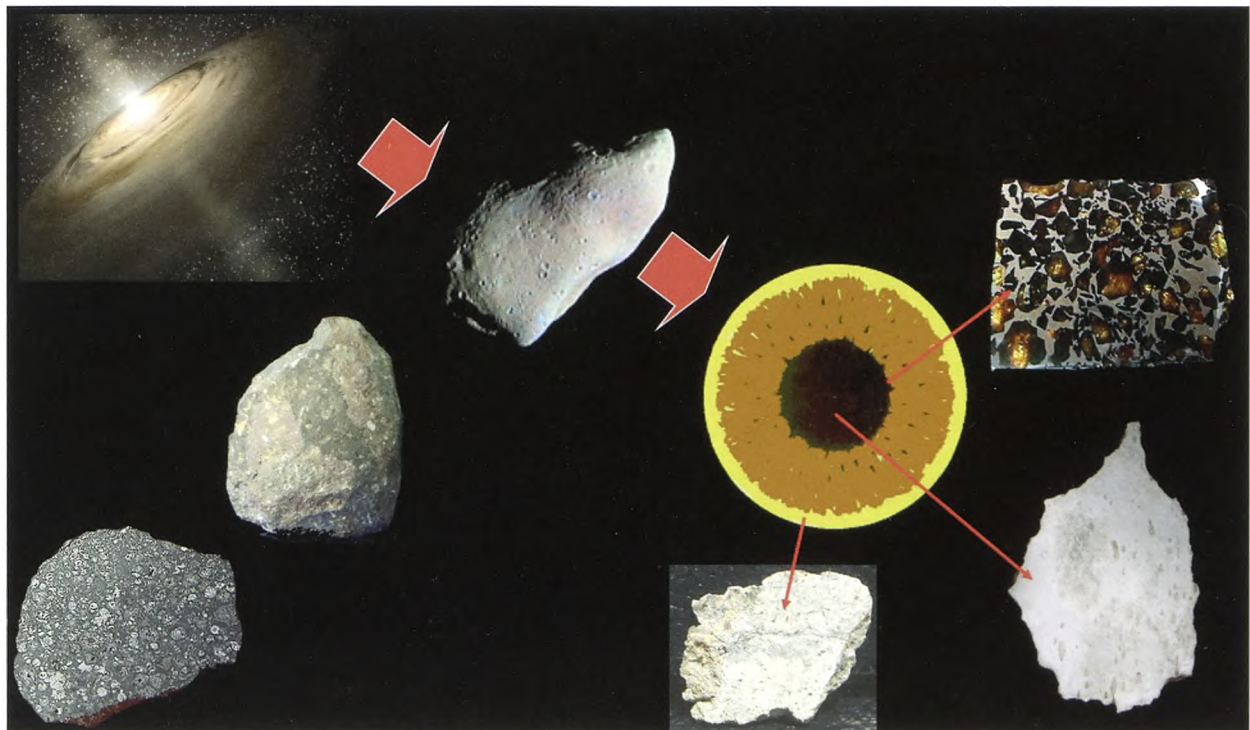
indeholder ekstra meget af henfaldsproduktet, ^{26}Mg . ^{26}Al er interessant af flere årsager:

1) Den eneste realistiske kilde til ^{26}Al er supernova-eksplosioner. Solsystemet må derfor være dannet fra materiale, der indeholdt frisk materiale fra en supernova-eksplosion.

2) Henfald af ^{26}Al frigør store mængder varme. Det menes, at ^{26}Al var ansvarligt for opsmeltningen af de tidligst dannede asteroider (mens der stadig var ^{26}Al tilstede). Opsmeltningen førte til at asteroidens metaller samlede sig i centrum og dannede en jernkerne. Det er derfor pga. ^{26}Al , at vi har jernmeteoritter fra jernkernerne af de asteroider, der har været opsmeltede.

3) Henfaldet af ^{26}Al kan potentielt set udnyttes som et kronometer med meget høj tidsopløsning (på grund af det hurtige henfald).

De asteroider, der blev dannet mere end ca. én million år efter Solen, nåede aldrig op på smeltepunktet fordi meget af det oprindelige ^{26}Al var henfaldet på det tidspunkt. Selvom disse primitive asteroider er yngre indeholder de alligevel Solsystemets ældste partikler fordi de har undgået opsmeltning i asteroiden. Hver partikel kan fortælle noget om de fysiske forhold på det sted, hvor den blev dannet. Ved at datere partiklerne kan man derfor i princippet sammenstykke Solsystemets udvikling i den periode, hvor skiven eksisterede – formentlig de første få millioner år. Det er selvsagt en uhyre interessant periode, der begyndte med Solens dannelse og afsluttedes med planeternes dannelse.



Figur 4. For 4567 millioner år siden var der ingen planeter i kredsløb omkring Solen. I stedet var den omgivet af en roterende skive af gas og støv, som den der ses øverst til venstre i figuren. Noget af materialet i skiven endte i de smålegemer vi kalder asteroider – som den i midten af figuren. Primitive asteroider blev aldrig så varme, at byggematerialet smeltede, og partikler, dannet i den oprindelige skive, er derfor bevaret i dem. Asteroidebæltet er fyldt med små klippestykker, der til stadighed rammer asteroidernes overflader og slår små stykker løs. Nogle af dem rammer senere Jorden som meteoritter, og giver os mulighed for at studere de partikler, de har gemt på siden Solsystemets oprindelse. Det var ikke alle asteroider, der forblev kolde. De asteroider, der dannedes inden Solsystemet var én million år gammelt indeholdt tilstrækkeligt meget af den radioaktive isotop ^{26}Al til at de smeltede efterhånden som ^{26}Al henfaldt og frigav varme. I de opsmeltede asteroider samledes de tunge metaller i centrum af asteroiden. Dele af silikatkappen smeltede også og dannede en vulkansk skorpe. Det er fra disse opsmeltede asteroider, vi får jernmeteoritter (fra kernen), pallasitter (blandinger af kerne- og kappemateriale) og akondritter (stenmeteoritter, der primært kommer fra skorpe og øvre kappe i opsmeltede asteroider). (Grafik af billeder fra NASA og egne fotos: Henning Haack).

De fleste primitive meteoritter (figur 4) indeholder to typer større partikler, der blev dannet frit svævende om Solen inden de havnede i meteoritterne: CAI'er og kondruler. Hver af disse partikler kan bruges til at rekonstruere de fysiske og kemiske forhold på det tidspunkt de blev dannet.

Asteroider – en knust planet?

Tidligere troede man, at asteroider var stumper af en sprængt planet. Den teori er helt droppet af flere årsager. Asteroiderne er dels meget forskelligartede – dvs. de kan ikke komme fra det samme legeme. Der er ingen af dem der indeholder højtryksmineraller, som man ville forvente, hvis nogen af dem kom fra det indre af en planet. De fleste af dem har aldrig været opsmeltede – som store planeter automatisk bliver, når de dannes. Endelig er den totale masse i Asteroidebæltet ikke mere end 1/1000 af Jordens masse.

Calcium-Aluminium-rige Inklusioner (CAI'er)

De ældste daterbare partikler vi kender til er CAI'er. Meteoritterne indeholder ganske vist interstellare partikler, der i sagens natur må være ældre end Solsystemet, men disse partikler indeholder ingen radioaktive isotoper og kan derfor ikke dateres. CAI'erne er i sjældne tilfælde helt op til cm-store og, da de er meget lyse, nemme at få øje på, hvis man skærer en meteorit igennem. Mange af dem har meget irregulære faconer og er tydeligvis kondenseret direkte fra en gas, inden de endte i den asteroide, meteoritten kom fra. Hvis man tager en gas med samme sammensætning som Solen og køler den af, vil de første kondensater, der dannes, netop være rige på Ca og Al. CAI'er indeholder ofte flere koncentriske lag, hvor de inderste er kondenseret ved højere temperatur end de yderste.



Figur 5. Skive af en kulkondrit fundet i Sahara. Den røde linje måler 1 cm. Meteoritten har ligget i ørkenen i mange år, men der kan stadig ses en smule smelteskorpe på den øvre kant. På skiven kan man tydeligvis se en masse kondruler (de runde objekter) og CAI'er (lyse objekter med irregulære omrids). Foto: Barbra Barrett, Maine Mineral and Gem Museum.

CAI'erne indeholder små mængder uran, og kan derfor dateres ved hjælp af uran-bly dateringsmetoden. Når man gør det, viser det sig at CAI'ernes mineraler er kondenseret ud af gassen for $4567,30 \pm 0,16$ millioner år siden [7]. Det tyder på, at de alle er dannet i den samme kortvarige fase af Solsystemets udvikling – formentlig det oprindelige kollaps af den del af gassen i en molekylsky, der førte til Solens dannelse.

Da CAI'er blev dannet på et meget tidligt tidspunkt og fordi de også er Al-rige, indeholder de høje niveauer af ^{26}Al . Det var da også netop ved at analysere CAI'er, at man opdagede, at der havde været ^{26}Al i det tidlige Solsystem. Tilstedeværelsen af ^{26}Al afslørede ved at der findes høje mængder af henfaldsproduktet ^{26}Mg i de Al-rige mineraler. Indholdet af ^{26}Al var præcist det samme i alle CAI'er, hvilket tyder på, at de blev dannet i en enkelt kortvarig begivenhed. Vi kan se, at de er dannet indenfor en periode på maksimalt 20.000 år, men varigheden kan sagtens have været meget kortere.

Kondruler

Kondruler er mm-store, helt runde partikler, der udgør hovedbestanddelen af de mest almindelige typer meteoritter, kondritterne. Det er faktisk kondrulerne, der har givet navn til kondritterne. Kondritter er netop meteoritter, der indeholder kondruler. Både den nye Ejby-meteorit (figur 1) og Maribo-meteoritten, der faldt i 2009, er fulde af kondruler.

I modsætning til CAI'er, der er dannet som kondensater fra en varm gas, er kondruler små smeltdråber, der er dannet ved opsmeltning af tidligere dannet materiale på støv-form.

Kondrulerne menes at være dannet lidt længere fra Solen end CAI'erne. De ældste kondruler er lige så gamle som CAI'erne, men i modsætning til den meget kortvarige dannelse af CAI'er fortsatte kondrulerdannelsesprocessen i ca. 3 millioner år. Kondrulerne er helt runde fordi de størknede som frit svævende smeltdråber. Det har man faktisk vidst lige siden 1877, hvor den engelske geolog Henry Sorby beskrev kondrulerne som "drops of fiery rain". Der har derfor været masser af tid til at spekulere over hvordan de blev til. Desværre er kondrulerne stadig ret gådefulde. Selvom de udgør hovedbestanddelen af kondritterne er der stadig mange ting man ikke forstår. Først og fremmest ved man ikke, hvad det var der fik dem til at smelte op. Deres struktur og kemi tyder på, at de blev opvarmet lynhurtigt og afkøledes i løbet af nogle få timer. Mange af dem har fået påklisset et lag støv på overfladen og har så igen været igennem en kraftig opvarmning, hvor det nye støvlag er smeltet delvist op. Kondrulerne har med andre ord typisk været opsmeltede mange gange. Vi ved desværre ikke hvorfor de smeltede op, men vi må konstatere, at det var nogle usædvanligt energirige processer, der var aktive i skiven omkring Solen kort efter dannelsen.

Meteoritternes historie

Hvad er det så for en historie CAI'er og kondruler kan fortælle om det tidlige solsystem? Hver eneste partikel kan fortælle noget om de fysiske og kemiske forhold på det sted og det tidspunkt hvor den blev dannet.

De største af partiklerne indeholder tilstrækkelig meget uran til, at det kan lade sig gøre at datere dem. Når vi kender alderen på de enkelte partikler, kan vi placere dem i kronologisk rækkefølge og dermed kan vi dække hele tidsintervallet fra Solsystemet blev til og indtil de første km-store planet-kim var opstået.

Partiklerne er ikke bare dannet over et tidsrum på flere millioner år – de er også dannet under meget forskelligartede kemiske og fysiske betingelser. Nogle er dannet under ekstremt iltfattige forhold og nogle er dannet i isrige omgivelser. Når man ser på partiklernes indhold af de tre stabile iltisotoper (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O), kan man også se meget store variationer, som tyder på at de er dannet i forskellige afgrænsede områder med begrænset udveksling med omgivelserne.

Et grundlæggende og uløst problem er imidlertid, at vi ikke ved, hvor i Solsystemet de enkelte partikler er dannet. For at gøre problemet yderligere kompliceret, så er det tydeligt, at partiklerne er transporteret rundt i Solsystemet mellem det tidspunkt hvor de blev dannet og det tidspunkt hvor de landede på en asteroide. Fx er der meget der tyder på, at CAI'erne er dannet meget tæt på Solen. Alligevel ser man dem primært i de primitive typer af kulkondritter, der menes at komme fra de ydre dele af Asteroidebæltet – på den anden side af den snelinje, der blev omtalt ovenfor. Primitive kulkondritter som fx den meteorit, der faldt ved Maribo i 2009, indeholder derfor en mængde CAI'er men også en masse flygtige (letfordampelige) organiske forbindelser, der er kondenseret som is i det ydre asteroidebælte. De organiske forbindelser, som fx aminosyrer, findes i noget meget finkornet mørkt materiale, som CAI'er og kondruler er pakket ind i (figur 5).

Umiddelbart virker det derfor, som om vi har alle brikkerne i puslespillet, der skal fortælle os hvordan Solsystemet udviklede sig, lige da det var blevet til. Udfordringen lige nu og formentlig i mange år fremover er at få brikkerne placeret det rigtige sted i puslespillet. Vejen frem er ikke kun at skaffe flere data – men i høj grad også at kombinere oplysninger fra exoplaneter, computermodeller, meteoritter og udforskningen af planeter og asteroider til at få stykket en historie sammen, der kan forklare de mange data vi allerede har.

Kan du være med?

Hver gang vi lærer noget nyt om Solsystemet åbner der sig nye muligheder og der rejser nye spørgsmål. Udforskningen af Solsystemet og jagten på livets oprindelse her og andre steder i galaksen er kun lige begyndt. Bedre analytiske teknikker, større teleskoper og hurtigere computere vil levere enorme mængder af data, som de næste generationer af forskere kan bruge til at få en langt bedre forståelse af, hvorfor vi er her. Et af de helt store gennembrud, der formentlig kommer indenfor relativt få år, er opdagelsen af en exoplanet med liv. En sådan opdagelse forudsætter naturligvis, at planeter med liv er almindelige – men hvis det er tilfældet, vil det snart være muligt at påvise det. Forbedrede computermodeller, der kan komme med bud på dannelsen af kondruler og CAI'er kombineret med påvisning af disse partikler i unge solsystemer er også inden for rækkevidde – og vil give os en langt bedre forståelse

af vores eget Solsystems oprindelse. Udforskningen af Mars vil også føre til nye epokegørende opdagelser, og hvis der stadig er primitivt liv på Mars, vil vi formentlig opdage det indenfor en overskuelig fremtid. Alene det, at vi snart kan se frem til at modtage omhyggeligt udvalgte prøver fra overfladen af Mars, betyder, at vi kan se frem til mange spændende opdagelser på vores naboplanet.

Selv om du måske ikke har planer om en karriere inden for naturvidenskaben så er der stadig mulighed for at være en del af det. Hvis du holder øjne og ører åbne, når du færdes i naturen, så er det måske dig, der finder den næste danske meteorit, eller dig, der indrappporterer en ildkugleobservation til www.ildkugle.dk. Skulle du have lyst til at bidrage til det danske kameranetværk, så kan dit kamera måske levere lige den observation, der gør, at vi finder en friskfalden meteorit – og bestemmer dens bane.

Hvis du også er fascineret af Solsystemet og jagten på svarene på de helt store spørgsmål, så er der også mulighed for at skabe sig en karriere indenfor en lang række naturvidenskabelige discipliner. Der er ingen lette svar – men masser af data at arbejde med og et internationalt netværk af forskere i alle aldre, der også brænder efter at forstå hvordan Solsystemet blev til, og hvorfor vi er her i dag.

Hvis du vil vide mere om emnet kan du også læse en bog [8], jeg har skrevet på dansk om meteoritter og den historie, de kan fortælle.

Litteratur

- [1] Information om meteoritfaldet den 6. februar 2016, <http://www.stjernes kud.info/fireball/fb20160206/>
- [2] Spurny P., Borovička J., Baumgarten G., Haack H., Heinlein D. and Sørensen A.N. (2017), Atmospheric trajectory and heliocentric orbit of the Ejby meteorite fall in Denmark on February 6, 2016. *Planetary and Space Science*, in press.
- [3] Melosh H.J. (1988), The rocky road to panspermia. *Nature* **332**, 687-688.
- [4] Gomes R., Levison H.F. Tsiganis K., Morbidelli A. (2005), Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature* **435**, 466-469.
- [5] Animation af Gomes et al., https://www.youtube.com/watch?v=6LzQfR-T5_A
- [6] Haack H. et al (2012), Maribo – a new CM fall from Denmark. *Meteoritics and Planetary Science* **47**, 30-50.
- [7] Connelly et al. (2012), The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk, *Science* **338**, 651-655.
- [8] Haack H. (2012), Meteoritter – tidskapsler fra Solsystemets oprindelse. Gyldendal.



Henning Haack er geofysiker med speciale i meteoritter og Solsystemets oprindelse. Han var i 18 år ansvarlig for den danske meteoritsamling på Geologisk Museum og er nu projektleder ved *Science Talenter* i Sorø og associeret forsker ved *Maine Mineral and Gem Museum*. Han underviser og forsker i meteoritter, Solsystemets oprindelse og meteornedslag.