

KVANT

April
2017

1

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 28. årgang

TEMANUMMER:

METEORITTER OG SOLSYSTEMETS OPRINDELSE

- HISTORIEN OM HVORDAN ALTING BLEV TIL:
METEORITTER OG SOLSYSTEMETS OPRINDELSE
- SAMPLE RETURN – AT HENTE EN STEN PÅ MARS
- BIOLOGI PÅ MARS
- EXOPLANETER – DET NÆSTE SKRIDT:
HVORDAN SER ATMOSFÆREN UD?
- REGNEOPGAVER OM METEORITTER OG SOLSYSTEMET

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk
Facebook  : KVANT.fysiktidsskrift
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab,
Dansk Fysisk Selskab,
Dansk Geofysisk Forening,
Selskabet for Naturlærers Udbredelse,

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),
Christianshavns Gymnasium
Henning Haack (gæsterektor)
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Dorte Olesen (SNU),
DTU Compute
Christine Pepke Pedersen,
DTU Fotonik
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Julie Søgaard (AS)
Torben Westerberg (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Henvendelser vedr. abonnement til Christine Pepke Pedersen: christine@kvant.dk
(tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2300 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk
(tlf. 22 67 26 42).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 8000.

Produktionsplan

Nr. 2-17 udkommer ca. 15. maj
Nr. 3-17 udkommer ca. 15. september
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Hvorfor er det vigtigt at studere Solsystemets oprindelse?	
<i>Henning Haack</i>	3
Historien om hvordan alting blev til: Meteoritter og Solsystemets oprindelse	
<i>Henning Haack</i>	4
Sample return – at hente en sten på Mars	
<i>Kjartan Kinch</i>	12
Biologi til Mars	
<i>Christina Toldbo</i>	16
Foreningsnyt – foredrag i foråret 2017	20
KVANT-nyheder	
<i>Christine Pepke Pedersen</i>	22
Exoplaneter – det næste skridt: Hvordan ser atmosfæren ud?	
<i>Uffe Gråe Jørgensen, Lars A. Buchhave og Tais W. Dahl</i>	23
Regneopgaver om Meteoritter og Solsystemet	
<i>Henning Haack, Michael Cramer Andersen og Svend E. Rugh</i>	29
Aktuelle bøger	
<i>Christine Pepke Pedersen og Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	35
Temanummer om Solsystemets oprindelse	
<i>Dorte Olesen</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser stjernebilledet Orion i en langtidseksposering, hvor gas- og støvskyer træder frem. Under de tre stjerner i Orions bælte ses bl.a. *Orion-tågen*, hvor nye stjerner – med planetsystemer – er under dannelse. (Wikimedia).

I dette nummer kan du bl.a. læse om det seneste danske meteoritfald, og hvad meteoritter kan fortælle om Solsystemets oprindelse. Du kan også læse om den kommende mission til Mars, der skal samle prøver op, så de kan hentes til Jorden for nærmere undersøgelser og om et projekt, hvor studerende udviklede mos, som bedre vil kunne overleve på Mars. Til sidst er der en artikel om, hvad man kan lære ved at studere atmosfæren af exoplaneter bl.a. ved hjælp af de kæmpe teleskoper, som er under konstruktion i disse år.

Temanummeret har desuden en række regneopgaver om emnet, som kan anvendes i fysikundervisningen i gymnasiet.

Dette temanummer er trykt i et større oplag og udsendt til gymnasielærere i naturfagene med støtte fra Lundbeck Fonden.

KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle alle gymnasier, seminarier og HTX-kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).



Hvorfor er det vigtigt at studere Solsystemets oprindelse?

Af Henning Haack

Solsystemets oprindelse

Til dagligt er det de færreste, der tænker over, at vi befinder os på den tredje planet fra en tilsyneladende helt normal stjerne. Hele vores forhistorie har udspillet sig på denne lille planet og det er de færreste af os, der nogen sinde kommer til at forlade den. I sammenligning med Jorden er vores Solsystem enormt – det tager lyset over 5 timer at komme fra Solen og ud til den yderste planet og formentlig flere år før lyset passerer det sidste islegeme i Solsystemets yderste bastion. Trods Solsystemets enorme udstrækning er det alligevel kun en lille ø blandt milliarder af andre i vores galakse.

Selvom der er mange andre overordentlig vigtige problemer at tage fat på her på vores egen klode så har mennesket nu opbygget en viden og nogle kompetencer, der gør at vi for alvor kan begynde at sætte vores planet ind i et større perspektiv og svare på vores civilisations allerstørste spørgsmål: Hvorfor er vi her? Svaret ligger ikke lige for, men vi er i de sidste par årtier kommet det meget nærmere ved at angribe det fra mange forskellige sider. Med den viden vi har nu, og de projekter der sættes i søen i øjeblikket, så vil vi formentlig finde tegn på liv andre steder i galaksen indenfor de næste årtier – forudsat at der er noget liv at finde. Vores viden om Solsystemets oprindelse og udvikling er i rivende udvikling i disse år. Det skyldes dels store tekniske landvindinger indenfor mange af de discipliner, der bruges til at udforske det – men også at vi er blevet langt bedre til at kombinere viden fra de forskellige discipliner.

I dette temanummer af Kvant vil vi fremhæve tre spændende områder, der angriber det store spørgsmål på vidt forskellige måder.

Meteoritter og det tidlige Solsystem

Den 6. februar 2016 oplystes himlen over det østlige Sjælland af en kæmpe ildkugle. Tusindvis af mennesker, inklusive mig selv, observerede fænomenet, der resulterede i Danmarkshistoriens største bevarede meteoritfald. Meteoritter, som den der faldt i 2016, består af materiale, der daterer sig helt tilbage til den periode i Solsystemets udvikling, hvor der endnu ikke var dannet planeter. Den nye meteorit indeholder materiale, der er mange millioner år ældre end Jorden.

Ved at kombinere data fra meteoritter med astronomiske observationer af stjerne- og planetdannelse og numeriske modeller er det lykkedes at rekonstruere Solsystemets tidligste udvikling fra Solens dannelse til opbygningen af planeterne.

I den første artikel vil jeg fortælle om hvad vi har lært af de seneste danske meteoritfald og hvad vi i dag kan sige om hvordan vores Solsystem opstod.

Mars

Udover Jorden er Mars den anden planet indenfor den "beboelige zone". De hidtidige resultater tyder på, at der har kunnet eksistere liv på Mars – og måske stadig

gør det. Mars-gruppen på Niels Bohr Institutet er dybt involveret i flere af NASAs nuværende og kommende missioner til Mars, hvor det helt overordnede formål er at få afklaret, om der findes liv på vores naboplanet. *Kjartan Kinch* fra Mars-gruppen fortæller om den næste store mission, der skal forsøge at indsamle prøver med mulige spor efter liv – og for første gang sende dem tilbage til analyse på Jorden.

I den sidste artikel vil *Christina Toldbo* fortælle om et spændende studenterprojekt, der går ud på at designe og teste en form for mos, der vil kunne overleve under de barske forhold, der findes på Mars i dag. På grund af den store afstand til Mars vil det være nødvendigt at astronauterne, så vidt muligt, kan være selvforsynende under en del af opholdet på Mars med bl.a. robuste spiselige planter. Resultaterne af Christinas projekt er meget opmuntrende og vil måske kunne bruges til at bane vej for bemandede missioner til Mars.

Exoplaneter

Exoplaneter er planeter, der kredser om en anden stjerne end vores egen Sol. Selvom vi i flere hundrede år har gættet på at der nok også fandtes planeter om andre stjerner er det ikke længere siden end 1991 at det for første gang lykkedes at opdage en exoplanet. Siden da er exoplaneter blevet opdaget med mange forskellige teknikker og vi kender i dag flere tusinde af dem. Vi kan både sammenligne de nyopdagede exoplaneter med vores egne planeter og vi kan også begynde at sammenligne vores Solsystems arkitektur med de tilsvarende i andre solsystemer. Opdagelsen af de mange exoplaneter har åbnet for et vindue til en langt dybere forståelse af planetsystemers oprindelse og udvikling. Interessant nok så har det ført til at vi på flere måder har måtte ændre vores teorier for vores eget solsystem. Det har vist sig at ingen af de nyfundne solsystemer er magen til vores eget – og mange af dem indeholder planeter, som enten ikke ligner vores Solsystems planeter, eller optræder i en helt anden afstand fra stjernen.

Udover den banebrydende opdagelse af exoplaneter rent faktisk findes, så ved vi nu at der er langt flere planeter end stjerner – og rigtig mange af dem har egenskaber, der gør det muligt at der kunne være liv på dem.

I artiklen om exoplaneter fortæller *Uffe Gråe Jørgensen*, *Lars Buchhave* og *Tais W. Dahl* om hvad vi har lært af de nye opdagelser og hvad man gør for at besvare det helt store spørgsmål – er der liv på nogle af de nyopdagede planeter?

Foredrag og opgaver til brug i undervisningen

Udover artiklerne er der også en række opgaver målrettet gymnasiets fysikundervisning. Håbet er, at eleverne ved at arbejde mere i dybden med udvalgte emner får lyst til at vide mere. Gymnasier kan desuden bestille et foredrag om emnet (se mere på bagsiden).

God læselyst!

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

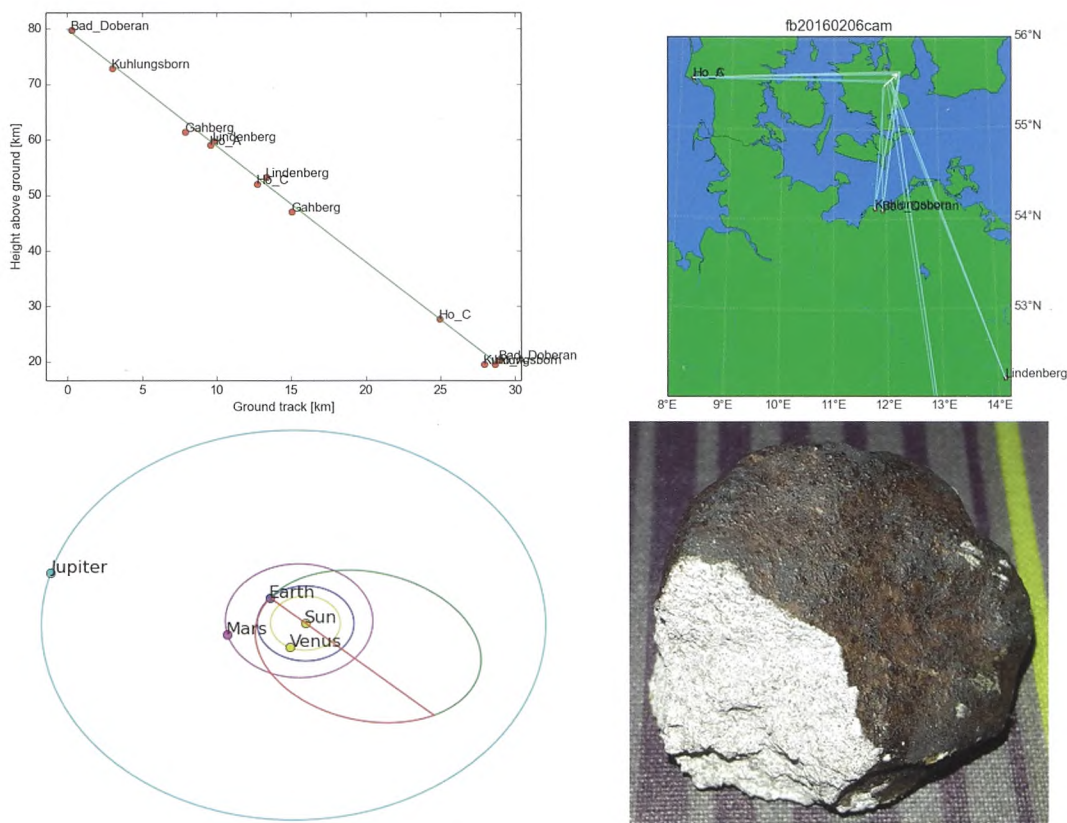
til alle de andre naturligt forekommende grundstoffer i det periodiske system. Alle de grundstoffer, der skulle til at danne Jorden, livet og ikke mindst os selv, var dermed tilstede og scenen sat til at lave et Solsystem, med en planet hvorpå livet kunne udvikle sig.

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 nattehimmelen. Der er opstillet otte kameraer i Jylland, et på Fyn og et på Sjælland, der automatisk optager en video af nattehimmelen, 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?

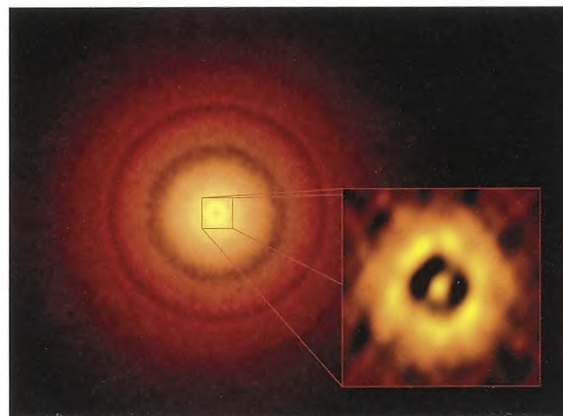
I princippet kunne man selvfølgelig også godt forestille sig, at vi blev ramt af et objekt, der ikke var i bundet kredsløb omkring Solen – men det har vi endnu aldrig set. Alle de objekter, der falder på Jorden, kommer fra vores eget Solsystem. Meteoritter fra andre Solsystemer ville være fantastisk 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:

Asteroid: 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

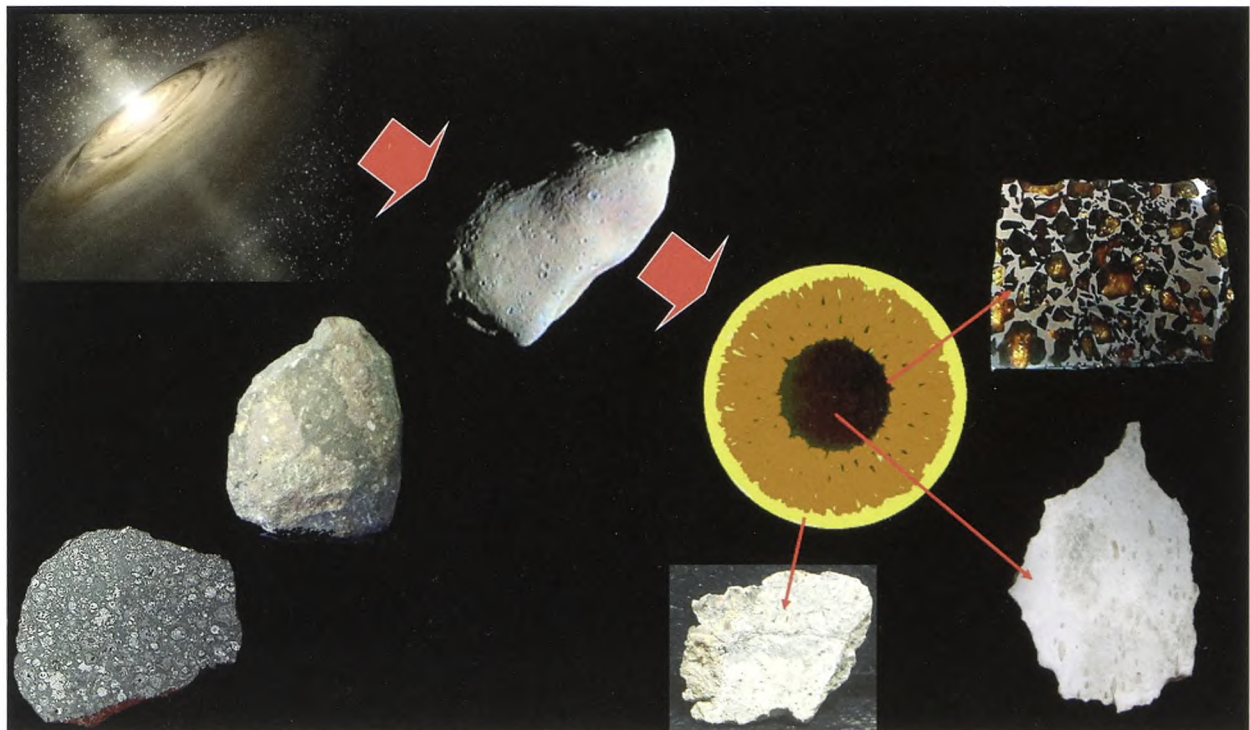
indeholder ekstra meget af henfaldsproduktet, ^{26}Mg . ^{26}Al er interessant af flere årsager:

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.

Sample Return – at hente en sten på Mars

Af Kjartan Kinch, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Lige siden de første rumsonder landede på Mars i 1970'erne har planetforskere drømt om en såkaldt *Sample Return*-mission. Det vil sige en mission, som skal hente prøver af planetens sten, jord og atmosfære og flyve dem tilbage til Jorden. Med NASAs næste store rover-mission til Mars, som bliver sendt afsted i 2020, vil man tage det første konkrete skridt mod opfyldelsen af denne drøm.

Den fremadskridende udforskning af Solsystemet

Siden de allerførste interplanetariske rumsonder har studiet af Solsystemet fulgt et næsten fast mønster for hver ny planet. Der er ikke tale om en bevidst strategi men i højere grad om et logisk mønster dikteret af de tekniske udfordringer og videnskabelige landvindinger. Denne skabelon for udforskningen af en ny planet kan stilles op sådan her:

flyby → *orbiter* → *lander* → *rover* → *sample return*

For hvert skridt op ad "stigen" er den tekniske udfordring større men den videnskabelige gevinst også tilsvarende større.

Et *flyby* eller en forbiflyvning er en rumsonde som sendes tæt forbi en planet og mens den passerer samler al den information den kan. Trods den begrænsede tid til rådighed har den første forbiflyvning af en ny planet typisk dramatisk ændret opfattelsen af planeten i forhold til hvad man har kunnet lære fra teleskoper på Jorden. Voyager-sonderne var vel den allermest imponerende serie af forbiflyvninger, hvor Voyager 2 passerede både Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun på sin vej ud af Solsystemet. Med sonden New Horizons som passerede Pluto i sommeren 2015, kan man sige, at den første rekognoscering af Solsystemet med forbiflyvninger er komplet. Vi har forbifløjet alle planeter (og dermed deres måner) samt naturligvis Pluto og lidt mere end et par håndfulde asteroider og kometer inklusiv ikke mindre end fem forbiflyvninger af Halley's komet ved dens sidste passage i 1986. Der er dog stadig utallige mindre legemer, som ikke har været besøgt og der er da også en række nye flyby-missioner på tegnebrættet.

En *orbiter* eller en satellit eller et kredsløbsmodul er en sonde, der går i kredsløb om planeten og over en lang periode studerer planeten (og dens måner). Merkur, Venus, Mars, Jupiter og Saturn har alle, eller har haft, satellitter i kredsløb, derudover asteroiderne Ceres, Vesta, Eros og Itokawa og med den nys overståede Rosetta-mission også en komet (67P C/G). For de mest velstuderede legemer, Mars og vores egen måne er der tale om en hel serie af kredsløbsmissioner med mange forskellige specialiserede instrumenter og både Mars og Månen er nu kortlagt i meget høj detalje.

En *lander* siger sig selv. Det er en sonde som foretager en blød landing på planeten. En lander leverer naturligvis billeder i langt højere opløsning end en satellit, men tillader derudover også at en lang række metoder tages i anvendelse, som ikke kan anvendes på afstand. Man kan bestemme grundstofsammensætning af overfladen og eventuel atmosfære, man kan måle lokale meteorologiske data som tryk og temperatur

og karakterisere planetens indre struktur gennem for eksempel seismometermålinger. Landinger har været foretaget med forskellig grad af succes på Månen, Mars, Venus, to asteroider (Eros og Itokawa), en komet (Rosetta-sondens kun delvist vellykkede Philae-lander) og endelig som den måske mest imponerende bedrift Huygens-sonden på Saturns måne Titan. Også her kan både Månen og Mars præsentere en lang liste af vellykkede landinger.

En *rover* er en mobil lander. Indtil nu er disse kun anvendt på Månen og på Mars. Rovere mangedobler det videnskabelige udbytte af en landing ved at give mulighed for at foretage detaljerede observationer ikke bare af ét enkelt landingssted men af en lang række stop langs missionens rute. Med en rover kan man for alvor begynde at karakterisere et landskab og udføre egentlig feltgeologi.

Sample Return, eller returnering af prøver, består i at hente prøver af planetens overflade og atmosfære og sende dem hjem igen til Jorden. Endnu har vi ikke haft en sample return mission på en af Solsystemets planeter. Sonderne Stardust og Hayabusa har bragt meget begrænsede mængder af materiale hjem fra henholdsvis halen af en komet og den lille asteroide Itokawa. Den primære erfaring med sample return er dog fra Månen, hvor Apollo-programmet hjembragte ialt 382 kg materiale og dertil skal lægges 326 g hjembragt af de ubemandede sovjetiske Luna-sonder.

På Mars er der i øjeblikket seks aktive satellitter i kredsløb og to aktive rovere på overfladen. Denne sværm af rumsonder og deres forgængere i de sidste to årtier, hvor Mars har været kontinuerligt "beboet" af aktive rummissioner, har medført en løbende eksplosion i viden om Mars og forståelse af planetens klima, geologi og historie. Vi kender nu Mars som en kompleks verden med en stor diversitet i terræn og landskaber og en lang, dynamisk geologisk og klimatologisk historie, der kan følges næsten helt tilbage til Solsystemets dannelse. Vi ved, at der er store mængder is gemt i undergrunden og på polerne, og vi ved, at der i fortiden har været en tættere atmosfære og et fundamentalt anderledes klima, hvor vand faldt som regn eller sne, løb over planetens overflade i utallige floder og samledes i kratersøer og måske endda et ocean på den nordlige halvkugle.

Mars var i sin tidlige historie ikke ulig Jorden og spørgsmålet melder sig med større kraft end nogensinde, om Mars kan tænkes nogensinde at have huset liv i form af primitive mikroorganismer. Med henblik på at besvare dette spørgsmål og en lang række andre uløste gåder er sample return det naturlige næste skridt i udforskningen af Mars.



Figur 1. Mars fotograferet af den indiske Mangalyaan-orbiter. En begyndende støvstorm ses på den nordlige halvkugle øverst til venstre i billedet. (Indian Space Research Organisation).

Hvorfor sample return?

Der er ingen tvivl om, at den tekniske udfordring ved at samle materiale fra Marsoverfladen og sende det til Jorden er betydelig. Også betydeligt større end for den samme manøvre på Månen. Mars er både meget, meget længere væk og har et meget større tyngdefelt end Månen. Begge dele komplicerer udfordringen. Så hvorfor overhovedet kaste sig ud i det? Hvad er den forventede gevinst ved at hente prøver på Mars for at studere dem på Jorden?

Selv om en Marsrover er en sofistikeret robot med sofistikerede instrumenter om bord, er der slet ingen tvivl om, at de instrumenter der er til rådighed i laboratorier på Jorden kan mere. Man vil kunne studere prøver i langt højere rumlig opløsning ved metoder som f.eks. elektronmikroskopi og således opnå en langt mere detaljeret forståelse af en stens indre. Man vil kunne gå skridtet videre fra at bestemme grundstofsammensætning til at opløse disse grundstoffer i isotoper, hvilket man nu kun i meget begrænset grad er i stand til på Mars. Det vil tillade absolut radiometrisk datering. En uhyre vigtig pointe på Mars, hvor overfladens alder ellers kun kan bestemmes ved at tælle meteorkraterer, en vigtig metode, som dog er behæftet med betydelig usikkerhed. Isotopforhold kan også benyttes til andre studier, f.eks. kan forholdet mellem kulstof 12 og 13 i et gammelt sediment afsløre, hvad dette forhold var i atmosfæren dengang sedimentet blev dannet og således bære information om atmosfærens udvikling over tid.

Nok så meget som specifikke metoder, der kan anvendes, ligger gevinsten i den *tid* man vil have til rådighed når en prøve først er hentet hjem til Jorden. Man vil kunne undersøge den grundigt med et helt batteri af metoder, man vil kunne sende den rundt til forskellige laboratorier for uafhængig bekræftelse af resultater, man vil kunne følge op med analysemetoder som man ikke umiddelbart havde troet, der ville være

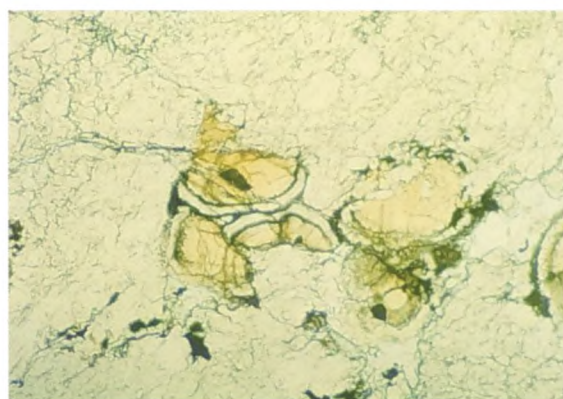
brug for, eller sågar år senere med analysemetoder som endnu ikke var opfundet da missionen blev sendt afsted.

Hvad angår et af de helt centrale spørgsmål, nemlig spørgsmålet om fortidigt liv på Mars, er det faktisk svært at forestille sig, at man kan finde beviser som vil kunne accepteres bredt *uden* at hente prøver hjem til Jorden og studere dem uafhængigt i en række laboratorier, hvor alternative hypoteser kan opstilles og afvises over tid.

Så vidt fordelene i forhold til studier foretaget af en rover på overfladen af Mars. Men hvad med meteoritter? Vi kender nu til over 100 meteoritter som vi med stor sikkerhed *ved* stammer fra Mars. Det er altså sten, som er blevet kastet af Marsoverfladen ved et stort meteornedslag og som siden har ramt Jorden og er fundet som meteoritter. Betydelige dele af vores viden om Mars stammer fra sådanne meteoritter.

Her er de centrale gevinster ved sample return *udvælgelse* og *kontekst*. En prøve som er specifikt udvalgt af en mission til et ekstra-spændende specifikt udvalgt sted på Marsoverfladen, og som kan sættes i kontekst af en bred geologisk forståelse af det sted den stammer fra, er uhyre meget mere værdifuld end en prøve som vi ved stammer fra Mars, men hvor vi ikke aner *hvor* på Mars den kommer fra. For eksempel er en dateret prøve jo oplagt meget mere værd, hvis man ved, hvor den kommer fra og man dermed kan datere et område på Mars. Også når det gælder forskellige potentielle spor af fossilt liv, er kontekst kritisk vigtig. Der vil i nærmest alle tilfælde findes alternative ikke-biologiske hypoteser for dannelsen af en given struktur i en sten, og kun hvis man ved hvor og i hvilken geologisk sammenhæng stenen er fundet, kan man skelne mellem disse forskellige hypoteser.

Endelig, og uafhængig af det videnskabelige rationale, så vil en sample return mission, også teknisk, fungere som en slags forøvelse til en bemandet marsmission. En bemandet mission vil jo oplagt kræve (fraset diverse fantasifulde scenarier) den tekniske formåen til at returnere en rumsonde fra Mars til Jorden.



Figur 2. Billede i høj opløsning af et tyndslæbet udsnit af meteoritten ALH84001. Billedet er omkring 0,5 mm bredt. De halvcirkelformede strukturer i midten er aflejringer af mineralerne siderit (jern-karbonat) og magnesit (magnesiumkarbonat) aflejret efter stenens dannelses på et tidspunkt, hvor varmt vand trængte ind i stenen. Der er en stående, endnu uafklaret, videnskabelig kontrovers om mulige spor af mikroorganismer fundet i disse aflejringer. (A. Treiman, Lunar and Planetary Institute).

Mars 2020-missionen

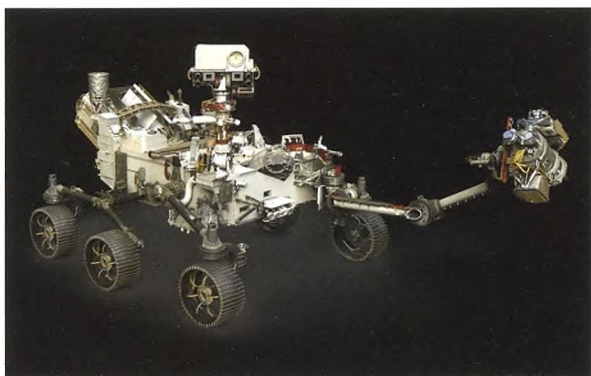
Fordi en sample return mission er så stor en teknisk (og økonomisk) udfordring opererer NASA med at dele udfordringen op i ikke mindre end tre separate missioner. En *caching rover*, en *fetch rover* og *miniraket* samt en *returnerende orbiter*.

En "cache" betyder et lille lager eller depot (man kender måske begrebet geo-caching). Caching-roveren skal kortlægge og udforske landingsstedet, identificere de mest interessante prøver og samle dem i et lille depot. Den næste mission er så en lander, som bærer dels en lille, simpel rover, dels en lille raket. Den simple fetch-rover har som primær opgave at hente lageret af prøver og bringe det tilbage til landeren, hvor prøverne placeres i en lille raket. Den lille raket, som har en total nyttelast på få kilogram, løfter så prøverne ud i kredsløb om Mars, hvor man har rendezvous med den returnerende orbiter. Endelig forlader den returnerende orbiter Mars og vender tilbage til Jorden.

Af de tre missioner er det kun den første, caching roveren, som nu er vedtaget og finansieret. Denne rover er Mars 2020-missionen, som skal opsendes i 2020 og som vil nå Mars i 2021.

Den primære fidus ved således at dele opgaverne ud på flere missioner er, at den første lander kan fokuseres på den videnskabelige udfordring i at udvælge de rette prøver og så minutiøst som muligt karakterisere prøvernes geologiske kontekst. Den senere lander kan så spare meget af den videnskabelige instrumentering og fokusere på den tekniske udfordring i at løfte prøverne ud af Mars' tyngdefelt.

Mars 2020 roveren bliver en stor, sofistikeret rover, bygget på det samme grundlæggende design som roveren *Curiosity*, der landede i 2012, men med et andet sæt instrumenter og selvfølgelig en anden opgave. Roveren har en hel række instrumenter fokuseret på geologisk rekognoscering, og derudover har den et system til at samle 30-40 prøver, hver med en vægt på omkring 30 gram. Selve indsamlingen af prøverne er i sig selv en betydelig teknisk udfordring, ikke mindst fordi perspektivet om mulige spor af fortidigt liv på Mars stiller store krav til sterilisation af bor og prøvehåndteringssystem og forsegling af prøverne efter indsamling.



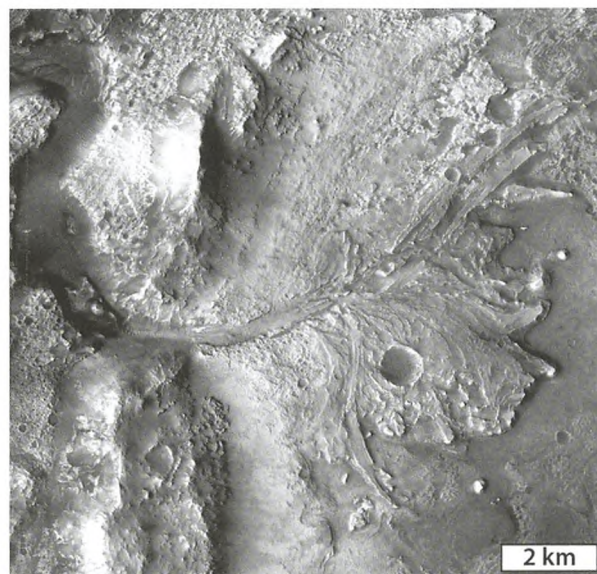
Figur 3. Tegning af Mars 2020-roveren, der er på størrelse med en lille personbil. Danske forskere fra Københavns Universitet og fra DTU bidrager til fire af de i alt syv videnskabelige instrumenter på roveren. (NASA/JPL-CALTECH).

Landingssteder

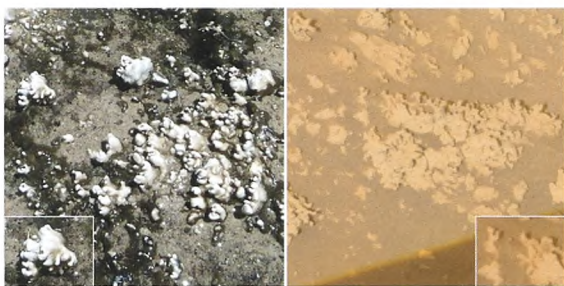
Det er naturligvis centralt for missionens succes, at man udvælger det rette sæt prøver at bringe med tilbage til Jorden. Og udvælgelsen af det rette sæt prøver begynder med udvælgelsen af det rette landingssted på Mars. Missionen vil som sagt kunne hente 30-40 prøver med hjem til Jorden. Denne samling af prøver kan meget vel blive den eneste samling af returnerede prøver fra Mars i mange år, og det er naturligvis uhyre vigtigt at sammensætte et sæt prøver, som kan fortælle os så meget som muligt om Mars pakket i en lille samling på et par kilogram sten og jord.

En helt central generel egenskab ved et muligt landingssted er derfor, at der er en stor geologisk *diversitet* på stedet. Vi leder efter steder som både indeholder *sedimentære* klipper, der bærer information om vandets historie på Mars og om fortidens klima, men som også helst indeholder primær, *magmatisk* klippe (størknet lava) som kan fortælle om planetens indre og som kan bruges til datering. Vi leder efter steder, som indeholder sten fra flere forskellige epoker i planetens historie i umiddelbar nærhed af hinanden. For eksempel steder, hvor store meteornedslag har kastet blokke af ældre geologiske lag hen i nærheden af de yngre lag på overfladen.

De allervigtigste prøver vil dog være sedimentære prøver fordi det er her, man potentielt kan finde spor af fortidigt liv. Præcis hvilket terræn der giver den største chance for gevinst i dette lotteri afhænger dog meget af de antagelser, der gøres om Mars' fortid, og der er stor uenighed om hvilke miljøer, der er bedst egnede. Fortidige varme kilder? Gammel søbund? Deltaaflejringer? Skal man gå efter de steder, hvor overfladen er formet af fortidigt vand, eller er det bedre at sigte på de steder hvor man i spektre fra kredsløb ser mineraler (f.eks. salte og lermineraler), der vidner om tilstedeværelsen af vand?



Figur 4. Delta-aflejring, hvor en udtørret flod munder ud i Jezero-krateret på Mars. Jezero-krateret indeholdt en sø for over 3,5 milliarder år siden. Dele af den gamle søbund er siden blevet dækket af lava, som visse steder løber umiddelbart op til gamle deltaaflejringer. Dette område er en af de ledende kandidater som landingssted for Mars 2020-missionen. (NASA/MSSS).



Figur 5. Venstre: Silikataflejringer fra et system af varme kilder i 4300 meters højde i Atacama ørkenen i Chile. Højre: Lignende struktur fotograferet af roveren Spirit i Gusev-krateret på Mars. Begge billedfelter er omkring 15 cm brede. Sådanne aflejringer er gode til at indkapsle og bevare fossilt liv, og strukturerne fra Chile er fulde af mikrofossiler. På grund af denne analogi overvejes Gusev-krateret seriøst som landingssted for 2020 missionen, selvom der allerede har været en marsmission på stedet.

Hvad angår magmatisk klippe er det en vigtig pointe, at bare én daterbar sten, hvis den stammer fra en overflade, der kan aldersbestemmes vha. kratertælling, vil reducere usikkerheden betydeligt på *alle* aldersbestemmelser af landskaber på Mars, som er foretaget ved kratertællinger. Ideen i kratertællings-metoden er ligetil: Meteoror falder fra himlen og kraterne akkumulerer over tid, så de ældste landskaber vil have den største tæthed af meteorkrater. Når man skal oversætte denne *relative* aldersbestemmelse til en *absolut* alder, er man dog afhængig af en ekstrapolation fra Månen, hvor man jo har absolut radiometrisk daterede prøver. Dermed introduceres en betydelig usikkerhed. Én enkelt prøve af størket lava fra en større lavastrøm, der kan dateres via kratertællinger, vil dermed kunne fungere som ankerpunkt for hele tidsskalaen for Mars' geologiske historie.

Ud over de videnskabelige gevinster, som et muligt landingssted tilbyder, er der naturligvis også en række mere teknisk-ingeniørmæssige faktorer, som skal tages med i betragtning. Hvor koldt er der? Hvor navigérbart er terrænet? Hvor sikkert er det at lande på? Er der mange store sten? Sandklitter? En stor del af presset for at lægge sig fast på ét bestemt landingssted kommer hurtigt fra den tekniske side, hvor de ingeniører, der skal bygge roveren og dens landingssystem naturligvis gerne vil kunne forudsige så præcist som muligt, hvilket miljø, den skal kunne fungere i.

Afrunding

Selvom der er nogle år endnu til landingen på Mars i 2021, er forberedelserne til missionen i fuld gang. Forskere har siden 2014 reduceret en oprindelig liste på 30-40 foreslåede steder til otte forslag, som stadig var i spil ved årsskiftet. I begyndelsen af februar 2017 mødtes omkring 200 forskere til en tre-dages workshop som mandede ud i en reduceret liste på nu kun tre tilbageværende kandidater. Instrumentholdene er langt med design af instrumenter, og i de fleste tilfælde er alle større designmæssige beslutninger fastlagt nu. I løbet af det kommende år vil selve konstruktionen af både roverens krop og de forskellige instrumenter begynde for alvor.

Selvom missionen ledes og finansieres af NASA i USA, er der betydelige internationale bidrag fra lande som Frankrig, Spanien og Norge. Også danske forskere fra både DTU-Space og Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet deltager med ansvar for at levere dele til flere af instrumenterne på roveren.

Der arbejdes altså på fuld kraft mange steder i verden på at gøre drømmen om *Mars Sample Return* til virkelighed, og i hvert fald det første skridt i 2020-2021 har alle muligheder for at lykkes. Hvorvidt der så vil være politisk vilje til at finansiere de opfølgende missioner, der rent faktisk skal hente prøverne hjem til Jorden, ja det vil tiden vise.

Forskerne på missionen håber og tror naturligvis på, at hvis man samler et sæt prøver, som er interessante nok og som bærer på fundamental ny viden om Mars og om Solsystemets og måske livets udvikling, så vil ønsket om at hente prøverne hjem til Jorden være stærkt nok til, at det bliver virkelighed i løbet af det kommende årti.



Kjartan Kinch er fysiker og planetforsker ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet. Han arbejder med kalibrering, test og styring af kameraer på flere af NASA's marslandere og er med på holdet bag det primære videnskabelige kamera på Mars-2020-missionen. Han interesserer sig for klimaet gennem Mars' geologiske historie og for støvet i Mars' atmosfære.

PFEIFFER VACUUM

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Biologi til Mars

Af Christina Toldbo, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

I laboratorierne på Institut for Plante- og Miljøvidenskab (PLEN) arbejder hvert år et hold af studerende med at gøre bemandede Mars-missioner mulige. Ved at kombinere syntesebiologi og rumforskning, undersøges det, hvordan man ved genmanipulation kan gøre forskellige typer af planter og bakterier mere hårdføre overfor Mars' miljø, samtidig med at de kan producere medicin, kemikalier eller plastik til brug for astronauterne.

Det er efterhånden mange årtier siden at vi sidst besøgte Månen. Hvordan kan det være, at der ikke for længst har været mennesker på Mars? Svaret er simpelt: Det er for dyrt og for risikabelt.

Hvordan man tager til Mars, afhænger af tidspunktet for opsendelsen og hvilke baner man benytter. NASA har beregnet at den mest sandsynlige retur-mission til Mars vil strække sig over mere end 500 dage. Ønsker man et længere ophold på selve overfladen, er det i nærheden af 900 dage, man skal bruge på at komme frem og tilbage [1]. Den bogstaveligt talt astronomiske afstand hjemmefra skaber nye, store udfordringer af både teknisk, økonomisk, etisk, og endda psykologisk karakter.

Ved Apollo-missionerne, som satte mennesker på Månen, var tidshorisonten højst et par uger og i nødstilfælde kunne astronauterne vende tilbage til Jorden på få dage. På den Internationale Rumstation (ISS) kommer der med jævne mellemrum forsyningsfartøjer, og i tilfælde af en nødsituation kan astronauterne vende tilbage til Jorden på få timer [2]. På en Mars-mission er der hverken mulighed for en hurtig flugt tilbage til Jorden eller for at sende hjælp eller ekstra forsyninger. Astronauterne bliver derfor nødt til at kunne klare sig selv, og det medfører, at de skal medbringe mad, vand, tøj, medicin og ilt til flere år. Det estimeres at en enkelt astronaut skal bruge omkring 8000 kg materialer om året [3] og det inkluderer ikke vægten af selve raketten, udstyr til fx beboelse, energiforsyning og transport eller brændstof til raketten. Det absolut billigste bud på hvor meget det vil koste at sende et enkelt kg til Mars er på omkring 6600 \$ [4], dvs. ca. 300 mio. kr pr. astronaut.

Superplanter til koloniseringen af Mars

Men hvad nu hvis astronauterne selv kunne producere det de skal bruge undervejs? Siden rumalderens begyndelse er der blevet forsket i, hvordan man kan producere afgrøder i rummet. Det eneste en plante skal bruge for at gro er næringsstoffer, sollys og CO₂. Planter omdanner via fotosyntesen CO₂ til ilt og det betyder, at planter vil kunne give astronauterne både føde og ilt. En bonus er, at atmosfæren på Mars består af 92 % CO₂ og at en "sol" (navn for et Mars-døgn) er ca. ligesom et døgn på Jorden. Der er altså rigeligt med CO₂ og sollys efter ankomsten til Mars.

Et problem med planter er dog, at de er forholdsvis skrøbelige og ofte tilpassede meget specialiserede forhold. På en Mars-mission er det en nødvendighed, at

planterne kan overleve både selve turen og i mange år efter ankomsten. Det er lettere sagt end gjort for Mars er ganske ubeskyttet uden hverken en tyk atmosfære eller et stærkt magnetfelt. Det betyder, at Solen svitser alt liv på overfladen med dødelige UV-stråler, vandet er frosset eller fordampet og temperaturen svinger med op til 100 °C på et døgn. Derudover er trykket lavere, tyngdekraften er kun 38 % af Jordens og Mars-jorden er giftig for planter fordi den indeholder perchlorater.

Alle disse faktorer gør det ekstremt vanskeligt for liv at overleve på Mars. En måde man kan højne chancerne for overlevelse er ved at benytte syntesebiologi. Med syntesebiologi designs og konstrueres nye biologiske systemer ved at ændre generne i naturlige organismer.

SpaceMoss: Kulderesistent mos

At bruge syntesebiologi indenfor rumfart fangede i 2015 interessen hos en gruppe studerende på Københavns Universitet. Projekt *SpaceMoss* [6] blev startet og ideen var at lave et "proof-of-concept" der kunne inspirere omverdenen ved at vise, at et lille hold af studerende i løbet af et halvt år genetisk kunne manipulere en plante til at være nyttig på en fremtidig bemanded Mars-mission. Projekt *SpaceMoss* kunne således være med til at bane vejen for andre lignende projekter og promovere samarbejdet inden for biologi og rumforskning.



Figur 1. Nogle af medlemmerne af Projekt *SpaceMoss*. Fra venstre: Jonathan Arnesen, Adam Petersen, Victoria Sosnovtseva og Christina Toldbo.

SpaceMoss' første delmål var at gøre mosset i stand til at klare de store temperatursvingninger på Mars. Nær Mars' ækvator kan overfladetemperaturen blive op til 25 °C. Men ved solnedgang falder temperaturen hurtigt til under frysepunktet og om natten bliver det ned til -65 °C. Selvom mosset på Mars formentlig ville være indenfor i en form for drivhus, vil det stadig være gavnligt, at mosset er mere resistent overfor kulde,

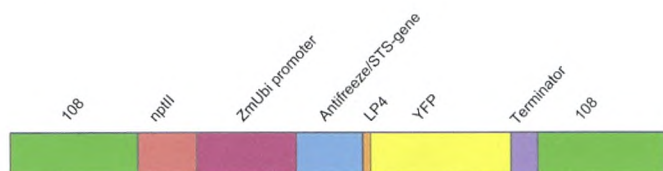
da det i så fald vil koste mindre energi at opvarme drivhuset til plus-grader.



Figur 2. Petriskål med mos. Typen af mos, som SpaceMoss forskede i hedder *Physcomitrella patens* og er den samme mos, som man finder i sin baghave.

SpaceMoss begyndte jagten efter andre organismer, der klarer sig exceptionelt godt under kolde betingelser. Naturen har flere gode kandidater og valget faldt på larven *Spruce Budworm*, der lever i de nordamerikanske granskove. Her anses den for at være et skadedyr, fordi den spiser grantræerne – selv gennem de hårde vintre. *Spruce Budworm* kan nemlig overleve i ned til -30°C , da den besidder et antifreeze protein som forhindrer væsken i cellerne i at forme iskrystaller, der kan punktere cellevæggene.

Ved at tage DNA-sekvensen, der koder for dette protein, og splejse det ind i mossets eget DNA, kan man potentielt overføre kulderesistensen til mos. Gensplejsningen foregår ved at man designer et “gene construct” som indsættes i mosset via en proces kaldet “Homolog-rekombination”. I figur 3 ses en forenklet tegning af det construct, som SpaceMoss designede.

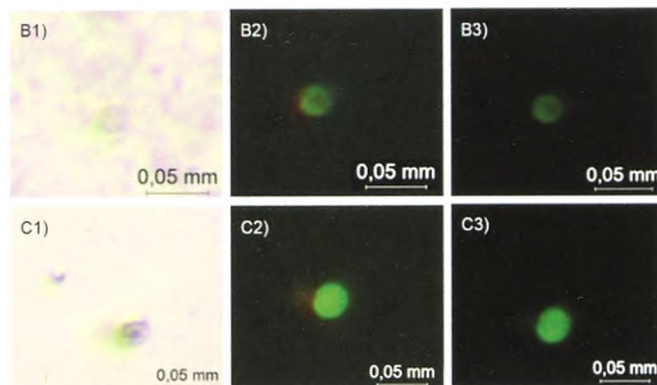


Figur 3. De to yderste dele (gene 108) ligner mossets eget DNA og derfor “snydes” mosset til at inkorporere constructet. ZmUbi er en promotor, der fungerer som et “start”-gen, mens terminatoren er et “slut”-gen. Imellem promotoren og terminatoren findes gensekvensen for det vi er interesseret i at producere.

Som i al videnskab er det nødvendigt at have en test for om forsøget er gået godt. Til det kan man bruge det fluorescerende YFP-protein. YFP-proteinet kommer fra en vandmand, og når man lyser på det med UV-lys,

lyser det op med et grønligt skær. Ideen er, at siden både antifreeze og YFP befinder sig, mellem promotor og terminator, kan man sikre sig at antifreeze proteinet succesfuldt er blevet splejset ind i mosset ved at tjekke, om man ser lys fra YFP i de berørte celler.

Efter et par fejlslagne forsøg lykkedes det at få et klart fluorescerende signal fra de enkelte manipulerede celler, se figur 4.



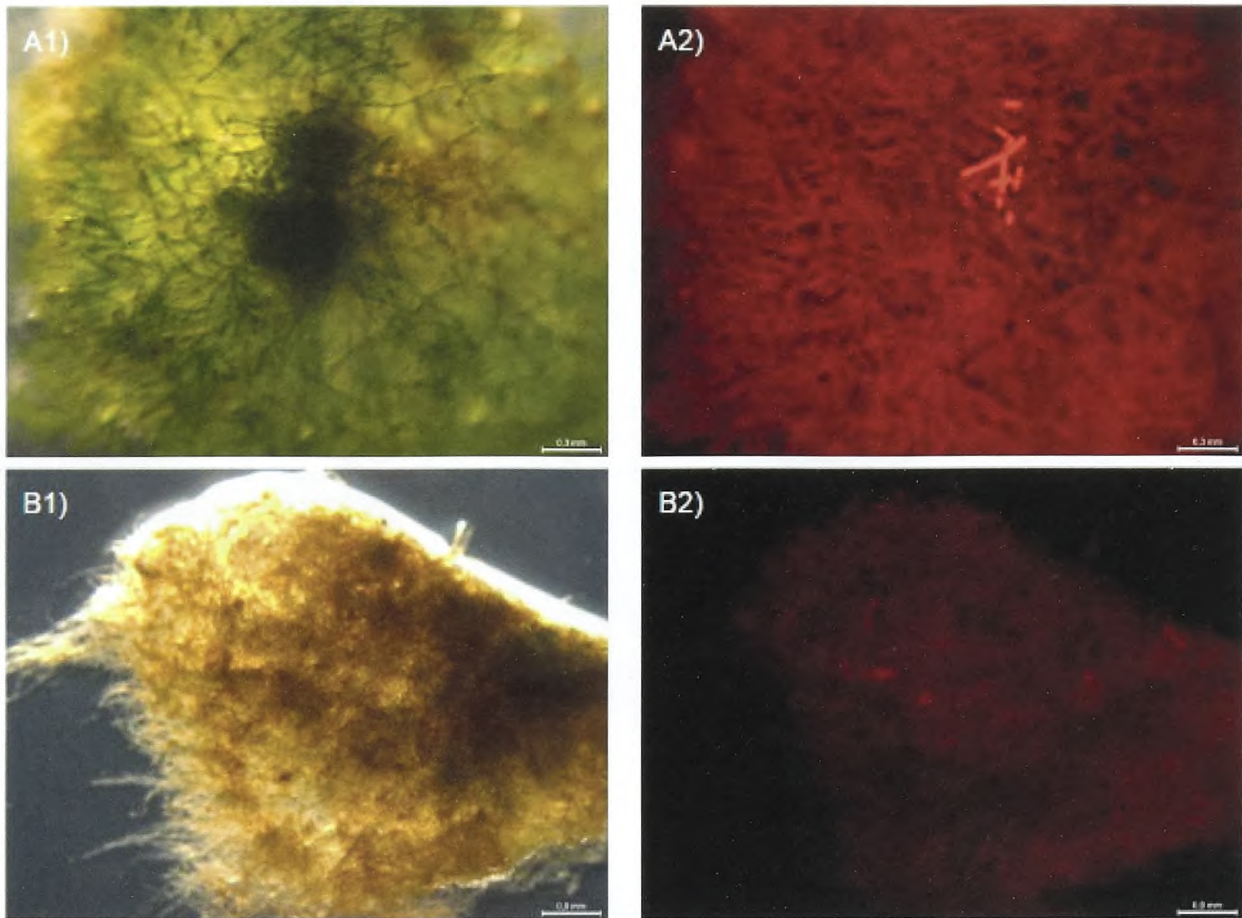
Figur 4. Enkelt mos-celle udsender lys fra YFP efter at constructet er blevet indsat i mosset. Signalet betyder at både anti-freeze og YFP-proteinerne er blevet succesfuldt indsat i mosset.

Men blot fordi antifreeze-proteinet bliver succesfuldt splejset ind i mosset, betyder det ikke nødvendigvis, at det er lykkedes at gøre mosset mere hårdført overfor kulde. SpaceMoss byggede derfor en simpel forsøgsopstilling bestående af en aluminium-bar og en isolerende flamingokasse. Baren blev afkølet i den ene ende med tøris, og der blev dermed dannet en temperaturgradient. Ved at placere almindelig mos og genetisk manipuleret mos langs denne gradient, og måle temperaturen langs baren, kan det undersøges ved hvilken temperatur mosset dør.

Mossets overlevelsessevne bedømmes fra klare visuelle tegn (fx om mosset er blevet brunt), men også hvor kraftig autofluorescensen er. Autofluorescens er et lys alle levende planteceller udsender, og på styrken af dette lys kan man få et indtryk af mossets tilstand.

Resultaterne viste indikationer på, at det genetisk manipulerede mos var bedre til at overleve et døgn i -20°C , end almindeligt mos var. Det var dog kun enkelte celler der overlevede, hvilket kan betyde, at antifreeze-proteinet muligvis kun var blevet splejset ind i enkelte og få celler. I -30°C var både genetisk manipuleret og almindeligt mos dødt efter et døgn. For virkelig at kunne konkludere om mosset konsekvent er mere resistent overfor kulde, er der behov for langt flere forsøg og langt mere mos.

Problemet med at bruge mos er, at det er lang tid om at gro og at det optager meget plads i forhold til det udbytte det potentielt kunne give. Faktisk er det problemet med de fleste såkaldte ‘højere plantearter’, og derfor forskes der også i, hvordan mindre organismer som alger eller cyanobakterier kan medbringes på rumrejser og indtages som føde. Både alger og cyanobakterier er encellede organismer og blandt noget af det første liv på Jorden. Ligesom større planter laver de CO_2 om til ilt gennem fotosyntese, men de er langt mere robuste, gror hurtigere og så er de små.



Figur 5. De to øverste billeder viser det genmanipulerede mos efter 24 timer ved -20°C , mens de to nederste billeder viser helt almindelig "vild-type" mos efter 24 timer i -20°C . Billederne til venstre er i synligt lys og det ses umiddelbart, at det manipulerede mos er grønnere end det almindelige mos. Kigger man på billederne til højre ses områder med autofluorescens – i det manipulerede mos er der enkelte celler, der stadig udsender kraftigt lys. Længdeskalaen i billedene er 0,3 mm i de øverste og 0,8 mm i de nederste.

I 2016 valgte det tidligere SpaceMoss-hold et nyt hold af studerende til at føre forskningen videre inden for syntesebiologi i rumforskning. Holdet kom til at hedde *CosmoCrops* og de besluttede sig for at arbejde med bakterier i stedet for mos.

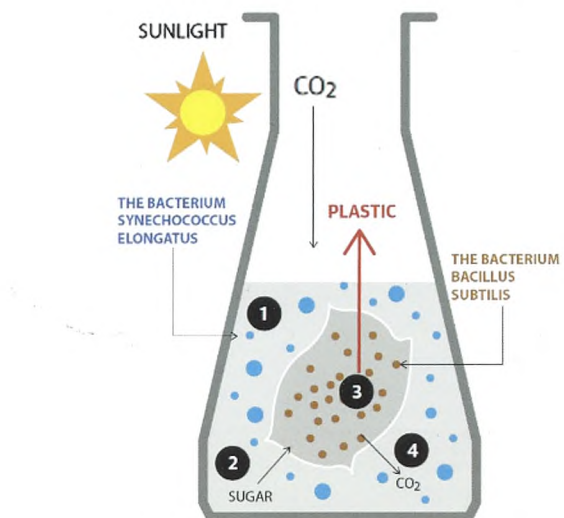
CosmoCrops: Plastik-producerende bakterier

CosmoCrops [7] designede en co-kultur: Et biologisk system der består af to forskellige organismer, som er i stand til at understøtte hinanden mens de sideløbende gror og deles om næringsstofferne. Den ene organisme er en cyanobakterie, der omdanner CO_2 til ilt via fotosyntesen og producerer sukker.

Dette sukker kan den anden bakterie i kulturen bruge. Den hedder *Bacillus Subtilis*, og det er denne bakterie, som CosmoCrops manipulerede genetisk til at producere bioplastik PLA (Poly Lactic Acid) inde i sine celler. De to bakterier er adskilt af en såkaldt dialysepose. Det er lidt som en filterpose, som bakterierne ikke kan gå igennem, men som frit lader næringsstoffer passere frem og tilbage. I princippet er det muligt at manipulere *B. Subtilis* til at producere noget andet end plastik. Fx medicin, kemikalier, duft- eller smagsstoffer.

B. Subtilis er meget anvendelig til rumrejser, fordi dens sporer (en inaktiv form af bakterien) kan overleve i flere år uden næring. Altså kan man let opbevare dem indtil man skal bruge dem, og man kan gemme en

backup, hvis noget skulle gå galt i ens produktion.



Figur 6. Princippet bag CosmoCrops co-kultur. Den indre del (nummer 3) er en dialyse-pose som indeholder *Bacillus Subtilis*. En dialyse-pose, kan forstås som en form for filter-pose, hvor kun nogle organismer og molekyler kan passere igennem. Posen adskiller *Bacillus Subtilis* fra cyanobakterien, som befinder sig udenfor i kolben. Cyanobakterien bruger CO_2 og sollys til at producere sukker. Sukkeret kan diffundere gennem posen og bruges af *Bacillus Subtilis* til at gro. Den genetisk modificerede *Bacillus Subtilis* producerer bioplastik. Tegning af Gert Gram.

Som det også var tilfældet med SpaceMoss, er det nødvendigt at tænke på organismens overlevelsesmuligheder. Her har bakterier den fordel at de kan "tilpasse" sig udefra kommende stress, hvis de bliver udsat for betingelserne lidt ad gangen. De kan simpelthen udvikle sig, ved naturlige mutationer, til at være resistente overfor visse betingelser.

På Niels Bohr Institutet i København har studerende bygget et kammer, der kan bruges til at undersøge hvordan bakterier reagerer, når de bliver udsat for disse prøvelser i et simuleret Mars-miljø. Kammeret hedder *Jens Martin Mars Chamber* (JMMC) og er kort fortalt 'Mars i en boks'. Med kammeret kan man ændre på tryk, atmosfære og stråling og dermed gøre bakterierne gradvist modtagelige overfor nogle af Mars-miljøets prøvelser. Gennem et samarbejde med Leiden Universitetet i Holland blev bakterierne yderligere udsat for forhold, der minder om vægtløshed.

Studieprojekter lægger fundament for fremtiden

Både SpaceMoss- og Cosmocrops-holdene bestod af bachelor- og kandidatstuderende fra flere forskellige fakulteter. Bl.a. fysik, bioteknologi, biomedicin, biologi, matematik, datalogi og studerende fra CBS. Denne tværfaglighed var den største styrke ved projekterne fordi grænserne for, hvad der kan lade sig gøre, bliver skubbet. Studerende har endnu intet omdømme som kan skades, og de er derfor villige til at tage flere chancer og angribe problemerne med nysgerrighed og innovative tilgangsmåder.

Det langsigtede perspektiv ved projekt SpaceMoss og CosmoCrops er, at man vil kunne bygge et modulært drivhus på Mars, hvor man har forskellige typer af organismer, der er mere eller mindre hårdføre overfor Mars-betingelserne, og som kan producere forskellige stoffer eller materialer alt efter behov. Dermed ville en base på Mars kunne blive næsten selvforsynende. Men resultaterne er langt fra kun gavnlige indenfor rumforskning: Planter, der er resistente overfor frost, kan hjælpe til at løse problemer med stigende behov for mad på Jorden, da det ville være muligt at dyrke afgrøder hele året rundt. Produktion af bioplastik i cyanobakterier kan potentielt producere mere plastik på en ny og bæredygtig måde.

SpaceMoss og Cosmocrops deltog begge i det uofficielle verdensmesterskab i syntesebiologi: *iGEM*-konkurrencen, som hvert år afholdes i Boston og hvor omkring 300 hold deltager fra hele verden. SpaceMoss vandt guld-certificering og to nomineringer i kategorierne 'Best Environmental Project' og 'Best Biobrick', mens CosmoCrops vandt bronze-certificering og NASA's interesse. Ideen med *iGEM*-konkurrencen er at skabe et open-source bibliotek af såkaldte biobricks. Biobricks er små stykker funktionel DNA, som kan sættes sammen og danne nye biologiske systemer – man kan se det lidt som biologiske legoklodser. Hvert år samles alle resultaterne fra de deltagende hold, og biblioteket af biobricks udbygges til det følgende år, hvor nye hold af studerende bygger videre. Konkurrencen har været afholdt siden 2003 og omfatter til dato flere end 20.000 biobricks [5].

Studerenterprojekter som disse har utrolig stor indflydelse for alle involverede. SpaceMoss og CosmoCrops fik stor bevågenhed i både indland og udland og har bidraget til positiv reklame for Københavns Universitet og dansk forskning – hvilket har sikret, at projekterne fortsat kan få støtte. Det har åbnet døre for udlandsophold, speciale- og ph.d.-positioner for de involverede studerende og resulteret i den nystartede virksomhed *Batea Biotechnology*, som i forlængelse af CosmoCrops producerer bioplastik. I 2017 starter et nyt hold i kølvandet af SpaceMoss og CosmoCrops og kun fantasien sætter grænser.



Figur 7. Logoerne fra SpaceMoss (øverst) og CosmoCrops (nederst) afspejler hvordan holdene leger med konceptet om biologi i rummet.

Litteratur

- [1] NASA (1997), Human Exploration of Mars: The reference Mission of the NASA Mars Exploration Study Team, Technical Report, NASA Special Publication SP-6107, NASA Johnson Space Center, 1997.
- [2] Is there any evacuation plan on the ISS in case of an emergency?, <https://www.quora.com/Is-there-any-evacuation-plan-on-the-ISS-in-case-of-an-emergency-Are-there-any-drills-performed-on-the-ISS-for-an-evacuation>.
- [3] Schwartzkopf, S.H. (1992), Design of a Controlled Ecological Life Support System – Regenerative Technologies are Necessary for Implementation in a Lunar Base CELSS, *Bioscience* vol. 42, no. 7, pp. 526-535.
- [4] SpaceX Capabilities & Services (Falcon Heavy, Payload to Mars), <http://www.spacex.com/about/capabilities>.
- [5] The International Genetically Engineered Machine Competition (iGEM), Registry of Standard Biological Parts, <http://parts.igem.org/Collections>.
- [6] SpaceMoss projektbeskrivelse, http://2015.igem.org/Team:UNIK_Copenhagen.
- [7] CosmoCrops projektbeskrivelse, http://2016.igem.org/Team:UNIK_Copenhagen.



Christina Toldbo er kandidat i fysik fra Niels Bohr Institutet. Hun har specialiseret sig indenfor rumfart og formidling og var medlem af projekt SpaceMoss og supervisor for projekt CosmoCrops. For mere information om projekterne se [6] og [7].

Foreningsnyt – foredrag i foråret 2017

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Marts				
13/3	19.15	Tyngdebølger	<i>Søren Brandt</i>	AS (Kbh)
20/3	19.15	Tyngdekraft og banebestemmelser	<i>Hans Kjeldsen</i>	AS (Aarh)
20/3	19.30	Fremtidens energilagring – næste generation batteriteknologi	<i>Tejs Vegge</i>	SNU
April				
3/4	19.15	Tyngdebølger	<i>Søren Brandt</i>	AS (Aarh)
3/4	19.15	Tyngdekraft og banebestemmelser	<i>Hans Kjeldsen</i>	AS (Kbh)
5/4	19.30	Vindmøller på havet – en industri i kraftig vækst Efter foredraget er der generalforsamling.	<i>Jens Jakobsson</i>	SNU
Maj				
1/5	19.15	Tidevandet	<i>Ib Lundgaard Rasmussen</i>	AS (Kbh)
8/5	19.15	Tidevandet	<i>Ib Lundgaard Rasmussen</i>	AS (Aarh)
8/5	19.30	Den net-integrerede elbil – elbilens muligheder i elsystemet	<i>Peter Bach Andersen</i>	SNU

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Inst., Aarhus Univ., Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Aud.F/G122, 8000 Aarhus C.

SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net, www.facebook.com/SNU1824).

Dansk Fysisk Selskab

DFS Årsmøde 2017

Det er os som bestyrelse i Dansk Fysisk Selskab (DFS) en stor glæde at kunne annoncere Årsmødet 2017 med det samme, nye, kick-off koncept som i 2016 og igen med et solidt line-up af inviterede foredrag fra vækstlaget i Dansk Fysik-forskning og -undervisning!

Årsmødet i Dansk Fysisk Selskab kommer i år til at ligge 22.-23. maj, og vil igen foregå på Fænø Park ved Middelfart. Årsmødet bliver i år afholdt i samarbejde med Dansk Selskab for Medicinsk Fysik, og programmet vil indeholde både fælles plenar-foredrag og foredrag i parallelle tematiske sessioner, samt selvfølgelig poster-session, middag og godt samvær med nuværende, tidligere og kommende kollegaer og studiekammerater! Vi er i arrangørkomiteen utroligt glade for allerede nu at kunne præsentere følgende inviterede foredragsholdere:

- Kristine Niss, RUC
- Jill Miwa, AU
- Tim Booth, DTU Nanotech
- Oriol Vendrell, AU
- Desiree Ferreira, DTU Space
- Jakob Kibsgaard, DTU Fysik
- Jason Koskinen, NBI
- Liv Hornekær, AU
- Thomas Olsen, DTU Physics
- Esben Skovsen, AAU
- Kasper Grove-Rasmussen, NBI
- Niels Gregersen, DTU Fotonik
- Jens Hesselbjerg Christensen, DMI/NBI
- Maja Horst, KU, Institut for Medier, Erkendelse og Formidling
- Chris Kouvaris, SDU
- Darach Watson, NBI.

Årsmødet vil derfor give mulighed for at se de nyeste resultater indenfor en bred vifte af fysiske discipliner, fra 2D-materialer og glasfysik til nanofotonik, neutrinoer og det nyeste fra klimaforskningen. Udover de

inviterede foredrag vil der naturligvis også være en lang række "contributed" foredrag i programmet, idet vi med DFS' årsmøder gerne vil skabe en god ramme for at også yngre fysikere kan præsentere deres arbejde for fagfæller.

Alle deltagere, særligt studerende, opfordres til at medbringe en poster, og der vil være kontante præmier til både det/de bedste foredrag og den/de bedste poster, og vinderne vil desuden blive inviteret til at skrive en artikel om deres projekt til KVANT.

Information om mødet, herunder pris, tilmelding og indsendelse af abstracts kan findes på DFS' hjemmeside dfs.nbi.dk. Der vil i år være fripladser til både gymnasie-lærere og studerende, og medlemskab af DFS vil som altid medføre en rabat på konferencegebyret.

Tilmeldingsfristen er den 21. april og yderligere information om tilmelding, program og ansøgning om friplads kan findes på www.dfs.nbi.dk.

Ændring i betalingsmåde for EPS-medlemskab

Dansk Fysisk Selskab (DFS) har i en længere årrække opkrævet det årlige kontingent for individuelt medlemskab af *European Physical Society* (EPS) og samlet sendt beløbet til EPS. Det havde relevans den gang, udenlandske betalinger var både dyre og besværlige. Det er de ikke længere. Samtidig har dette særlige danske arrangement fra tid til anden givet anledning til forviklinger i EPS' sekretariat. Det er derfor blevet aftalt med EPS, at tiden er løbet fra denne opkrævningsmetode. Danske individuelle EPS-medlemmer vil derfor fra 2017 blive opkrævet direkte af EPS for dette medlemskab, mens DFS udelukkende opkræver det danske kontingent. Vi vil gerne understrege, at denne ændring udelukkende berører individuelle medlemmer af EPS. Alle medlemmer af DFS er fortsat kollektive medlemmer af EPS, og alle får derfor tilsendt *Europhysics News*. Det ændres der ikke ved.

Selskabet for Naturlærers Udbredelse

Temaet for foredragsrækken i foråret 2017 er "Vedvarende energi". SNU byder på en række spændende foredrag om forskellige emner. Man behøver ikke at være medlem af SNU for at komme til foredragene. Alle er hjertelig velkomne!

Generalforsamling

SNU afholder generalforsamling i forbindelse med foredraget den **5. april 2017** på Geologisk Museum. Dagsordenen er:

1. Beretning for året 2016.
2. Forelæggelse af regnskab for 2016.
3. Forelæggelse af budget for 2017.
4. Fastlæggelse af kontingent for 2018.
5. Forslag om ændring af Lektor, dr.phil. Fru Kirstine Meyer f. Bjerrum's Mindelegat.
6. Forslag om ændring af SNU's vedtægter.
7. Valg af direktion jf. vedtægterne.
8. Valg af revisor.
9. Evt.

Astronomisk Selskab

"Tyngdekraften" er et højaktuelt tema, specielt efter opdagelsen af gravitationelle bølger i 2016. I foredragsrækken i foråret 2017 sætter vi fokus på en række interessante aspekter af tyngdekraften.

Generalforsamling i Astronomisk Selskab

Generalforsamlingen holdes som nævnt i Kvant nr. 4 fra 2016: Lørdag den **22. april 2017** kl. 13 på: *Naturcenter Skovgård*, Vandværkevej 32, Egebjerg, 8700 Horsens. Dagsorden:

1. Valg af dirigent og referent.
2. Godkendelse af referatet fra forrige generalforsamling.
3. Formandens beretning om Astronomisk Selskabs virksomhed i det forløbne år.
4. Beretning fra sektioner og udvalg.
5. Kassererens beretning for det reviderede regnskab.
6. Godkendelse af bestyrelsens budgetforslag for indeværende år og fastsættelse af medlemskontingent for det kommende år.
7. Ændring af foreningens vedtægter. Der er dels ændringen vedrørende indkaldelse til generalforsamling som tidligere er præsenteret i Kvant nr. 1, 2016 og dels en ændring af foreningens økonomiske status således at vi ved særlige anledninger kan aflønne medarbejdere.
8. Indkomne forslag.
9. Valg af to bestyrelsesmedlemmer for tre år. På valg er Johan Fynbo og Søren Lynggaard. De er begge villige til at modtage genvalg. Kasper Elm Heintz, der som suppleant afløste Ole Berg Nielsen i bestyrelsen i april 2016 vil gerne vende tilbage til sin rolle som suppleant. Majken B.E. Christensen har givet tilsagn om at stille op til bestyrelsen.
10. Valg af en første og en anden suppleant til bestyrelsen for ét år. Som nævnt ovenfor stiller Kasper op som suppleant. Den anden suppleant Jens Hessen-Hansen er villig til at modtage genvalg.
11. Valg af formand for ét år. Johan vil gerne fratræde som formand. Majken stiller op til formandsposten.
12. Valg af to revisorer samt en første og en anden revisorsuppleant for ét år. Revisorerne Steen Lærke og Bent Schou samt den ene revisorsuppleant Karsten Klindt-Jensen er villige til at modtage genvalg. Jette Cyron stiller op som revisorsuppleant som afløser for Birgit Fejerskov, der døde i november 2016.
13. Eventuelt.

Programmet for generalforsamlingsdagen indledes kl. 11 med foredrag af Majken Brahe Ellegaard Christensen. Derefter holder vi frokost – betalt af foreningen – inden den egentlige generalforsamling starter kl. 13. Læs mere om Majken nedenfor.

Generalforsamlingen indeholder vedtægtsændringer. Derfor bliver det sandsynligvis nødvendigt med en ekstraordinær generalforsamling. Den indkaldes med det forbehold at den bortfalder, hvis der kommer tilstrækkeligt mange medlemmer til den ordinære generalforsamling.

Indkaldelse til ekstraordinær generalforsamling i Astronomisk Selskab

Lørdag den **16. september 2017** kl. 13, med dagsordenen:

1. Valg af dirigent og referent.
2. Godkendelse af referatet fra forrige generalforsamling.
3. Bekræftelse af vedtægtsændring.
4. Eventuelt.

Generalforsamling i Kredsen om Wieth-Knudsen Observatoriet

Der indkaldes til generalforsamling lørdag den **25. marts 2017** på Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 19, 3220 Tisvildeleje. Dagsorden:

1. Valg af dirigent og referent.
2. Godkendelse af referat fra forrige kredsgeneralforsamling.
3. Formandens beretning om observatoriets drift og kredsens øvrige virksomhed.
4. Godkendelse af kredsens regnskab for forrige kalenderår.
5. Gennemgang af kredsens driftsbudget for indeværende år.
6. Andre planer for de kommende år.
7. Indkomne forslag fra medlemmerne.
8. Valg af bestyrelsesmedlemmer samt én suppleant blandt de i Gribskov Kommune fastboende kredsmedlemmer.
9. Eventuelt.

Nyt ansigt i spidsen for Astronomisk Selskab

Majken Brahe Ellegaard Christensen stiller op som formand og bestyrelsesmedlem i Astronomisk Selskab. Hun er 33 år og uddannet astrofysiker ved Niels Bohr Institutet, hvor hun er specialiseret i stjernedannelse for Universets største stjerner. Udover at have sit eget formidlingsfirma, *Astronomicca*, arbejder hun til dagligt som outreach koordinator på Syddansk Universitet i Odense.

Majken har stor erfaring med videnskabsformidling indenfor astronomi og fysik, bl.a. som foredragsholder i *Kosmosklubben* og *Københavns Astronomiske Forening* (KAF), skribent for *Illustreret Videnskab* og dommer i science-konkurrencen *Unge Forskere*.

Det er med glæde og stolthed, at foreningen vil præsentere Majken for medlemmerne ved bl.a. efterårets foredragsserier i København og Aarhus.



Af Christine Pepke Pedersen, KVANT

Er lysets hastighed konstant?

KOSMOLOGI. En grundlæggende antagelse i Einsteins relativitetsteori er, at lysets hastighed i vakuum er konstant og for øvrigt altid har været det. Forskerne João Magueijo fra Imperial College i London og Niayesh Afshordi fra Perimeter Institute i Canada har dog siden 1990'erne forsket i en teori der siger, at lysets hastighed i begyndelsen af Universets dannelse, lige efter Big Bang for 13,8 milliarder år siden, var større end den er nu. De har nu opstillet en ide til, hvordan teorien kan testes.



Forskerne undrer sig over, at der i sekunderne efter Big Bang må have været en måde, hvorpå fotoner blev spredt rundt i hele Universet, sådan at energien blev udjævnet, og Universet idag har opnået en ensartet temperatur på 2,7 kelvin. Med en lyshastighed på 299.792.458 m/s kunne fotonerne ikke have nået ud i hele Universet.

Det er indtil nu blevet forklaret med inflationsteorien. Inflationen er den periode lige efter Big Bang hvor Universet udvidede sig ekstremt hurtigt, men hvor energien lige nåede at blive udjævnet i Universet mens det endnu var lille.

Problemet med inflationsteorien er bare, at der ikke er noget bevis for den, og at det er svært at forklare hvorfor inflationen opstod. Magueijo og Afshordis teori siger, at lysets hastighed er variabel, og at fotonerne lige efter Big Bang bevægede sig med en hastighed meget større end c , og meget hurtigere end tyngdekraften, og derfor nåede de at blive jævnt fordelt i hele Universet. Lyshastigheden er siden faldet, mens Universets densitet ændrede sig. De to forskere leder efter fluktuationer i mikrobølgebaggrundsstrålingen, der fortæller om tiden lige efter Big Bang.

Hvis det viser sig, at lysets hastighed ikke er konstant, kan vi nok forvente en ændring af Einsteins relativitetsteori, hvilket må siges at være spændende.

Kilde: N. Afshordi et al.: Critical geometry of a thermal big bang, *Phys. Rev. D* vol. **D94**, 101301(R) 2016. DOI: 10.1103/PhysRevD.94.101301.

Metallisk brint dannet for første gang

MATERIALEFYSIK. Forskerne Thomas D. Cabot, Isaac Silvera og Ranga Dias fra Harvard University har for første gang på Jorden skabt metallisk brint. Brint eller hydrogen står egentlig i gruppen med alkaliemetallerne i periodesystemet, men det opfører sig som bekendt anderledes, da hydrogen foretrækker at danne molekyler som gassen H_2 . Men når man presser hydrogen sammen ved ekstremt højt tryk, brydes molekylebindingerne, og hydrogen atomerne danner en krystalstruktur der er et metal, og som kan lede strøm. Faktisk forudsiger teorien, at metallisk hydrogen både kan blive en superleder ved stuetemperatur og en supervæske, dvs. en væske som flyder uden modstand. Forskerne dannede metallisk hydrogen med en diamantambolt, der består af to diamanter som kan presse et materiale sammen under ekstremt højt tryk. Ved et tryk på 495 GPa (større end trykket i Jordens kerne), fik de dannet metallisk hydrogen.

Hvis det viser sig at metallisk hydrogen ligesom diamanter er stabilt når man fjerner trykket, har dette superledende og

superflydende materiale virkelig mange anvendelser, fx vil metallisk hydrogen, være et utrolig effektivt raketbrændstof, da det frigiver enormt meget energi, når det vender tilbage til gasform. Nogle forskere taler endda om, at bruge metallisk hydrogen til at bygge hele byer som flyder på havet.

Forsøget er siden blevet betvivlet. Det metalliske brint forsvandt ved et uheld, da man forsøgte at måle trykket med en laser, som desværre pulveriserede den ene diamanter i diamanambolten, så det enorme tryk ophørte.



Dannelsen af metallisk brint. Til venstre ses transparent hydrogen ved 200 GPa, som i midten er blevet til sort hydrogen og til sidst ved 495 GPa er blevet til metallisk hydrogen, hvilket ses af den reflekterende overflade.

Kilde: R.P. Dias, I.F. Silvera: Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen, *Science* 26/1-2017. *Independent* 22/2-2017, www.independent.co.uk/news/science/metallik-hydrogen-disappears-technology-revolutions-superconductor-faster-computers-super-efficient-a7593481.html

Ny metode finder vand på exoplanet

PLANETFYSIK. På exoplaneten 51 Pegasi b er der med en ny metode opdaget vand i planetens atmosfære. Opdagelsen er gjort af Jayne Birkbys team fra Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Exoplaneten 51 Pegasi b befinder sig 51 lysår væk fra Jorden og er den første exoplanet, der blev opdaget, som kredser om en sol lignende stjerne, dvs. en stjerne der minder om vores sol. Exoplaneten som er en gasplanet, en såkaldt "hot Jupiter", kredser meget tæt på sin stjerne (et år på planeten er kun 4,2 dage), hvilket gør at vandet formentlig er i gasform. Der er fundet vand på exoplaneter før, men det vigtige ved denne opdagelse er, at den er gjort ved en ny metode.



Normalt observeres exoplaneter med transitmetoden, hvor man ser på lyset fra stjernen, når planeten bevæger sig ind foran. Lysets intensitet og frekvens giver information om sammensætningen af planetens atmosfære. Problemet med denne metode er bare, at kun få exoplaneter har baneplanet orienteret, så det ses fra kanten fra Jorden. Birkby og hans team så i stedet på 51 Pegasi b og dens stjerne side om side. Teamet observerede planetens bane med et teleskop i Chile (Very Large Telescope) i fire timer og kunne se frekvensskiftet i lyset, pga. Doppler-effekten, mens planeten bevægede sig mod (blåforskydning) og væk (rødforskydning) fra Jorden. Ved at analysere spektret kunne forskerne skelne planetens atmosfære fra stjernens atmosfære og fra Jordens atmosfære. Derved kunne de finde ud af, hvad planetens atmosfære bestod af. Her var en klar måling af vand. At der er vand på en exoplanet, er vigtigt for dannelsen af liv, og at den nye metode har vist, at man kan finde vand, gør at den kan bruges til at lede efter vand på andre ikke-transit exoplaneter.

Kilde: J.L. Birkby et al.: Discovery of water at high spectral resolution in the atmosphere of 51 Peg b, *Astronomical Journal* 2017 (accepteret).

Exoplaneter – det næste skridt: Hvordan ser atmosfærerne ud?

Af Uffe Gråe Jørgensen, Niels Bohr Institutet, Lars A. Buchhave, Niels Bohr Institutet og Tais W. Dahl, Statens Naturhistoriske Museum

Indenfor de næste få år vil menneskeheden få svar på et af årtusinders store spørgsmål: Bor der nogen på de nærmeste jordlignende exoplaneter? – vejen til at forstå hvem eller hvad der findes derude går gennem avancerede observationer af exoplanet-atmosfærer og nøjagtige numeriske modeller af, hvordan de observerede spektre skal forstås, men svaret er vidtrækkende: Enten bor der nogen eller også gør der det ikke!

Det vrimler med planeter

Mere end 50 års ihærdigt pionerarbejde har løftet vores viden om exoplaneter fra fantasi til virkelighed. Fra spekulationer om hvorvidt de overhovedet findes, til viden om at der er flere planeter i Mælkevejen end der er stjerner. Et kvalificeret gæt kunne i dag være at der er omkring 500 milliarder planeter indenfor de nærmeste 50.000 lysår. Ti milliarder af dem er både af nogenlunde samme størrelse som Jorden og modtager nogenlunde den samme mængde varme fra deres stjerne som vi får fra Solen – det er dem vi kalder jordlignende exoplaneter i den beboelige zone.

En håndfuld af de jordlignende planeter vi har målt på, ser så besnærende jordlignende ud at man kunne fristes til at ønske sig at flytte derud. Men i realiteten kender vi endnu intet andet end massen og størrelsen af de mange exoplaneter der er opdaget. For nogle tusinde exoplaneter kender man deres baner. For de fleste af dem kender vi også deres størrelse (ud fra formørkelsesmetoden der viser, hvor meget stjernelys de skygger for under deres kredsløb). For nogle hundrede exoplaneter kender vi deres masse (fra radialhastighedsmetoden der viser hvor meget de hiver i den stjerne de kredser om). I nær fremtid vil vi få oplysninger om massen af nogle tusinde exoplaneter mere (fra astrometrimetoden der viser hvor meget stjernen trækkes fra side til side på himlen under planetens kredsløb).

Det er stort set alt vi ved, og egentlig ville vi jo gerne vide om vi er "alene i Universet", om de jordlignende exoplaneter virkelig ligner Jorden, om vores eget solsystem, er specielt eller ligner alle de andre planetsystemer i Mælkevejen, om exoplaneterne er dannet under samme forhold som vores eget solsystem, om der skete noget specielt i vores eget solsystem som var årsagen til at vi er her, og hvad det i så fald var. Hvordan kommer vi videre i den retning ud fra det vi ved i dag?

Søgen efter tegn på liv

Det næste realistiske skridt er at optage spektre af de nærmeste, største og varmeste exoplaneter. Når vi har øvet os på det og er blevet sikre på, at vi gør det rigtigt, vil vi også gerne kunne optage spektre af de nærmeste jordlignende planeter i deres habitable zone. Det afstandsinterval fra en stjerne hvor der ikke er for varmt ved en planets overflade til at eventuelt vand vil dampe af (som på Venus) og ikke så koldt at vand vil fryse til is (som på Mars) kaldes den *habitable*, eller beboelige, zone. Her er i alle fald én vigtig betingelse for at vi kunne bo der opfyldt, nemlig at vand i princippet kan

eksistere på flydende form – hvis der er vand. Det er naturligvis langt fra tilstrækkeligt til at sige om planeten er beboelig, og selvfølgelig slet ikke nok til at afgøre om den er beboet. Men når vi engang kan tage spektre af jordlignende exoplaneter i den beboelige zone, vil vi kunne sige om der bor nogle. Det er fuldt realistisk at forestille sig, at man når dertil i løbet af mindre end ti år, og så vil vi for første gang nogen sinde kunne sige, om der er levende organismer på planeter omkring andre stjerner. For første gang i menneskehedens historie vil spørgsmålet om, hvorvidt vi er alene i Universet overskride grænsen fra spekulation til videnskab.

Det er allerede nogle år siden, at de første exoplanetspektre blev optaget med Hubble Rumteleskopet. Set i bakspejlet må man nok indrømme, at de første spektre kun viste at der sandsynligvis *var* et spektrum. Siden da har teknikken været gennem en rivende udvikling. I dag kan vi se klare signaler af både vanddamp, skyer, og forskellige atomare linjer i spektret af exoplaneter optaget med rumteleskoperne Hubble og Spitzer, og vi kan også måle hvor stor temperaturforskelle, der er på planeternes dag- og natside.

Modeller af planetatmosfærer

For at kunne sige mere end blot at visse stoffer eksisterer i planeternes atmosfære, må vi udvikle veltestede numeriske modeller, ligesom man gør det for at kunne sige noget om Jordens klima og om stjernernes struktur og udvikling. Kun med en robust og selv-konsistent modellering af planeternes atmosfærer vil vi ud fra spektrene være i stand til at sige, fx hvor meget vand og ilt der er i atmosfæren, om det er ved overfladen af planeten eller i toppen af atmosfæren, hvordan temperaturen ændrer sig igennem atmosfæren, hvordan klimaet ændrer sig fra sommer til vinter, osv. Forskellige forskningsgrupper afprøver i dag forskellige metoder. Én vej ville være at tage fungerende modeller for Jupiters atmosfære og modificere modellerne til de giver et spektrum, der ligner nogle af exoplanetspektrene. Modellerne har kun været delvis succesfulde til at forklare, hvordan Jupiter selv er opbygget, så de vil kræve nogle modifikationer. Det vil uden tvivl føje ny viden til forståelsen af planeterne i vores eget solsystem at kunne udfordre modellerne, ved at konfrontere dem med observerede spektre af mange forskellige Jupiter-lignende exoplaneter under en myriade af forskellige fysiske og kemiske forhold.

En anden vej vil være at tage udgangspunkt i Jordens klimamodeller. De eksisterende modeller (både dem til

forudsigelse af vejret på kort sigt og klimaet på lang sigt) er begrænset til at beregne strukturen for en atmosfære, der ligner Jordens nuværende atmosfære ganske meget. De har den fordel, at de beskriver Jordens dynamiske vejrsystemer vældig godt, men de skal modificeres voldsomt på mange punkter for at kunne anvendes på jordlignende exoplaneter i den habitable zone, selv for planeter der kun afviger blot en lille smule fra Jorden selv. Som en variant af den metode kunne man bygge en numerisk kode op efter de samme principper som klimamodellerne, men undlade de forudsætninger der knytter dem specifikt til den nuværende Jord. Det ville samtidig have den fordel, at det formentlig ville give os værdifuld ny viden om betydningen af de antagelser der normalt gøres i forudsigelsen af Jordens fremtidige klima, og dermed som en sidegevinst måske bidrage til bedre klimamodeller.

Endelig kunne man tage udgangspunkt i eksisterende stjerneatmosfæremodeller og modificere dem til de koldere temperaturer, der oftest findes i planetatmosfærer. Det har den fordel at modellerne er vel testede for mange forskellige parametervalg. De koldeste

stjerner er næsten identiske med varme Jupiterlignende exoplaneter, men når man går til lidt koldere exoplaneter, mangler stjernemodellerne de mange dynamiske effekter som spiller en rolle for planeterne i vores eget solsystem, inklusive Jorden. Vores gruppe på Niels Bohr Institutet og Statens Naturhistoriske Museum eksperimenterer med flere af ovenstående metoder og forskellige hybrider af dem, og deltager i nogle af de mest omfattende observationelle projekter til optagelse af den næste generation af exoplanetspektre.

Fjerne planeter og kæmpekikkerter

Planeterne er små fnug i forhold til stjerner, og de lyser kun ved at reflektere det stjerne- (eller sol-) lys der rammer dem. Jorden skinner ca. 10 milliarder gange svagere end Solen. Hvis vi stod på en exoplanet 10 lysår ude i rummet og kiggede ned på solsystemet, ville alle planeternes lys drukne i det meget stærkere lys fra Solen. Set gennem Jordens atmosfære "blinker" stjernerne lidt, fordi deres lys hele tiden flytter sig pga lufturoen, og planeterne ville forsvinde totalt i denne blinken.

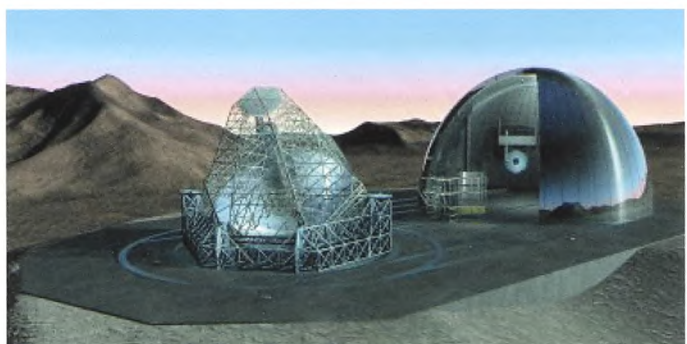


$$\Theta = \frac{\lambda}{D} \cdot 2,5 \cdot 10^5 \text{ buesekunder}$$

Θ = opløsningen i buesekunder

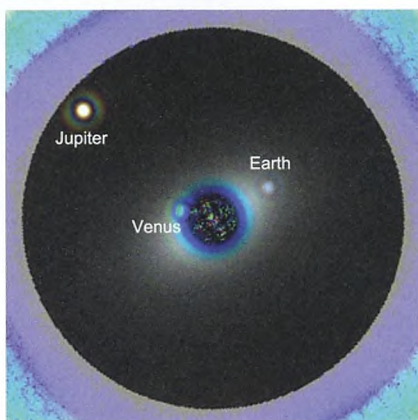
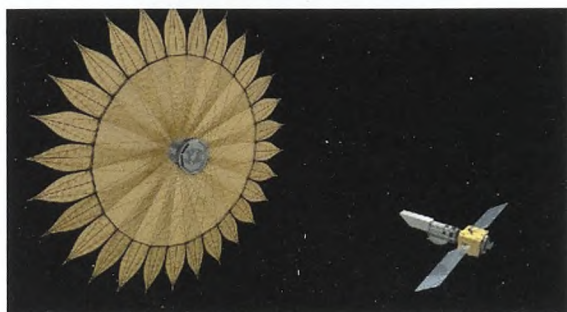
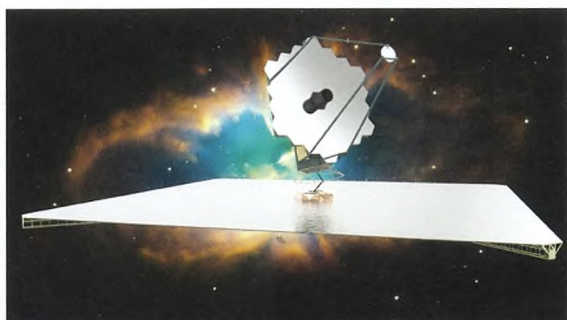
λ = bølgelængden af lyset (i m)

D = diameteren af teleskopets spejl (i m)



Figur 1. Diffraktionsgrænsen, Θ , er den teoretisk set bedste opløsning man kan få i et billede taget gennem en kikkert med en given størrelse spejl, D , ved bølgelængden λ . Hvis spejlets diameter fx var 100 m (en kikkert kaldet "OWL", som ESO drømte om at bygge for nogle år siden men senere opgav) ville man kunne skelne to stjerner kun 0,0025 buesekunder fra hinanden. Det svarer til afstanden mellem Jorden og Solen set på en afstand af 60 lysår. Med et 40 m-spejl kan man i stedet skelne objekter, der er så langt fra hinanden som Jorden og Solen ud til 25 lysårs afstand, og med et 20 m-spejl ud til 10 lysårs afstand. Ved at lave kunstige stjerneformørkelser eller andre forbedringer inden i kikkerten, kan man forbedre observationerne. Nederst t.h.: "Overwhelmingly Large Telescope" (OWL). Grafik: ESO.

Men selv hvis der ingen atmosfære var, ville stjernens lys ikke være en uendelig lille prik, og prikkens størrelse ville afhænge af den kikkert man observerede med. Lyset fra stjernen ville fordele sig over detektoren som en normalfordeling med en halvværdibredde, der er omvendt proportional med diameteren af spejlet i den kikkert vi ser igennem (se figur 1). Det er stjernens diffraktionsgrænse vi ser – et velkendt fænomen fra optikken der afspejler lysets bølgenatur. Jo større kikkert, jo mindre og skarpere prikker. Derfor kan vi få skarpere billeder alene ved at bruge en større kikkert. For at få lyset fra en sol lignende stjerne på 10 lysårs afstand til at tegne sig som en så skarp prik, at man vil kunne se en 10 milliarder gange svagere prik, der hvor en jordlignende exoplanet i en jordlignende bane burde være, skal kikkertens spejl være omtrent 40 meter i diameter eller større. Det er derfor verdens største kikkert, *European Extremely Large Telescope* (E-ELT), som vil stå færdig i Chile i 2024, er projekteret til at have et spejl på næsten 40 meter.



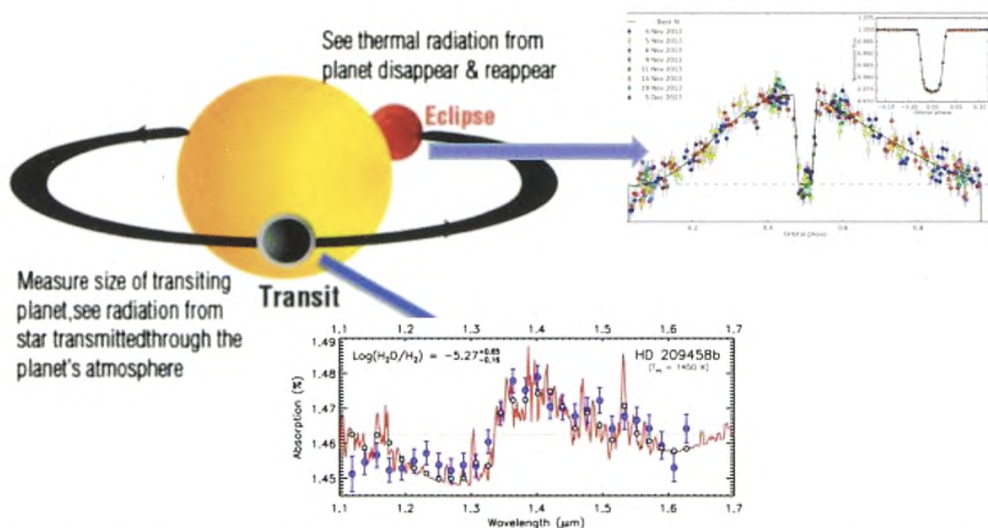
Figur 2. Øverste to figurer: Et af de mange rumprojekter som måske kommer til at se dagens lys inden for en årrække er LUVOIR (Large UV, Optical and InfraRed survey), her i to versioner. Det er en rumkikkert med et spejl på mellem 8 og 16 meter, med en kunstig formørkelsesmekanisme inden i kikkerten (en koronagraf) og udenfor kikkerten (en fritflyvende “stjerne-skygger” eller “kunstig måne”). Nederst: Simulering af observation af vores solsystem set fra 45 lysårs afstand. Grafik: NASA og L. Pueyo, M. N’Diaye (STScI).

Længere ude i fremtiden vil vi formentlig se kæmpekikkerter ikke bare på Jorden men også i rummet. Det har den fordel, at man effektivt vil kunne lave en kunstig stjerneformørkelse inde i kikkerten, ligesom når Månen skygger for sollyset og skaber en solformørkelse. Ved at skærme for stjernens lys vha. en kunstig måne foran kikkerten kan man pludselig se det svage lys fra jordlignende planeter i kredsløb om stjernen, ligesom man ser stjerner på himlen nær ved Solen under en total solformørkelse. To af de fire rumprojekter på tegnebrættet i det amerikanske “decadal survey” er dedikerede exoplanet-kikkerter. Med et spejl på mellem 8 og 16 meter og en kunstig måne både inde i kikkerten og flyvende foran kikkerten vil LUVOIR- og HabEx-projekterne (se figur 2) kunne producere uhørt detaljerede spektre af et stort antal jordlignende exoplaneter på endnu større afstande fra os end selv E-ELT-kikkerten nogen sinde vil kunne opnå. Samtidig vil placeringen i rummet sikre at man kan studere både det ultraviolette, det synlige og det infrarøde lys fra planeterne. Og allerede inden da vil vi formentlig møde en gruppe af nye specialiserede exoplanet-satellitter, der vil øge vores viden om de fysiske forhold på planeter, hvor levende organismer potentielt kan findes, inklusiv det Google-inspirerede TESS-projekt til opsendelse i 2018, og det endnu mere ambitiøse Europæiske PLATO-projekt til opsendelse i 2024, der vil skanne himlens én million klareste stjerner for formørkende exoplaneter, ligesom Kepler-satellitten gjorde det fra 2009 til 2013 for stjerner i et lille felt af himlen i stjernebilledet Svanen.

Med E-ELT vil vi komme til at optage de første billeder og direkte spektre af jordlignende planeter kredsende om de nærmeste sol lignende stjerner. Sådanne spektre vil vise, om der er liv på planeterne, men mere om det nedenfor. Allerede længe inden da vil vi komme til at se spektre af større planeter på små afstande fra deres stjerne. Det er detaljer i transitfænomenet som på fascinerende måde tillader at optage et spektrum af planetens atmosfære, selv uden vi kan se planeten.

Planetatmosfæren kan ses ved formørkelser

Når vi ser en planet gå hen foran en stjerne, vil den formørke stjernens lys en smule. Vi kender fænomenet fra Venuspassager og Merkurpassager i vores eget solsystem. Vi kan se de to planeter vandre hen over solskiven som sorte prikker. Merkur er en atmosfæreløs stenørken. Den vil derfor aftegne sig som en skarp sort skive ovenpå den lyse sol. Venus derimod, har en tyk atmosfære som vil tillade en lille smule af sollyset at passere. Under passagen vil Venus derfor ikke ses som en lige så skarp skive som Merkur, men se lidt “ulden” ud i kanten. For de bølgelængder som har let ved at gå gennem Venusatmosfæren, vil vi næsten ikke se atmosfæren. For de bølgelængder hvor Venus har en stærk absorption, vil atmosfæren skygge meget for sollyset. Det vil derfor se ud, som om Venus er en smule større når vi observerer bølgelængder der absorberes kraftigt i Venusatmosfæren end når vi observerer bølgelængder, der går mere uhindret igennem atmosfæren.



Figur 3. Ved omhyggeligt at måle spektret eller lysintensiteten af stjernen når exoplaneten er foran stjernen, ved siden af stjernen, og bagved stjernen, kan man indirekte få et spektrum af exoplaneten. Man kan også sige noget om forskellen i lyset fra exoplanetens dag- og natside. Fra [1] (modificeret).

Ved at måle Venus' diameter som funktion af den bølgelængde lys vi observerer, mens den passerer hen over solskiven, får vi derfor i realiteten et lavopløsnings-spektrum af Venus. I Venus' tilfælde kan vi jo også se den som en klar "stjerne" på nattehimmelen, og de bedste spektre af Venus får man derfor simpelthen ved at kigge på den når Solens stærke dagslys er væk.

Men for exoplaneter, hvor vi ikke kan opløse billedet af planeten fra billedet af stjernen, kan vi alligevel få et spektrum af planeten ved at måle, hvor meget lys den tager væk fra stjernen under en transit som funktion af bølgelængden (se figur 3). På den måde kan man sige, at man på fascinerende vis optager et brugbart spektrum af planetens atmosfære uden nogen sinde at have set planeten selv.

Planetatmosfæren trukket ud af stjernens lys

Et endnu bedre spektrum af planeten, kan i nogle tilfælde fås ved at optage et samlet spektrum af stjernen og planeten når planeten er henholdsvis *foran* stjernen, når den er *på siden* af stjernen, og når planeten er væk *bagved* stjernen. Ved at trække spektre af stjernen med og uden bidrag fra planetens lys fra hinanden kan man i princippet få et spektrum af planeten alene – igen uden nogen sinde at have set planeten. Selvfølgelig kræver det ultra nøjagtige målinger og det kan kun gøres hvis stjernen er ekstremt "rolig". Hvis stjernen fx har solpletter eller anden "magnetisk uro", vil det totalt ødelægge målingerne. Spektre af stjernen henholdsvis med og uden pletter vil adskille sig mere fra hinanden end spektre med og uden planeten, og for "urolige stjerner" kan man derfor ikke vide, om det er et spektrum af solpletten eller planeten man opnår ved metoden. Men hvis stjernen er rolig nok og målingerne nøjagtige nok, kan vi til gengæld opnå information om både planetens forside og bagside ved at trække de rigtige sæt af målinger fra hinanden. På den måde har man for eksempel lært, at nogle af de varme Jupiterlignende planeter i små baner har nogenlunde samme temperatur på dagsiden og natsiden. Det er ganske bemærkelsesværdigt, fordi de formentlig har

bunden rotation – dvs. altid vender den samme side ind mod stjernen og altid den samme side væk fra stjernen. Hvis de så alligevel har den samme temperatur på den ene og den anden side af planeten, må det betyde, at de har tykke atmosfærer og voldsomme jetstrømme i den øvre del af atmosfæren som meget effektivt og hurtigt bringer varmen fra dagsiden om på natsiden. På den måde har vi lært noget om vejret på exoplaneten, stadig uden overhovedet at have set planeten.

Men endnu er der kun tale om Jupiterlignende gasplaneter. Det er dem man indtil nu har kunnet optage spektre af med Hubble Rumteleskopet og eksisterende store kikkerter på Jorden.

Formørkelsesspektre med James Webb

Til marts næste år (2018) forventes det nye og større rumteleskop, *James Webb Space Telescope* (JWST), opsendt. James Webb Rumteleskopet kommer til at observere infrarødt lys, hvor forholdet mellem exoplaneternes og stjernernes lys er lidt mere gunstigt end ved synligt lys. Samtidig har JWST en spejldiameter på 6,5 meter – mere end to og en halv gange Hubble Rumteleskopets. JWST vil komme til at optage de første transit-spektre af "super-Jorde", planeter med størrelse imellem Neptun og Jordens størrelse. Neptunlignende planeter i små baner er en type planeter som er meget almindelige omkring andre stjerner men slet ikke findes i vores eget solsystem. Det er i øjeblikket ikke klart om alle Neptun-størrelse exoplaneterne er egentlig Neptunlignende – altså gasplaneter som Jupiter, blot mindre og med en stor iskerne – eller om nogle af dem er forvoksede jordkloder – altså faste klippeplaneter med en enorm masse i forhold til Jordens. Spektre fra JWST vil hjælpe os til at forstå, hvad det er for en slags planeter vi "mangler" i vores eget solsystem.

Men selv med James Webb Rumteleskopet er det kun indirekte transit-spektre vi kan optage. JWST er for lille, til direkte at kunne adskille lyset fra stjernerne og de planeter der kredser om dem. Hertil skal vi have større teleskoper.

Ekstremt store teleskoper på Jorden

Den næste klasse af teleskoper på Jorden er allerede godt på vej med hele tre ekstremt store teleskoper, "extremely large telescopes" eller ELT'er, under konstruktion. De to amerikanske ELT-teleskoper kommer til at have spejldiametre på henholdsvis 24 og 30 meter, mens den kæmpemæssige fælleseuropæiske E-ELT-kikkert kommer til at have et spejl på knap 40 meter i diameter. Det tredje sekundærspejl i lysets gang gennem E-ELT-kikkerten er nærmest en slags kulstof membran der, baseret på laser-beams skudt op i jordens øvre atmosfærelag, justerer sin form 100 gange i sekundet for at kompensere for jordatmosfærens lufturo. Herved får man lige så skarpe billeder, som hvis man havde et 40 meter teleskop i kredsløb om Jorden, og bliver dermed i stand til at nå diffraktionsgrænsen for et 40 meter spejl (se figur 1). Sammenholdt med den enorme lysfølsomhed ved at have så stort et spejl, betyder det, at man direkte vil kunne tage højopløsningspektre af høj kvalitet af jordlignende exoplaneter i jordlignende baner omkring de nærmeste sollignende stjerner.

Bor der nogen på dem?

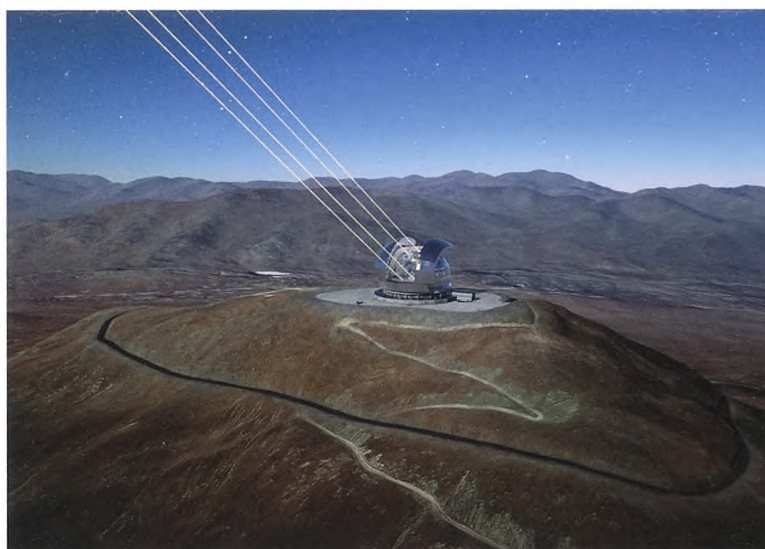
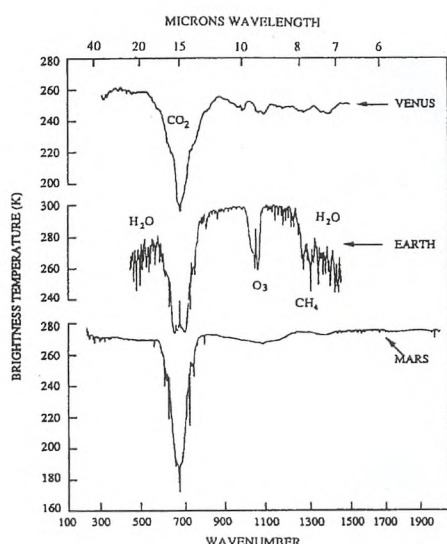
Når E-ELT-teleskopet står klart i midten af 2020'erne, vil vi kunne se, om atmosfæren af de nærmeste jordlignende exoplaneter i deres habitable zone er i kemisk ligevægt eller i "biologisk ligevægt". En plante på Jorden vil udskille ilt, et dyr CO_2 , nogle bakterier vil udskille methan, og Jordens atmosfære vil også indeholde vand, som er essentielt for livet på Jorden. De fire gasser er ude af kemisk ligevægt med hinanden, og alle gasserne vil kunne ses i spektret af Jordens atmosfære. Derfor kalder vi dem *biomarkører*. Hvis vi så noget lignende på en jordlignende exoplanet ville vi tage det som en klar indikation af biologisk aktivitet. Hvis vi, når E-ELT'en står færdig, er klar med instrumenteringen, observationsteknikken og modelleringen

ved at have øvet os på de simple HST- og JWST-spektre, vil vi vha. biomarkører kunne afsløre hvilken type beboere – hvis der er nogen – som findes på de jordlignende exoplaneter i kredsløb om de nærmeste sollignende stjerner i rummet.

Jorden set fra afstand med E-ELT

Hvis nogen havde stået med et E-ELT-teleskop på en planet 10 lysår herfra for 4 milliarder år siden og kigget på Jorden, ville de formentlig havde set en Jordklode med en atmosfære bestående udelukkende af CO_2 (måske ville der også have været kvælstof som i dag, men det ville man ikke umiddelbart kunne se). Sådan ser Venus og Mars' atmosfærer ud den dag i dag (se figur 4). Her er atmosfærerne i kemisk ligevægt med sig selv og planetoverfladen.

På Jorden vil udåndingen fra de første levende organismer snart have pustet gasser ud i atmosfæren der ikke var her før. Vi ved ikke hvad det har været for gasser, men de første organismer på Jorden var anaerobe og havde måske det samme stofskifte som nutidens metanproducerende bakterier. I så fald ville en tålmodig observatør 10 lysår herfra med et E-ELT-teleskop til rådighed, have kunnet se spektrallinjerne for metan i Jordens spektrum blive stærkere og stærkere efterhånden som årmillionerne passerede. De ville kunne gætte sig til at livet tog fodfæste på Jorden. Efter de første par milliarder år ville de se, at der begyndte at være ilt i atmosfæren. De ville konkludere, at fotosyntesen var i fuld gang på Jorden (se figur 5), og de ville kunne gætte på, at livet på Jorden havde en chance for at udvikle komplekse og måske intelligente væsener indenfor en overskuelig fremtid. Med ilt i atmosfæren åbnede der sig mulighed for den mere effektive metabolisme, der på Jorden var forudsætningen for udviklingen frem mod mere komplekse organismer. Vores tænkte observatør ville have kunnet gætte på, at komplekse livsformer var ved at finde fodfæste på Jorden.



Figur 4. En tegners opfattelse af hvordan E-ELT-teleskopet vil komme til at tage sig ud når det sender lasersignaler mod Jordens øvre atmosfære for at finjustere sine spejle natten igennem. (Tegning: ESO). Med sit næsten 40 m store spejl vil det kunne optage spektre af Jord- Venus- og Mars-lignende planeter omkring de nærmeste sollignende stjerner. Hvis nogen stod med et E-ELT-teleskop 10 lysår ude i rummet og kiggede på Solsystemet, ville de se kuldioxid, metan, ilt, og vand i spektret af Jordens atmosfære, og konkludere at her er der liv på planetens overflade.



Figur 5. Nulevende stromatolitter (øverst) og 2,6 milliarder år gamle stromatolitfossiler (nederst). Stromatolitter ("mikrobemåtter") er sedimentter fra kolonier af cyanobakterier, der producerede den første ilt på Jorden for 3,5 eller flere milliarder år siden. Med tiden ændrede de Jordens atmosfære så drastisk, at man ville kunne have set det med et E-ELT-teleskop på lysårs afstand. Det forøgede iltindhold som cyanobakterierne skabte, muliggjorde udviklingen af mere komplekse biologiske celler på Jorden – det vi forbinder med højere livsformer. Fotos: Marvin Del Cid og T.W. Dahl.

Samtidig ville de med deres E-ELT-kikkert måske have set, at Venus og Mars blev ved med at have den samme atmosfæresammensætning som de havde fra starten. Her opstod der aldrig levende organismer til at bringe atmosfæren ud af kemisk ligevægt – der kom ingen biomarkører i atmosfæren. Måske vil de på Mars have set biomarkørerne træde frem i en kort periode for mellem 4 og 3,5 milliarder år siden, vi ved det ikke. På Venus ville de have set, at der i en kort periode kom kraftige spektrallinjer fra vand i atmosfæren, hvorefter signaturen for vand forsvandt totalt mens mængden af CO₂ steg til uanede højder. Her var verdensocenerne dampet af og planeten løbet løbsk i en spiralerende drivhusopvarmning. På Mars ville de også have set vandlinjerne vokse op for herefter at forsvinde sammen med alle de andre spor af en atmosfære, og de ville måske konkludere, at Mars kølede for hurtigt af til at bibeholde sit magnetfelt og skærme for, at solvinden kunne blæse atmosfæren ud i det interplanetare tomrum. De ville måske undre sig over at livet aldrig opstod på Mars og Venus, eller konkludere, at det af ukendt årsag måtte være døet ud igen, kort tid efter det opstod.

Men de ville vide, at livet på Jorden havde udviklet sig til et robust og komplekst niveau, hvor ilt- og CO₂-producerende organismer i store mængder lever i en nogenlunde økologisk balance med hinanden, med et islet af metanproducerende organismer blandt sig, og at det er baseret på vand. Måske ville de mene, at eksistensen af ilt i atmosfæren havde en god mulighed for at underbygge udviklingen af intelligente væsener, og sende et radiosignal herved for at høre, om vi var kommet så langt at vi kunne kommunikere med radio, og havde oplevet noget vi havde lyst til at fortælle dem om.

Er der liv?

Vi vil formodentlig stå i den samme situation i de kommende år når de første instrumenter vil afsløre om de nærmeste jordlignende exoplaneter i deres habitable zoner har en atmosfære i eller ude af kemisk ligevægt – altså er med eller uden biomarkører i deres spektre. Eller også vil vi opdage, at alle exoplaneter, så langt E-ELTs følsomhed rækker, er i kemisk ligevægt, og vi vil måske kigge på hinanden og undre os over, at der er så få af os i det kæmpemæssige univers der omgiver os.

Litteratur

- [1] Laura Drake Deming & Sara Seager (2016), Illusion and Reality in the Atmospheres of Exoplanets, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1701/1701.00493.pdf>
- [2] Nikku Madhusudhan et al. (2016), Exoplanetary Atmospheres – Chemistry, Formation Conditions, and Habitability, *Space Science Reviews* **205**, p. 285-348, (arXiv:1604.06092).

Uffe Gråe Jørgensen er lektor i astrofysik ved Niels Bohr Institutet, hvor han arbejder med observationer af exoplaneter og numeriske modeller for stjerne- og exoplanet-atmosfærer. Han er medstifter af grundforskningscenteret for Stjerne- og Planetdannelse, og leder sektionen for Astrofysik og Planetforskning ved Københavns Universitet. Som Danmarks videnskabelige medlem af ESOs bestyrelse har han været ansvarlig for, at Danmark kom med i E-ELT-projektet.



Lars A. Buchhave er lektor i astrofysik ved Niels Bohr Institutet, hvor han arbejder med opdagelse og karakterisering af exoplaneter, med fokus på massebestemmelser og atmosfæreobservationer. Han har været tæt involveret i Kepler-missionen og er tæt engageret i NASAs TESS-mission som opsendes senere i år, og er international repræsentant i NASAs studiegruppe om kæmperumteleskopet LUVOIR.



Tais W. Dahl er adjunkt ved Statens Naturhistoriske Museum og Carlsberg Distinguished Associate Professor. Han arbejder med geokemiske analyser af ældgamle havbundssedimenter samt modellering af Jordens biogeokemiske kredsløb igennem Jordens historie for at forstå, i hvor høj grad miljøet har påvirket livets udvikling og omvendt. Han er leder af Geobiologilaboratoriet på Københavns Universitet.



Regneopgaver om *Meteoritter og Solsystemet*

Af Henning Haack, Michael Cramer Andersen og Svend E. Rugb

De følgende regneopgaver skal ses i tilknytning til artiklerne i dette temanummer af KVANT om *Meteoritter og Solsystemet*. Opgaverne er tiltænkt gymnasiets fysikundervisning (C til A-niveau). Håbet er, at elever, ved at arbejde mere i dybden med udvalgte emner, får lyst til at vide mere.

Ejby-meteoritten

I artiklen om meteoritter og Solsystemet andetsteds i dette temanummer beskrives bl.a. faldet af Ejby-meteoritten i København i februar 2016. En af de ting der gør Ejby rigtig interessant er, at det lykkedes at bestemme hastigheden og banen ned gennem atmosfæren – og dermed også banen om Solen (se figur 1 på side 5 i bladet) inden den ramte Jorden.

I den første opgave skal du bestemme meteoridens hastighed, da den passerede gennem den øvre del af atmosfæren.

Opgave 1: Ejby-meteorittens hastighed

Ved at sammenholde en video optaget fra byen Ho, hvor ildkuglen ses fra vest, med billeder fra Tyskland og Østrig, hvor ildkuglen ses fra syd, kan man bestemme ildkuglens retning over Jorden. Analysen viser, at ildkuglen bevægede sig i nordøstlig retning, på kurs 43 grader i forhold til nord, mod det sted, hvor den blev fundet. På videoen fra Ho kan man følge ildkuglen 4,14 s på dens vej mod København.

Tabel 1 viser pejleretninger og højder for to udvalgte frames (billeder).

Figur 1 viser faldet set oppefra. Trekant ABC er dannet af de to sigteinjer fra Ho i henholdsvis frame 124 (A i figur 1) og 167 (B i figur 1) og et stykke af meteoridens bane over Jorden, som er siden c mellem punkt A og B. Siden a er bestemt til 249,0 km.

Frame	Tid	Azimuth	Altitude
124	22:07:21,32	88,45°	12,53°
167	22:07:22,66	86,89°	8,40°
Findested, hovedfragment		84,22°	0,0°

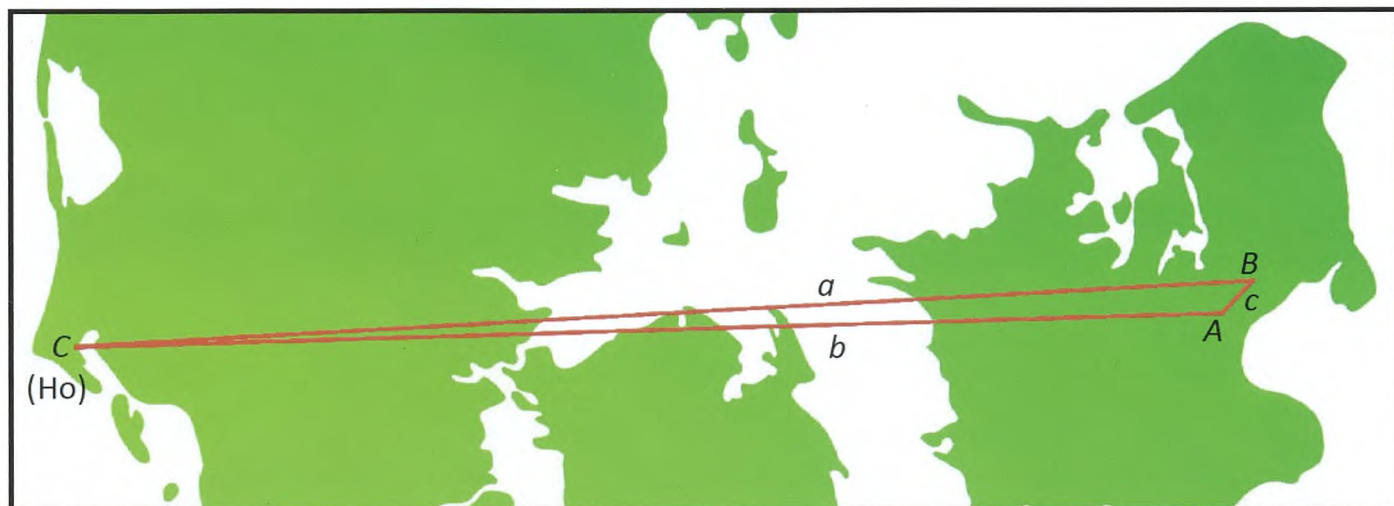
Tabel 1. Pejleretninger fra videokameraet i Ho til ildkuglen i frame 124 (punkt A) og i frame 167 (punkt B). Siden AB repræsenterer kun en del af ildkuglens lysende spor over himlen. Nedfaldsstedet i København var nordøst for punkt B i figur 1. Azimuth-vinklen er retningen med uret fra nord i det vandrette plan. Altitude er vinklen over horisonten.

a) Brug oplysningerne i tabel 1 til at beregne (vha. trigonometri), at den vandrette afstand som meteoriden bevægede sig fra A til B (længden af siden c på figur 1) er 9,48 km.

b) Beregn meteoridens højde over Jorden i hhv. frame 124 og 167, vha. altituderne i tabel 1 samt a og b .

c) Vis at meteoriden bevægede sig ca. 19,4 km gennem atmosfæren på de 1,34 sekunder der går mellem optagelsen af de to frames i position A og B.

d) Beregn Ejby-meteoridens gennemsnitshastighed mellem frame 124 og 167. Du kan se bort fra Jordens krumning og tyngdekraftens påvirkning af banen. Denne del af banen ligger så højt, at opbremsningen var minimal. Den beregnede hastighed er derfor den samme som hastigheden inden den ramte atmosfæren.



Figur 1. En del af Ejby-meteoridens bane (fra A til B) kunne bl.a. observeres fra byen Ho i Vestjylland (punkt C). Meteoritten fortsatte mod nordøst og endte med at falde i København (nordøst for punkt B). Analysen af faldet viser, at sigtelinjen fra C til B (svarende til side a i trekanten) er 249,0 km.

Opgave 2: Opsmelting i atmosfæren

Friktionen under passagen gennem den øvre atmosfære afhænger på kompliceret vis af meteoridens form og hastighed og af atmosfærens temperatur og tæthed. Et tilnærmelsesvist korrekt udtryk for friktionskraften i den øvre atmosfære er givet ved formelen:

$$F_{\text{friktion}} = k \cdot \rho_{\text{atm}} \cdot A \cdot v^2, \quad (1)$$

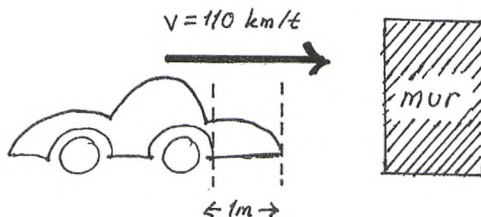
hvor $k = 0,60$ er friktionskoefficienten, $\rho_{\text{atm}} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ er atmosfærens massefylde (40 km over overfladen), A er meteoridens tværsnitsareal, og v er hastigheden. Vi gør nu følgende antagelser for at analysere meteoridens bane ned gennem atmosfæren: Det oprindelige objekt, der ramte den øvre atmosfære var en kugle med en masse på $m = 250 \text{ kg}$, en radius på $r = 26 \text{ cm}$ og en hastighed på $14,5 \text{ km/s}$.

a) Beregn meteoridens acceleration (negativ), da den ramte atmosfæren. Du kan se bort fra tyngdekraften. [Vink: Benyt Newtons 2. lov.]

Ejby-meteoritten ramte atmosfæren, med en hastighed på $14,5 \text{ km/s}$. På kun $4,14 \text{ s}$ havde mødet med atmosfæren bremset den ned til en hastighed på "kun" 300 m/s .

b) Beregn den gennemsnitlige acceleration i løbet af de $4,14 \text{ s}$.

Påstand: Ejby-meteoridens møde med den øvre atmosfære var *voldsommere end en bil der kører 110 km/t og støder frontalt ind i en betonmur!* Kan det passe?



Prøv dernæst at regne på en bils møde med en betonmur. Bilen kører oprindeligt 110 km/t . Mødet med muren får fronten på bilen til at blive 1 m kortere.

c) Beregn den gennemsnitlige acceleration i forbindelse med kollisionen, hvis bilen standser på $s = 1 \text{ m}$.

d) Hvad er forholdet mellem bilens acceleration og Ejby-meteorittens acceleration? Hvordan kan det være at bilens møde med muren er blidere end meteoridens møde med den tynde luft i den øvre atmosfære?

e) Beregn hvor lang tid det tager fra meteoriden rammer atmosfæren til dens hastighed er reduceret med 10% . Ignorer tyngdekraftens påvirkning og antag, at meteoriden bevarer sin form og masse. Vi laver yderligere – for simpelhedens skyld – den antagelse, at atmosfærens densitet holdes konstant, $\rho_{\text{atm}} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, under de 10% nedbremsning af hastigheden, selvom atmosfærens densitet i virkeligheden vil vokse voldsomt når meteoritten bevæger sig ned mod lavere højder. Denne antagelse vil føre til en overvurdering af meteorittens opbremsningstid.

[Vink: Benyt Newtons 2. lov på formen $m \frac{dv}{dt} = F_{\text{friktion}}$. Separér variablene v og t og integrer for at finde tiden. Denne opgave er på fysik A-niveau.]

f) Beregn den kinetiske energi af Ejby-meteoriden.

g) Beregn den termiske energi der kræves for at få hele meteoriden til at smelte. Meteoriden har starttemperatur $T_0 = 200 \text{ K}$, smeltepunkt $T_{\text{sm}} = 1700 \text{ K}$, specifik varmekapacitet $c_{\text{sm}} = 1200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ og smeltevarme $L_{\text{sm}} = 2,6 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$.

h) Bestem forholdet $E_{\text{kin}}/E_{\text{term}}$ og kommenter. Den del af energien, der ikke bruges til opsmeltning af meteoriden, fører til opvarmning af luften langs meteoridens bane.

Opgave 3: Hvor varm blev meteoriden på vej ned gennem atmosfæren?

Da Ejby-meteoriden ramte atmosfæren med mange gange lydets hastighed, kunne den ses som en ildkugle, fordi luften omkring den begyndte at gløde. Trods den kraftige varmepåvirkning var det kun de alleryderste lag af Ejby-meteoritten der blev varme.

Lad os antage, at Ejby-meteoriden var en perfekt kugle med en radius på 25 cm , en massefylde på $\rho_{\text{sm}} = 3300 \text{ kg/m}^3$, en varmekapacitet på $c_{\text{sm}} = 1200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, og en varmeledningsevne på $k_{\text{sm}} = 2,0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$.

Mens den opbremsedes i atmosfæren var dens overfladetemperatur konstant $T_s = 1000 \text{ K}$ på grund af friktionen med atmosfæren, og det indre af meteoritten blev derfor gradvist opvarmet. Efter at Ejby-meteoriden er faldet tiden t gennem atmosfæren, vil et overfladelag med tykkelsen x være blevet opvarmet til en temperatur, der er væsentligt højere end $T_0 = 200 \text{ K}$. Opvarmningen slettede delvist information om mineralernes alder og oprindelige egenskaber. Analyser af meteoritten skal derfor foretages på uopvarmet materiale under overfladelaget.

Tykkelsen der opvarmes kan anslås ved en dimensionsbetragtning som et potensprodukt af de termodynamiske parametre:

$$x \approx t^\alpha \rho_{\text{sm}}^\beta c_{\text{sm}}^\gamma k_{\text{sm}}^\delta \quad (2)$$

Ved at opstille fire ligninger, én for hver grundenhed (s, m, kg, K) kan de fire ubekendte koefficienter bestemmes til: $(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = (\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$.

a) Kontroller, at det forenklede udtryk for x bliver:

$$x = \sqrt{\frac{k_{\text{sm}} \cdot t}{\rho_{\text{sm}} \cdot c_{\text{sm}}}} \quad (3)$$

b) Beregn tykkelsen x efter en faldtid på 5 s , og bestem forholdet mellem x og R_M . Kommentér.

Opgave 4: Chelyabinsk

I 2013 eksploderede en usædvanligt stor meteoride over byen Chelyabinsk i Sibirien. Ildkuglen blev set af utroligt mange mennesker, der var på vej til arbejde. Mange af dem fangede ildkuglen på video og lagde optagelserne på youtube. Prøv at se nogle af videoerne! Analyser af de mange optagelser viste, at det var et

objekt på ikke mindre end 12 000 ton, der havde ramt atmosfæren med en hastighed på 18 km/s.

a) Beregn den kinetiske energi af objektet. Til sammenligning udløste Hiroshima-bomben $6,3 \cdot 10^{13}$ J. Hvor mange gange kraftigere end Hiroshima-bomben var Chelyabinsk-meteoriden?

Frigørelsen af den kinetiske energi i atmosfæren udløste en eksplosion, der knuste alle vinduer i Chelyabinsk. Der var også nogle, der fik forbrændinger pga. af den kraftige varmestråling fra ildkuglen. Der var heldigvis ingen dødsopfre. Når Hiroshima forårsagede større skader så var det fordi den var sat til at eksplodere i lav højde (580 m) over Hiroshimas centrum. Til sammenligning eksploderede Chelyabinsk i stratosfæren i over 15 kilometers højde.

Opgave 5: Nedslaget på Kridt-Tertiær grænsen

For 66 millioner år siden blev Jorden ramt af en asteroide, der ikke bare tog livet af dinosaurerne, men også udryddede 3/4 af alle arter på Jorden og bragte den sidste fjerdedel på randen af udryddelse.

Nedslaget førte til at atmosfæren blev mættet med støv og Solen var derfor ikke synlig i mange år. Det udløste en nuklear vinter og gjorde livet på Jordens overflade så svært at man kan undre sig over, at der i det hele taget var større dyr som fx krokodiller og pattedyr, der overlevede. Katastrofen førte på længere sigt til, at pattedyrene blev den førende dyregruppe og der er derfor næppe nogen tvivl om, at vi kan tilskrive vores tilstedeværelse på Jorden at den blev ramt af en asteroide for 66 millioner år siden. Vi ved ikke hvilken vej livets udvikling var gået uden katastrofen men der er ingen tvivl om, at livet havde udviklet sig på en helt anden måde.

Det antages, at asteroiden havde en massefylde på $\rho_{\text{ast}} = 3000 \text{ kg/m}^3$, en diameter på 10 km, og en hastighed på 25 km/s. Nedslaget skabte det enorme Chicxulub-krater i Mexico.

a) Beregn asteroidens kinetiske energi og sammenlign med 1) menneskets globale årlige energiforbrug på $5 \cdot 10^{20}$ J og 2) Hiroshima-bomben ($6,3 \cdot 10^{13}$ J).

Konsekvenserne af nedslaget ses enestående tydeligt på Stevns Klint, som et mørkt grænselag i den ellers hvide klint. Når man analyserer grænselaget kan man måle, at der er faldet 72 ng/cm^2 iridium (Ir) i forbindelse med nedslaget. Iridium er uhyre sjældent på Jordens overflade fordi Ir og de andre platingruppe-metaller er ekstremt siderofile (metalelskende). Den tidlige Jord var så varm at metallerne smeltede. De ekstremt siderofile grundstoffer som platingruppe metallerne blev meget stærkt koncentreret i metalsmelten og endte derfor i kernen da den tunge metalsmelte samlede sig i centrum af Jorden.

Under antagelse af at Ir er faldet jævnt på hele Jordens overflade skal du beregne hvor meget Ir, der er faldet i forbindelse med nedslaget. Asteroiden var en såkaldt kondritisk asteroide, der indeholder 0,48 ppm

masse Ir, dvs. der er $0,48 \cdot 10^{-6} \text{ g Ir per gram asteroide}$. Asteroiden havde en massefylde på $3,0 \text{ g/cm}^3$.

b) Hvor stor en asteroide skal der bruges for at den indeholder lige så meget Ir, som det der faldt ud over Jordens overflade?

Chicxulub-krateret har en diameter på 220 km. Når en asteroide rammer Jorden trænger den nogle kilometer ned under Jordens overflade inden al dens kinetiske energi er omdannet til varme. Der frigøres tilstrækkeligt med varme til at få hele asteroiden og dele af nedslagsområdet til at fordampe. Krateret dannes primært som følge af den resulterende dampekspllosion og asteroidekratere kaldes derfor også for eksplosionskratere. Kraterets størrelse afhænger derfor primært af asteroidens kinetiske energi. Sammenhængen mellem energi og kraterstørrelse (D = diameter målt i km) er blevet bestemt empirisk (se fx reference [?]):

$$E = 9,1 \cdot 10^{17} \text{ J} \cdot D^{2,59} \quad (4)$$

c) Benyt resultatet fra spørgsmål b) og beregn asteroidens hastighed. Den beregnede hastighed er relativt høj hvilket tyder på, at estimatet for asteroidens størrelse er lidt for lavt. Hvad er den mest sandsynlige fejlkilde?

d) Brug websiden "Impact Effects" til at finde ud af, hvilke konsekvenser nedslaget havde for et øjensvidne på 100 km, 500 km og 2000 km afstand. (<http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/>)

Opgave 6: Datering af meteoritter

Meteoritter indeholder en lang række radioaktive isotoper. De kemiske egenskaber af de radioaktive isotoper er de samme som egenskaberne af de tilsvarende stabile isotoper af grundstofferne. Det betyder, at hvis et mineral i meteoritten har et stort indhold af et grundstof, så vil det have et tilsvarende højt indhold af eventuelle radioaktive isotoper af grundstoffet. Denne egenskab bruges til at lave en såkaldt radiometrisk datering af meteoritten, baseret på dens mineralers forskellige indhold af radioaktive isotoper.

En af de isotoper, der bruges til at datere meteoritter med er rubidium-87 ($^{87}_{37}\text{Rb}$), der henfalder til strontium-87 ($^{87}_{38}\text{Sr}$) med en meget lang halveringstid på $T_{1/2} = 49 \cdot 10^9$ år.

a) Opskriv henfaldsskemaet for: $^{87}_{37}\text{Rb} \rightarrow ^{87}_{38}\text{Sr}$.

En af de gode ting ved at bruge $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$ henfaldet til datering er, at der findes en stabil isotop, ^{86}Sr , der hverken henfalder eller optræder som henfaldsprodukt fra nogen anden naturligt forekommende radioaktiv isotop. Det betyder, at mængden af ^{86}Sr i meteoritten ikke ændrer sig med tiden. Da mineralerne i meteoritten størknede var forholdet mellem ^{87}Sr og ^{86}Sr det samme i alle meteorittens mineraler, fordi de to isotoper er kemisk ens, og mineralerne derfor ikke kan skelne mellem dem. Denne egenskab kan bruges

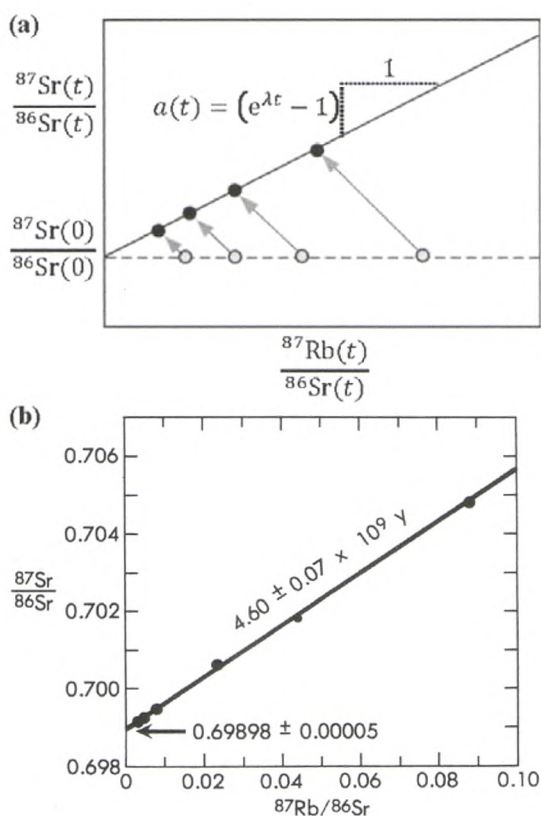
¹Når mineralerne størkner fastfryses deres indhold af isotoper og et henfald vil derfor føre til, at der optræder en datterkerne på samme lokalitet som moderkernen. Fra størkningstidspunktet vil forholdet mellem Sr-isotoperne udvikle sig forskelligt i de forskellige mineraler og det er denne egenskab vi udnytter til at datere størkningstidspunktet.

til at bestemme mængden af ^{87}Sr i mineralerne, da de størknede¹.

Som det fremgår af den første artikel i dette nummer så indeholder meteoritter, som Ejby, kondruler, der er små smeltedråber, dannet frit svævende omkring Solen. Efter en kortvarig opvarmning (i tidsrummet mellem 4567,3 og 4564 millioner år siden) er de størknet i løbet af få minutter. Det er tidspunktet for denne størkning vi kan bestemme.

Som tiden gik, blev mængden af ^{87}Rb mindre som følge af det radioaktive henfald og mængden af ^{87}Sr steg tilsvarende. Det betyder, at forholdet $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ har ændret sig med tiden.

På figur 2 illustrerer punkterne på den vandrette linje, hvad $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ var i meteorittens forskellige mineraler. Læg mærke til at alle mineralerne startede med det samme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -forhold og se, hvordan forholdet ændrede sig med tiden.



Figur 2. (a) Eksempel på forholdet $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i forskellige mineraler i en bjergart til tiden $t=0$, da mineralerne krystalliserede (åbne cirkler) og i dag (fyldte symboler). (b) Eksempel på datering af en meteorit (Juvinas) med Rb-Sr-metoden.

b) Opskriv *henfaldsloven* for mængden af ^{87}Rb som funktion af tiden, $N_{87\text{Rb}}(t)$, i et mineral, hvor ^{87}Rb -indholdet til tiden $t=0$ var $N_{87\text{Rb}}(0)$. Henfaldskonstanten kaldes λ (som i figur 2, øverst).

Mængden af ^{87}Sr vokser i takt med at ^{87}Rb henfalder:

$$N_{87\text{Sr}}(t) = N_{87\text{Sr}}(0) + (N_{87\text{Rb}}(0) - N_{87\text{Rb}}(t)) \quad (5)$$

For at kunne datere en meteorit, skal vi kunne beregne tiden ud fra nogle størrelser, som vi kan måle i dag. Vi kan selvsagt ikke umiddelbart måle de oprindelige indhold af ^{87}Rb og ^{87}Sr . Vi skal derfor forsøge at

opstille udtryk, hvor de oprindelige indhold af ^{87}Rb og ^{87}Sr ikke indgår.

c) Brug resultatet fra spørgsmål b) og formel (??) til at vise, at man kan opstille et udtryk for mængden af ^{87}Sr i dag ($N_{87\text{Sr}}(t)$), hvor det oprindelige indhold af ^{87}Rb ($N_{87\text{Rb}}(0)$) ikke indgår, nemlig:

$$N_{87\text{Sr}}(t) = N_{87\text{Sr}}(0) + (e^{\lambda t} - 1) \cdot N_{87\text{Rb}}(0)$$

d) Brug resultatet fra spørgsmål c) til at vise, at man kan opstille et udtryk for $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i dag på formen $y = b + (e^{\lambda t} - 1) \cdot x$, nemlig:

$$\frac{N_{87\text{Sr}}(t)}{N_{86\text{Sr}}} = \frac{N_{87\text{Sr}}(0)}{N_{86\text{Sr}}} + (e^{\lambda t} - 1) \frac{N_{87\text{Rb}}(0)}{N_{86\text{Sr}}}$$

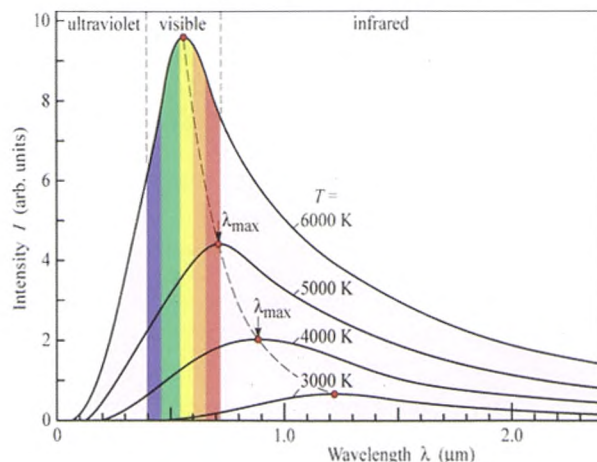
Figur 2 viser, at når man plotter det målte $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -forhold mod det målte $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ -forhold for forskellige mineraler fra den samme meteorit, så falder punkterne på en ret linje – en såkaldt isokronlinje, med hældningen $a = e^{\lambda t} - 1$, hvor t er tiden, siden mineralerne i meteoritten størknede, og λ er henfaldskonstanten ($\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$). Henfaldstiden er givet ovenfor.

e) Bestem meteorittens alder ved hjælp af isokronlinjen i figur 2 (b).

Opgave 7: Exoplaneter

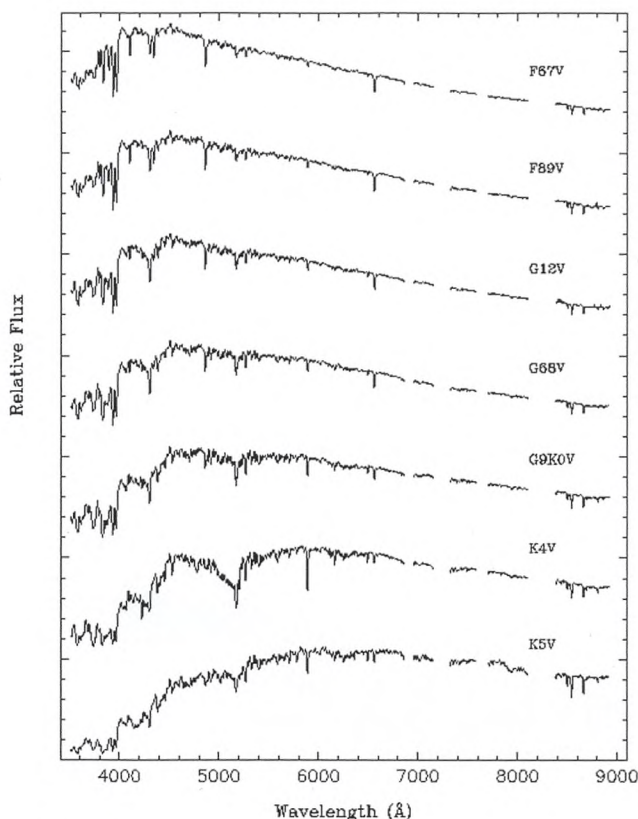
Kepler-teleskopet har opdaget flere tusinde exoplaneter i kredsløb omkring andre stjerner. Nogle af disse exoplaneter er blevet vurderet til at være habitable (beboelige), dvs. at der i princippet kunne være liv på dem. Der er ingen helt præcis definition af hvad det vil sige, at en planet er habitabel, men princippet er, at der skal kunne eksistere flydende vand på overfladen. En planet er derfor habitabel, hvis den har en passende afstand til den stjerne den kredser omkring. Hvis den er for tæt på, bliver der for varmt og hvis den er for langt fra stjernen, er der for koldt. Det er ikke nok, at den har samme afstand fra stjernen som Jorden har fra Solen, da der er meget stor forskel på, hvor meget energi stjerner udstråler. Hvis stjernen er lille og lyssvag, skal planeten meget tættere på den for at kunne holde sig varm.

I det følgende vil vi se på ni exoplaneter, opdaget med Kepler. Øvelsen går ud på at beregne, hvor varmt der er på de ni planets overflader og dermed afgøre, om der er habitable planeter iblandt dem.

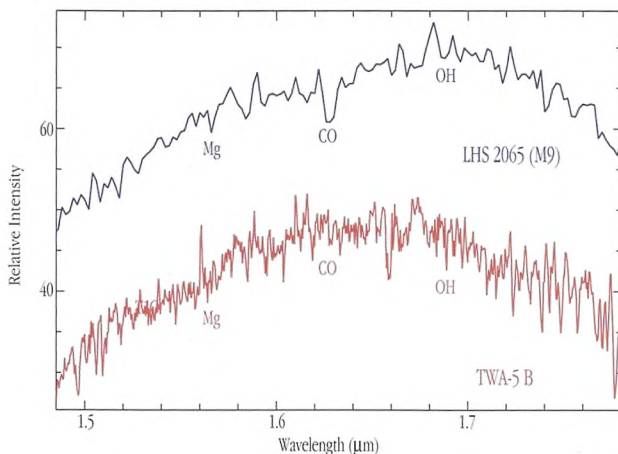


Figur 3. Stråling fra sorte legemer (dvs. objekter som absorberer al stråling og ikke reflekterer nogen stråling), beregnet med Plancks strålingslov for fire forskellige temperaturer.

En stjerne udsender et karakteristisk spektrum, der primært afhænger af stjernens overfladetemperatur (figur 3). Læg mærke til at den bølgelængde, hvor intensiteten er maksimal, $\lambda_{\max}$, afhænger af stjernens overfladetemperatur. Sammenhængen er udtrykt i *Wiens forskydningslov*: $\lambda_{\max} = b/T$, hvor $b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ og T er temperaturen i kelvin.



Figur 4. Spektre af syv forskellige stjerner med forskellige overfladetemperaturer.



Figur 5. Spektre af to brune dværgstjerner, hvor der ses molekyler.

a) Betragt spektrene i figur 4 og 5, der er optaget af forskellige stjerner. Brug Wiens forskydningslov til at bestemme de ni stjerners overfladetemperatur.

b) De ni spektre er ikke helt så glatte som den sortlegeme-stråling, der er vist i figur 3. Hvorfor er der dyk i spektrene?

Stjernens totale energiudsendelse afhænger både af overfladetemperaturen og af stjernens størrelse. Den

udsendte effekt per m^2 (intensiteten) kan beregnes ved hjælp af *Stefan-Boltzmanns lov*: $I = \sigma \cdot T^4$, hvor $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$.

Hvis vi antager, at der ikke absorberes stråling mellem stjernen og Jorden, vil den totale stråling, der rammer indersiden af en sfære med radius lig med Jordens afstand fra stjernen, være præcis det samme som den stråling stjernen udsendte. En stjernes lysudsendelse (energi pr. tid som måles i watt) kaldes stjernens *luminositet* L og den angiver den effekt, der udstråles fra stjernen.

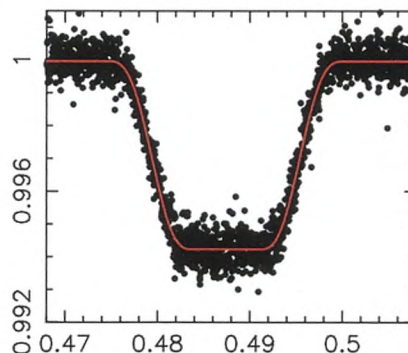
Stjerne	Afstand (lysår)	Modtagen intensitet (W/m^2)
F67V	43	$2,19 \cdot 10^{-10}$
F89V	65	$7,20 \cdot 10^{-11}$
G12V	37	$2,14 \cdot 10^{-10}$
G65V	12	$1,82 \cdot 10^{-9}$
G9KOV	67	$4,80 \cdot 10^{-11}$
K4V	78	$2,48 \cdot 10^{-11}$
K5V	23	$2,68 \cdot 10^{-10}$
LHS 2065 (M9)	17	$6,00 \cdot 10^{-14}$
TWA-5B	12	$9,68 \cdot 10^{-14}$

Tabel 2. Afstande og modtagne effekter fra de ni stjerner.

c) Beregn de ni stjerners radier ud fra oplysningerne i tabel 2.

[Vink: Beregn først de ni stjerners luminositet L (den udstrålede effekt målt i watt) ud fra oplysningerne i tabel 2. Hvis stjernens radius kaldes R_* kan nu benyttes at stjernens luminositet L er givet som et produkt af stjernens overfladeareal, $4 \cdot \pi \cdot R_*^2$, (målt i m^2) og den udstrålede effekt pr. m^2 (intensitet), målt i W/m^2 , som ifølge Stefan Boltzmanns lov er givet som $\sigma \cdot T^4$. Da L er bestemt ovenfor, og da temperaturen T er bestemt i opgave a) er kun stjernens radius R_* ukendt og kan beregnes.]

Kepler-satellitten har i en årrække holdt øje med lysudsendelsen fra 260.000 stjerner i Mælkevejen. Hver gang en planet passerede ind foran en af de 260.000 stjerner blev det registreret af Kepler. Hvis det observeres, at en planet passerer ind foran stjernen tre gange, og tidsrummet mellem 1. og 2. passage, er præcis det samme som tidsrummet mellem 2. og 3. passage, så er der formentlig tale om en exoplanetpassage. Udover perioden registrerer Kepler også, hvor meget stjernens lys svækkes under passagen (se figur 6). Jo større planeten er – jo mere skygger den for stjernens lys.



Figur 6. Fald i lysintensitet fra en stjerne i forbindelse med en planetpassage. Lysintensiteten er målt af Kepler-satellitten. Bemærk at ændringen i lysintensiteten sker på det tredje betydende ciffer. (NASA).

I tabel 3 kan du se hvad perioden og lysdæmpningen er for de ni exoplaneter.

Stjerne	Lysdæmpning (%)	Periode (dage)
F67V	0,01	45
F89V	0,05	456
G12V	0,02	37
G65V	0,13	78
G9KOV	0,98	275
K4V	0,57	64
K5V	0,02	365
LHS 2065 (M9)	1,5	0,9
TWA-5B	2,1	0,7

Tabel 3. Lysdæmpning og periode for exoplaneter.

d) Brug lyssvækkelsen og stjernens radius (fundet i spørgsmål c) til at regne planeternes radius ud. Beregn forholdet mellem planeternes radier og Jordens radius.

En planets omløbstid er alene bestemt af stjernens masse og planetens baneradius omkring stjernen. Vi skal derfor bruge de ni stjerners masse for at kunne bestemme planeternes afstand fra stjernerne. En stjerns udstrålede effekt af lys, luminositeten L , er primært en funktion af massen:

$$\frac{L}{L_{\text{Sol}}} = \left(\frac{M}{M_{\text{Sol}}} \right)^{3,5} \quad (6)$$

hvor $L_{\text{Sol}} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$ og $M_{\text{Sol}} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. Denne sammenhæng betyder, at store tunge stjerner udsender meget mere lys end lette, små stjerner. Vi kan derfor bruge luminositeten til at bestemme de ni stjerners masse.

e) Beregn de ni stjerners masse ud fra sammenhængen mellem masse og luminositet.

Ifølge Keplers tredje lov,

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}, \quad (7)$$

kan man beregne planetens omløbstid i en cirkulær bane med radius r omkring en stjerne med masse M .

f) Brug de opgivne omløbstider (dvs. perioder mellem formørkelser) i tabel 3 til at beregne planeternes baneradier.

Når vi ved, hvor langt fra de centrale stjerner de ni planeter er, kan vi beregne hvor varmt det er på deres overflade. Det man skal udnytte er, at der skal være balance mellem den varmestråling, der modtages fra stjernen og den varmestråling, som planeten udsender.

Planetens overfladetemperatur T (i kelvin) kan beregnes således²:

$$T = 278 \frac{\sqrt[4]{(1-A)(L/L_{\text{Sol}})}}{\sqrt{d}}, \quad (8)$$

hvor A er den såkaldte albedo og d er planetens afstand fra stjernen målt i astronomiske enheder (AE), 1 AE = $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$. Albedoen er et mål for, hvor meget af stjernens stråling planeten reflekterer og hvor meget planeten absorberer. Vi antager at $A = 0,31$ ligesom for Jorden.

g) Beregn planeternes overfladetemperatur.

Hvis planeten skal være beboelig, så skal den også have en atmosfære. En atmosfære vil altid føre til en højere overfladetemperatur pga. drivhuseffekten. På Jorden betyder drivhuseffekten i øjeblikket at overfladetemperaturen er 34°C højere end den ville være, hvis Jorden ikke havde en atmosfære.

h) Hvis vi antager at de ni planeter har en drivhuseffekt svarende til Jordens ($A = 0,31$) – hvad ville deres overfladetemperatur så være?

Antagelsen om, at albedoen er på $A = 0,31$ som for Jorden skal ses i forhold til, at albedoen for planeterne i vores solsystem varierer fra 0,06 (Merkur) til 0,75 (Venus). Se eventuelt [?].

i) Er der nogle af de ni planeter, der er habitable? Begrund svaret.

j) Kan planetens størrelse og afstand til stjernen have betydning for mulighederne for liv?

Litteratur

- [1] Hughes, D.W. (2003), The approximate ratios between the diameters of terrestrial impact craters and the causative incident asteroids, *M.N.R.A.S.*, Vol. **338**, Issue 4, pp. 999-1003; <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/2003MNRAS.338..999H/0000999.000.html>.
- [2] Samuel Markings, Albedo of the Planets, <http://sciencing.com/albedo-planets-5203.html>.

Facit til Regneopgaverne

På KVANTs hjemmeside ligger en besvarelse med mellemregninger på regneopgaverne:

www.kvant.dk/Regneopgaver-facit.pdf

²Ved på nettet at søge på ordene "planetary equilibrium temperature" vil man kunne finde mange steder, der udleder ligevægtstemperaturen for en planet uden atmosfære ved at sætte stjernens indstrålede lys-effekt på planetens overflade (i afstanden d fra stjernen) lig med den samlede temperaturudstrålingseffekt fra planetens overflade. I udtrykket for planetens ligevægtstemperatur er planetens størrelse (radius) uden betydning (den divideres ud) og udtrykket bliver: $T = \sqrt[4]{((1-A) \cdot L)/(16 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot d^2)}$. Ved at indsætte Stefan-Boltzmanns konstant, σ , Solens luminositet, $L = L_{\text{Sol}}$, og jord-sol afstanden, $d = 1 \text{ AE}$, fås umiddelbart udtryk (8).

Aktuelle bøger

Af Christine Pepke Pedersen og Jens Olaf Pepke Pedersen

Anjas univers

Anja C. Andersen, "En lille bog om Universet", 256 sider, 165 kr. Lindhardt og Ringhof 2016 (fx saxo.com).

En lille bog om Universet beskriver i et fængende men let fortalt sprog hele Universet. Bogen er velformuleret og har flere referencer til Anjas eget liv og studietid. Bogen starter med et forord, der beskriver hvordan Anjas interesse for astronomi startede, da en astronomistuderende holdt foredrag for den dengang 13-årige Anja og hendes klasse om Solsystemet og stjerner. Herefter fik hun en kikkert i fødselsdagsgave og begyndte at kigge på stjerner.

Bogen er opdelt i korte kapitler, der går igennem alle Solsystemets planeter, asteroider, meteoritter og kometer. Meteorit-afsnittet er særligt spændende, da det netop er fra meteoritter at astronomerne får information om Universet som de kan "røre ved" og analysere i et laboratorium, da de ellers kun får information fra det lys de observerer. I laboratoriet bliver meteoritterne undersøgt for at finde ud af, hvilke grundstoffer de består af og hvor gamle de er, dvs. hvornår stenen sidst var en smeltet klump, hvilket fortæller hvornår der var geologisk aktivitet, der hvor stenen kommer fra. Vi hører bl.a. om meteoren, der i 2013 eksploderede over byen Tjeljabinsk i Rusland og med en diameter på 17 m egentlig ikke blev betragtet som en potentielt farlig asteroide, men alligevel udløste en energimængde, der svarede til omkring 25 atombomber. Særligt interessant er det at høre om meteoritterne i Danmark, som fx Ejby-meteoritten der i februar sidste år faldt ned i nærheden af København, og hvor flere af meteoristykkerne faktisk blev fundet.

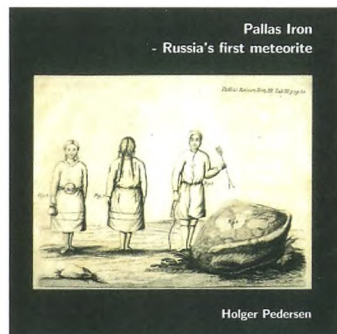
Udenfor vores solsystem beskrives exoplaneter, hvor astronomerne særligt leder efter jordlignende planeter omkring sollignende stjerner. Ved brug af bl.a. Kepler-teleskopet har man observeret flere planeter med en størrelse næsten som Jordens og som befinder sig i den beboelige zone. Der er også kapitler om stjerner, supernovaer og dobbeltstjerner, og vi hører om, hvordan stjerner dannes og holdes sammen af de to modsatrettede kræfter: tyngdekraften og gas- og strålingstrykket (fra fusionsprocesserne i stjernen). Anja fortæller om kosmisk støv, de små mineraler, som hun har specialiseret sig i, der spredes ud i Universet fra døende, kolde stjerner, og senere indgår i dannelsen af nye stjerner.

Igenem bogen finder man det fascinerende hvordan astronomer kan finde ud af så utrolig meget om Universet kun ved at se på lys (og anden stråling) med teleskoper. Anja forklarer meget godt, hvordan astronomer udtænker deres teorier og hvordan de, ved hjælp af computersimulationer afprøver teorierne. Det er særlig interessant hvordan astronomerne kan få information om de sorte huller, da de jo ikke udsender noget lys, men at man alligevel, ved at se på, hvordan de sorte huller påvirker andre objekter med tyngdekraften, kan observere dem. Det mest spændende kapitel handler om mørk energi. Astronomerne har observeret, at Universets udvidelse ikke er konstant men accelererer. Den mørke energi er en slags antityngdekraft der frastøder masse. Anja diskuterer, hvad mørk energi kan være (vakuumenergi) og forklarer, at da der ikke er masse og dermed tyngdekraft nok i Universet til at bremse udvidelsen vil Universets skæbne blive afgjort af den for tiden dominerende faktor – den mørke energi. Til sidst forklares tyngdebølgerne, krusninger i rumtidens krumning, som bliver udsendt af et varierende tyngdefelt, der opstår, fx når to sorte huller kolliderer og udsender energi i form af tyngdebølger. Som bekendt blev tyngdebølger målt af LIGO-eksperimentet for første gang sidste år og verificerede dermed Einsteins generelle relativitetsteori.

Bogen indeholder stort set alt man kan begære at lære om Universet, men man savner dog et kapitel kun om Solen og solstørme og deres effekt på Jorden. Bogen er, som forventet,

illustreret med mange rigtig flotte billeder med tilhørende gode billedtekster. Bagerst i bogen er der en god opslagsliste som indeholder forklaring på alle navne, begreber, teorier og missioner, som jeg kan forestille mig er meget nyttig hvis man misser noget. Alt i alt en rigtig fin lille bog om Universet som kan anbefales særligt til gymnasieelever og andre med interesse for astronomi.

CPP



700 kg jern med de smukkeste krystaller

Holger Pedersen, "Pallas Iron – Russia's first meteorite", 260 sider, 190 kr. BoD 2017 (www.bod.dk/bog/).

I 1749 blev en næsten 700 kg tung meteorit fundet 230 km syd for byen Krasnojarsk i Sibirien af en lokal smed. Smeden fik den store klump transporteret de 30 km hjem til sig selv, hvor den lå på hans gårdsplads indtil den i oktober 1771 blev bemærket af en spejder, som var udsendt af den tyske naturforsker Peter Simon Pallas (1741-1811).

Meteoritten bestod af 70 % rent jern blandet med gennemsigtige, smukke krystaller, og da Pallas beskrev sit fund for den videnskabelige verden, udløste det mangs års intens debat om dens oprindelse. Lokale legender fortalte, at den havde en himmelsk oprindelse, mens Pallas selv var overbevist om, at den måtte være blevet dannet på stedet af naturlige processer, hvor han dog udelukkede vulkaner og skovbrande. Den svenske mineralog Gustav von Engeström foreslog at klumpen var menneskeskabt som et resultat af forlængst forladte jernsmelter, mens andre fremsatte mere eksotiske forklaringer, der involverede lynnedslag eller skykondensationer. I 1794 fremsatte tyskeren Ernst Chladni sin teori om Pallas-meteorittens oprindelse udenfor Jorden, som hurtigt vandt frem som den fremherskende teori. Pallas delte rundhåndet ud af meteoritten, således at der nu ligger fragmenter af den på over hundrede naturhistoriske museer verden over, og dens særlige sammensætning bliver benævnt som "pallasjern", ligesom den specifikke type jern-sten-meteorit er kendt som "pallasit".

I en ny bog fremlægger astrofysikeren Holger Pedersen sine studier af gamle rapporter om meteoritten og dens historie, samt af de omfattende diskussioner om dens oprindelse. Han har her haft glæde af materialer fra arkivet i det russiske videnskabsakademi i Sankt Petersborg, hvilket blandt andet har ført til, at han har kunnet identificere den spejder, der bragte den første lille prøve til Pallas i januar 1772. Holger Pedersen har også indsamlet oplysninger og fotografier af de mange stumper af meteoritten, som ligger rundt omkring på museerne, ligesom han har deltaget i feltarbejde på det formodede findested for at lede efter flere dele af meteoritten.

Resultatet er blevet en imponerende stor samling oplysninger om meteoritten, men det betyder også, at bogen nok kun henvender sig til de sande meteoritnørder, som i forvejen er inde i fagudtrykkene og som forstår at påskønne de mange og meget detaljerede informationer. Desuden skal de også beherske både fransk og tysk for at få glæde af dem alle. Bogen må til gengæld være en ren guldgrube for den videnskabshistoriker, der har mod på at skrive meteorittens historie i en populærfaglig fremstilling, og den opfordring er hermed givet videre.

JOPP

Temanummer om Solsystemets oprindelse

Af Dorte Olesen, Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Dette temanummer om "Meteoritter og Solsystemets oprindelse" udsendes til alle LMFK-medlemmer. Samtidig er der mulighed for at bestille et foredrag af meteoriteksperter Henning Haack i november 2017 eller januar 2018 på gymnasier over hele Danmark om "Meteoritfaldet i Ejby – og historien om hvordan verden blev til".

En bevilling fra Lundbeck-fonden har gjort det muligt for SNU, i samarbejde med KVANT, at kunne udsende dette temanummer om "Meteoritter og Solsystemets oprindelse" til alle gymnasielærere i matematik-, fysik- og kemifaggrupperne (LMFK). Bladet indeholder både artikler og opgaver, som kan løses af gymnasieelever.

Bestil et foredrag med meteoriteksperter

Man kan få et foredrag på sin skole af meteoriteksperter Henning Haack, som er medredaktør af dette nummer – eventuelt kan man også lave et offentligt aftenarrangement, hvor Henning Haack så bliver i byen og taler for et bredere publikum.

Henning Haack er kendt fra både TV og andre medier, og regnes for Danmarks førende meteoriteksperter. Han er en levende fortæller og kombinerer det faglige med en forrygende fremstilling af det flotte og dramatiske meteoritfald den 6. februar 2016 – Danmarkshistoriens største!

Foredrag kan bestilles hos SNU's sekretær Cecilie Pedersen, telefon 20 11 94 88 eller email ceciliemkpedersen@gmail.com. Der sigtes mod at foredragene holdes enten i første halvdel af november 2017 (primært på Fyn og i Jylland) eller sidste halvdel af januar 2018 (primært på Sjælland). På Sjælland kan andre datoer muligvis også lade sig gøre ved individuel aftale.



Henning Haack med et stykke af Ejby-meteoritten.