

Dette katalog er udgivet i forbindelse med den permanente udstilling »Solsystemet – fra Altings Oprindelse til Livets Opståen« på Geologisk Museum, Københavns Universitet. Kataloget er finansieret med hjælp fra Toyotafonden.

Forsidebillede © Jakob Laurtrup

Udstillingens tilrettelæggelse:

Henning Haack, kurator for meteoritsamlingen på Geologisk Museum, Anne Haastrup Hansen, grafisk designer på Geologisk Museum, arkitektfirmaet Harrit og Sørensen A/S og Christine Marvil, udstillingsmedarbejder på Geologisk Museum.

Redaktion:

Faglige redaktører: Christine Marvil og Henning Haack.

Grafisk redaktør: Anne Haastrup Hansen.

Tekster:

Anja C. Andersen, Philip R. Bidstrup, Martin Bizzarro, Vagn F. Buchwald, Henning Haack, Christine S.

Hvidbjerg, Uffe Græe Jørgensen, Christine Marvil og Minik T. Rosing.

Produktion:

Design og layout: Anne Haastrup Hansen

Tryk: Jønsson & NKN A/S

ISBN 87-88114-27-9

Udstillingen er blevet til ved støtte fra følgende fonde og firmaer:

Geocenter København

Toyota-fonden

Knud Højgaards Fond

Augustinus Fonden

Lundbeckfonden

Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Udvikling

Følgende personer takkes for gennemlæsning af manuskripter:

Annemarie K. Brantsen, Geologisk Museum; Professor David Harper, Geologisk Museum

Video til udstillingen:

Idé og udvikling: Jens Ole Platz, Lars Bo Kimergård, Mikkel Stolt

Fotograf: Henrik Ørslev

Klipper: Lars Bo Kimergård

Tonemester: Jens de Place Bjørn, Per Nordertoft

Produktionsleder: Mikkel Stolt

Produktion: Fenris Film & Multimedia ApS, Setting ApS

Tak til ESA, NASA, Tycho Brahe Planetariet og Matthew Bate, University of Exeter for brug af billeder, animationer og video.

SOLSYSTEMET

FRA ALTINGS OPRINDELSE TIL LIVETS OPSTÅEN

GEOLOGISK MUSEUM

Indhold

- 5 (0•0) Introduktion
- 7-9 (0•1) Cape York meteoritbygen

Kapitel 1

Fra big bang til solsystemets oprindelse

- 12-15 (1•1) Hvor kommer grundstofferne fra?
- 16-19 (1•2) Meteoritter indeholder ægte stjernestøv
- 20-23 (1•3) Solsystemets dannelse

Kapitel 2

Solsystemets faste legemer

- 28-29 (2•1) Merkur
- 30-31 (2•2) Venus
- 32-35 (2•3) Jorden og Månen
- 36-39 (2•4) Mars
- 40-41 (2•5) Mars' poler og iskapper
- 42-43 (2•6) Asteroider
- 44-49 (2•7) De ydre planeter
- 50-55 (2•8) Solsystemets måner

Kapitel 3

Meteoritter

- 58 (3•1) Meteorit-træ
- 59 (3•2) Hvor kommer meteoritter fra?
- 60-62 (3•3) Kondritter
- 63-65 (3•4) Jernmeteoritter
- 66-67 (3•5) Pallasitter
- 68-69 (3•6) Mesosideritter
- 70-71 (2•7) HED meteoritter
- 72-73 (3•8) Meteoritter fra Månen
- 74-77 (3•9) Mars meteoritter
- 78-81 (3•10) Hvordan genkender man en meteorit?
- 82-83 (3•11) Hvor finder man meteoritter?
- 84-85 (3•12) Stjernesky og meteoritfald

Appendix

- 88 (A•1) Datering
- 89 (A•2) Isotoper
- 90-91 (A•3) Ordliste
- 92-93 (A•4) Ordliste

Introduktion

I vores dagligdag tænker vi ikke så meget over det. Vores samfund er en så helt naturlig del af vores liv, at vi glemmer hvor ufatteligt isoleret vores civilisation her på Jorden er. Astronauter fortæller ofte at det først var da de så Jorden fra rummet, at det gik op for dem hvor enestående vores planet er. Formålet med Geologisk Museums nye udstilling er at sætte Jorden i et kosmisk perspektiv. Hvorfor er vi her, hvordan er det hele opstået, og hvordan ser der i det hele taget ud rundt omkring i solsystemet – vores lille hjørne af universet? I vores dagligdag kan udforskningen af solsystemet måske synes uvæsentlig, men hvis man tager de kosmiske briller på, så er det i solsystemet menneskets vugge var. Hvad var det der skete for 4,6 milliarder år siden, som gør at der i dag er opstået en civilisation på den tredje planet fra Solen, der er avanceret nok til at begynde at rekonstruere forløbet?

Vores verden er ikke evigt uforanderlig. Selv universet, som vi kender det, har ikke eksisteret evigt og vores eget "lille" solsystem i det ufattelige kosmos har kun eksisteret i forholdsvis begrænset tid. Det har udviklet sig fra en primitiv gassky til et solsystem med planeter, kometer, asteroider og allermest ufatteligt har der udviklet sig liv på mindst en af planeterne.

De grundstoffer Jorden og ikke mindst vi selv er opbygget af er dannet i det indre af en række stjerner, der fødtes og døde inden solsystemet blev skabt. I de sidste faser af disse stjerners livsforløb blev materialet slynget tilbage ud i rummet – undertiden i forbindelse med eksplosioner af en ufattelig størrelsesorden. Herfra kunne det så bruges til at opbygge en ny stjerne indtil det til sidst blev brugt til at opbygge vores eget solsystem.

Fra solsystemets oprindelse til dannelsen af de ældste sten på Jorden gik der over 600 millioner år. De eneste bjergarter, der er bevaret fra denne vigtige periode er meteoritter. Meteoritter er stumper af asteroider og planeter der falder på Jorden. Kun ved at studere dem kan man få indsigt i hvordan og hvornår vores solsystem opstod. Med 550 forskellige meteoritter på tilsammen omkring 25 ton råder Geologisk Museum over Skandinaviens største meteoritsamling. Disse stumper fra solsystemets fjerne afkroge og forne tider kan fortælle en fantastisk historie om vores solsystems udvikling frem til den dag, hvor meteoritten med bulder og brag fór gennem Jordens atmosfære. Udstillingen fortæller historien og

viser de meteoritter, der har gjort det muligt at rekonstruere vores fælles oprindelse.

Resten af Geologisk Museum handler om en af konsekvenserne af hele dette forløb – vores egen planets udvikling gennem de sidste ca. 4 milliarder år – herunder livets opståen og udvikling. Det er det tidsrum hvorfra vi har bevaret bjergarter på Jorden. Den nye udstilling vil derfor ikke alene fortælle om altings oprindelse men også danne en naturlig indgang til resten af museet. Her vil hele scenen blive sat, grundstofferne, som vi kender dem i dag, vil blive skabt og Jorden og resten af de kendte objekter i solsystemet vil blive opbygget.

Målgruppen for udstillingen er, ligesom resten af Geologisk Museum, den brede befolkning. Ved at besøge udstillingen kan man få indblik i hele forløbet fra universets oprindelse for 13,6 mia. år siden til solsystemets dannelse for 4,6 mia. år siden. Udstillingen byder desuden på et indblik i vores solsystems mangfoldighed som det ser ud i dag.

Selve udstillingen kan opleves på egen hånd i museets åbningstid. Her vil man kunne gøre brug af udstillingens virtuelle guider i form af en række videoskærme, hvor danske forskere fortæller om dele af udstillingen, der hører under deres forskningsfelt. Man vil således ikke kun få en ekspertindføring i emnet, men også et indblik i dansk forskning inden for området. Uden for åbningstiden kan skoleklasser bestille en gratis rundvisning med guide.

Kataloget her indeholder kapitler skrevet af en lang række danske forskere. Her kan man bl.a. komme mere i dybden med nogle af de emner der bliver nævnt i udstillingens videoer. Kataloget kan købes eller lånes på museet og det er også muligt at hente det gratis fra Geologisk Museums hjemmeside.



Cape York meteoritbygen



I museets gård står et brudstykke af jernmeteoritten Cape York. Stykket, som før skæring vejede 20,1 ton, hedder Agpalilik efter sit findested i Melville Bugten, Nordvestgrønland.



Figur 1. Jernmeteoritten Savik hejses fri af undergrunden. Den står i dag i Geologisk Museums gård. ©V.F. Buchwald.

Figur 2. Forfatteren siddende på Agpalilik efter grønlænderne havde fjernet nogle af de sten der dækkede den. 3. august, 1963. ©V.F. Buchwald.



Cape York meteoritterne har en lang forhistorie. Der gik rygter om dem blandt forskere og skippere, der med mellemrum besøgte Baffin Bugten i 1800-tallet, men det var først i 1894, at det lykkedes polarforskeren Robert E. Peary at få solide oplysninger frem. Hans eskimoiske hjælpere kendte til tre meteoritter, som lå 50 km øst for Cape York. Peary frilagde dem sent i 90'erne og sejlede dem til New York. De fik navnene Ahnighito (31 t), Woman (3 t) og Dog (407 kg), og de er i dag udstillet på American Museum of Natural History i New York.

Da Knud Rasmussen og Peter Freuchen i 1913 berejste de samme områder, fortalte en ung fanger, Qitlugtoq, at han kendte til endnu en meteorit. Den fik navnet Savik (3,4 t). Den kom på Finansloven, blev efter 1. Verdenskrig bjerget af ingeniør Holger Blichert-Hansen, for omsider i 1925 at blive bragt til København. Savik står i museets gård.

I 1955 fandt amerikanske glaciologer en mindre meteorit på en nunatak øst for den amerikanske Thule Air Base. Den kom til København i 1956 og fik navnet Thule (49 kg). Disse mange fund af jernmeteoritter i Nordgrønland forekom mig lidt gådefuld. Jeg rekvirerede en smule materiale fra de tre klumper i New York og sammenlignede det med Savik og Thule. Alle var medium oktaedritter med omkring 8% nikkel, 0,5% kobolt og lidt fosfor, og resten jern og svovl. Så jeg opstillede den hypotese, at alle fem tilhørte samme fald. Dvs. at en 100-200 tons kæmpeteorit antageligt var kommet fra nordvest, var sprængt i luften og var gået i hundredvis af stykker, små og store. De mindste var blevet bremsset mest af luften og faldt i nordvest (Thule), mens de største fløj langt og landede i sydøst (Ahnighito). Der er ca. 100 km mellem yderpunkterne.

Jeg fremlagde denne hypotese for departementschef Eske Brun i Grønlandsministeriet, idet jeg antydede at jeg var interesseret i at komme til Thule for at stedfæste findestederne præcist og måske finde noget mere, idet hypotesen jo ikke udelukkede



at der kunne ligge flere meteoritter i området. Med støtte fra Ministeriet fik jeg i somrene 1961 og 1963 stillingen som videnskabelig forbindelsesofficer på Thule Air Base. I min fritid afsøgte jeg systematisk de isfrie områder og lokaliserede de gamle findesteder, der bl.a. var kendelige på et betydeligt antal eskimoiske hammersten af basalt. Tillige agiterede jeg for sagen blandt amerikanere og grønlandere. Det medførte allerede i efteråret 1961, at fangeren Augo Suerssaq kunne meddele fundet af en ny jernmeteorit, Savik II (7,8 kg). Den lå indenfor den hypotetiske spredningsellipse og støttede min arbejdsteor.

I sommeren 1963 nåede jeg med motorbåd frem til en ret utilgængelig halvø, Agpalilik, som slet ikke var med på mit kort, der ikke var forbedret siden Lauge Kochs opmålinger i 1922. Her fandt jeg d. 31. juli den, efter findestedet, opkaldte nye meteorit, Agpalilik. Den lå næsten dækket af store gnejsblokke. Der var intet krater og ingen eskimoiske hammersten. Formentlig fandt faldet

sted for mere end 2000 år siden, da området var dækket af svær is. En lille gletsjer findes endnu blot 200 m fra findestedet. Meteoritten må have lavet et krater i isen, og da isen senere smeltede, blev jernblokken blot aflejret blandt de andre stenblokke. Meteoritten var ukendt af de lokale grønlandere, og da jeg fortalte om fundet var de yderst skeptiske. Men vi rejste sammen til findestedet, hvor man hjalp mig med at frigøre toppen, så vi kunne danne os en forestilling om størrelsen. Underparten var fast forankret i permafrost, en blanding af grus, småsten og is, der var stærk som beton. Vi kunne ikke gøre meget, men dimensionerne antydede, at meteoritten mindst måtte veje 15 t.

Atter hjemme skulle der søges finansiel støtte til det videre arbejde, og der skulle udarbejdes en plan for udgravning og bjergning. Geologisk Museum, Carlsbergfondet og Grønlands Tekniske Organisation (GTO) trådte beredvilligt til, så i sommeren 1964 rejste en

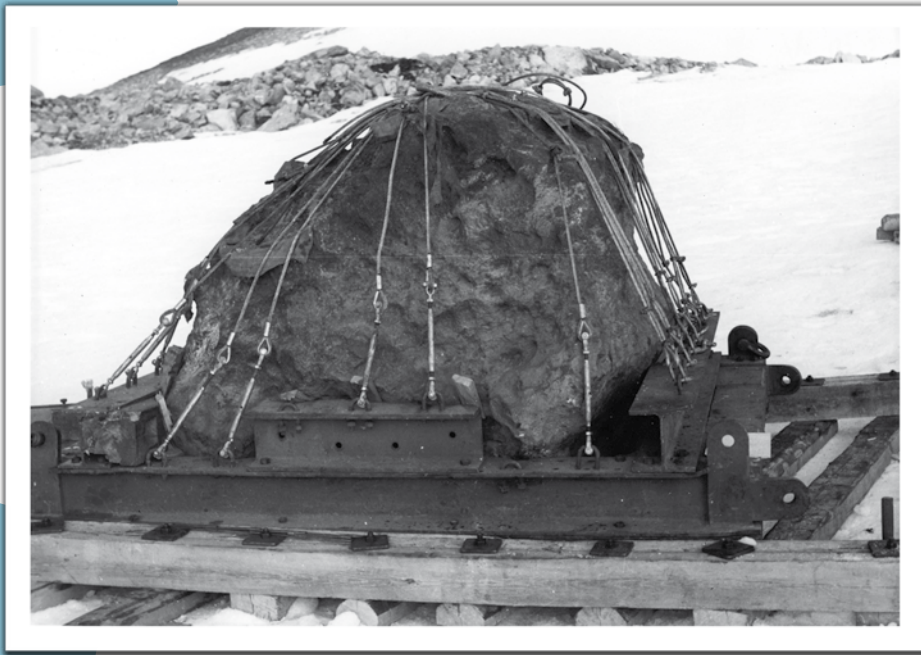
lille ekspedition til Grønland. Desværre frøs vort skib, M/S Elfy North, fast i Melville Bugten, så ekspeditionen måtte opgives.

Det vigtigste arbejde udførtes i 1965. Takket være assistance fra to helikoptere fra Thule Air Base kunne materiel, dynamit og lejrudstyr flyves frem til en lejrplads kun 300 m fra meteoritten. Agpalilik udgravedes og haledes ned mod kysten på en præfabrikeret stålslæde, der gled hen over et skinnelægeme af tømmerstokke. Alt skete med håndkraft, for maskiner var udelukket i det vanskelige terræn. Vi var otte mand, der arbejdede med opgaven fra d.18. til d. 28. august. Så måtte stedet forlades på grund af is. Med GTO's kutter Sagfioq sejlede vi sydpå mod udstedet Savigsivik, men vi måtte sprænge os vej med dynamit for at komme igennem de udstrakte bæltter af ny svær is.

I 1966 måtte ekspeditionen opgives, da det LCM-landingsfartøj, der skulle have hentet meteoritten, fik sin bovport ødelagt under storm på vej til Agpalilik.



Figur 3. Meteoritten Agpalilik udgraves 20 august 1965.
©V.F. Buchwald.



Figur 4. Agpalilik transporteres ned til kysten på den præfabrikerede stålslæde, som den står på den dag i dag, i Geologisk Museums gård. © V.F. Buchwald 23 august 1965.

Endelig i august 1967 lykkedes det for kaptajn J.E. Leo at bringe sin 3700 t coaster M/S Edith Nielsen ind i den isfyldte bugt, hvor meteoritten lå. I en hektisk kampagne, hvor man arbejdede døgnet rundt i 60 timer, lykkedes det at få meteoritslæden trukket om bord i det af amerikanerne lånte landgangsfartøj. Dette sejlede derpå ud til Edith Nielsen, som med sin stærkeste bom svingede meteoritslæden om bord. I september kunne Agpalilik under betydelig opmærksomhed udlosses i København, hvor en vejning på en af havnens justerede vægte viste 20.140 kg meteorit og 1000 kg slæde og wirer.

I 1970 blev meteoritten på sin slæde af Ingeniørregimentet transporteret til Gråsten, hvor man på et stenhuggeri skar en fjerdedel af meteoritten af. Der frigjordes en skive på 560 kg til udstillingen. Hvert af de to snit varede 200 timer med en snorsav. Der blev også skåret et 550 kg hjørne, der p.t. er udlånt til Tycho Brahe Planetariet, og andre stykker er blevet udtaget til forskning og til bytte med andre museer. Herved er den danske meteoritsamling vokset til en af Europas bedste.

Polering og ætsning med fortyndet salpetersyre har frembragt den karakteristiske Widmanstättenstruktur, "Himlens eget varemærke". Strukturen er umulig at eftergøre, da det kan beregnes, at den må være dannet under langsom afkøling fra høj temperatur, med ca. 1° pr. 10.000 år. Agpalilik var ved 1000°C en kæmpe-eenkrystal på 2 m, den største eenkrystal af metal, der kendes. På snitfladerne ses parallelle inklusioner af det umagnetiske jernsulfid troilit, FeS, der markerer op-ned retningen på den lille asteroide, hvoraf Agpalilik og Cape York oprindeligt var en del. Cape York meteoritbyggen er med sin udstrækning på

over 100 km og sine indtil nu kendte tolv større stykker, i alt 58 tons, verdens største. Et andet interessant aspekt er at talrige af de nøddestore meteoritfragmenter i hen ved 1000 år tjente som knive, harpunspidser og pilespidser for grønlænderne. De bragte de små stykker til Woman og Savik, der blev brugt som ambolte, mens man hamrede meteoritterne i form med medbragte, seje basalhamre. Arkæologerne har fundet snesevis af knive og harpunspidser på bopladser både i Grønland og så langt væk som i Hudson Bay. Mange af fundene er udstillet på Nationalmuseet og på Grønlands Museum i Nuuk.

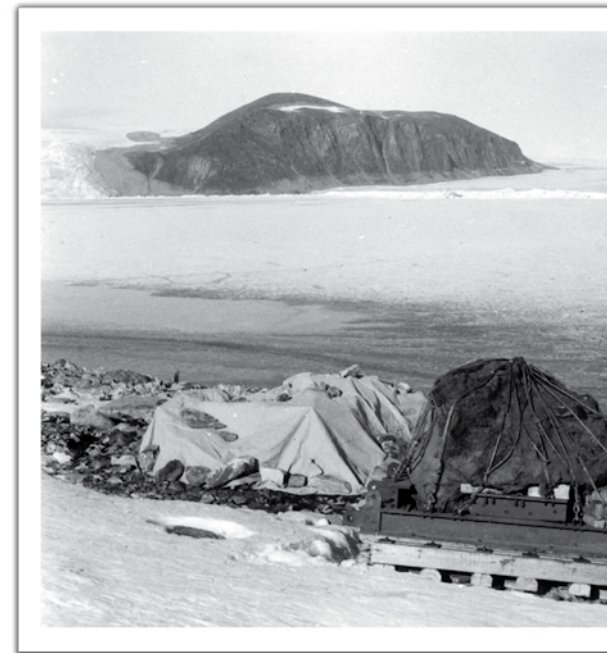


Figure 7. Here the ice is blasted with dynamite in order to make a passage through the ice. 28. August, 1965. ©V.F. Buchwald.





Figur 5. Agpalilik på sin stålslæde, klar til at blive afskibet til København 27 august 1965.
©: V.F. Buchwald.



Figur 6. Kutteren Sagfiq. Ekspeditionen måtte sprænge sig vej ud gennem isen med dynamit, 28 august 1965. © V.F. Buchwald.



Figur 8. Her ses forfatteren foran Agpalilikmeteoritten.
Som det ses er der skåret et stykke af meteoritten.
©GM marts, 2006

Chapter (1)

Fra Big Bang til solsystemets oprindelse



Hvor kommer grundstofferne fra?

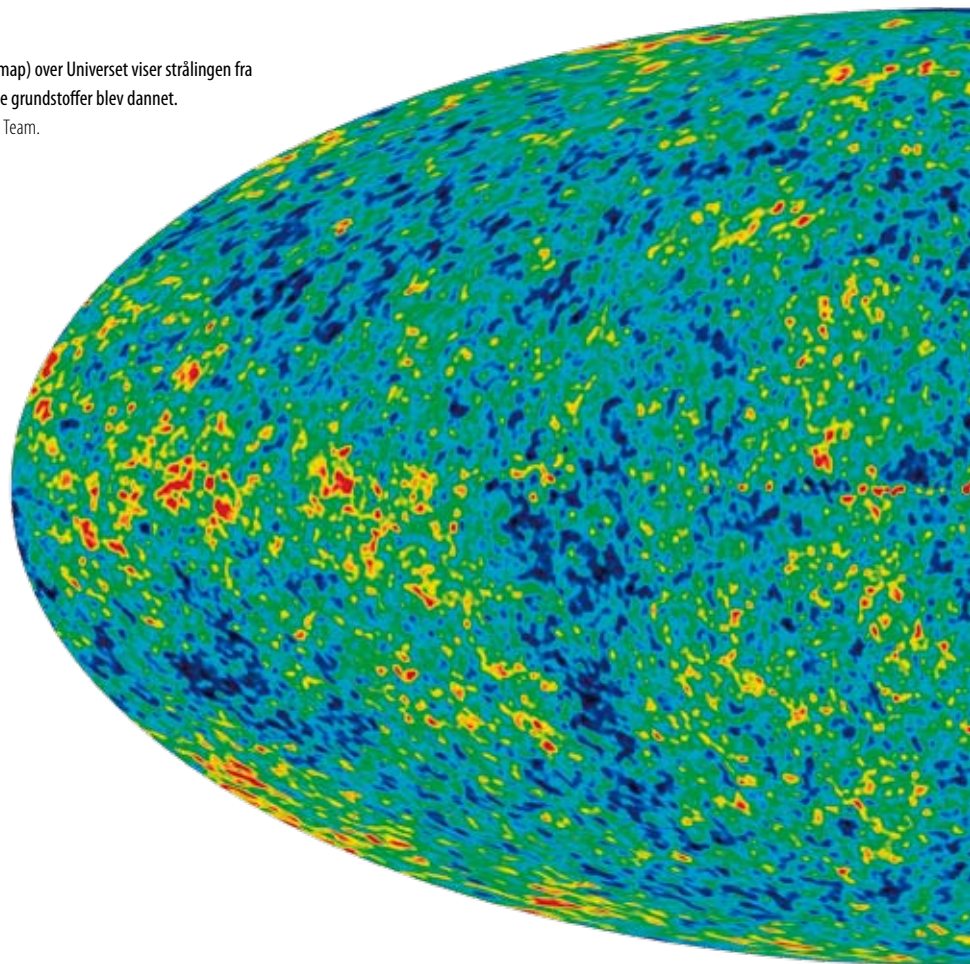
For 14 milliarder år siden fandtes der endnu ingenting!

Det er ikke bare Jorden og solsystemet, skovene og søerne, stjernerne og skyerne der endnu ikke var til. Der var ikke noget stof, ikke noget rum og ingen tid. Det er meget svært at forestille sig, og videnskaben har kun nogle meget vage ideer om, hvordan alting kan være blevet skabt ud af ingenting.

Hvad vi ved er, at for ca. 13,6 milliarder år siden var alt det, der idag findes i universet, samlet i et uhyre lille område. Måske så lille et område som et knappenålshoved. Der var intet udenom. Af dette ufatteligt kompakte og varme område blev hele universet til.

Man kan med rette forestille sig det meget tidlige univers som en suppe af energi. Der var ingen molekyler og atomer. Ingen grundstoffer. Kun uhyre varmt. Hastigt udvidede og afkøledes universet. I dag er universet ufattelig stort, men til gengæld er rummet blevet umådelig koldt. Figur 1 viser et kort over universets temperatur, målt hele vejen rundt på himlen. Der er stort set -270°C i alle retninger, men bitte små variationer i temperaturen afslører nogle af de vigtigste detaljer om, hvordan universet må have set ud lige efter det var skabt.

Figur 1. Dette kort (W-map) over Universet viser strålingen fra Big Bang, hvor de første grundstoffer blev dannet.
©NASA/WMAP Science Team.



Grundstofferne opstår

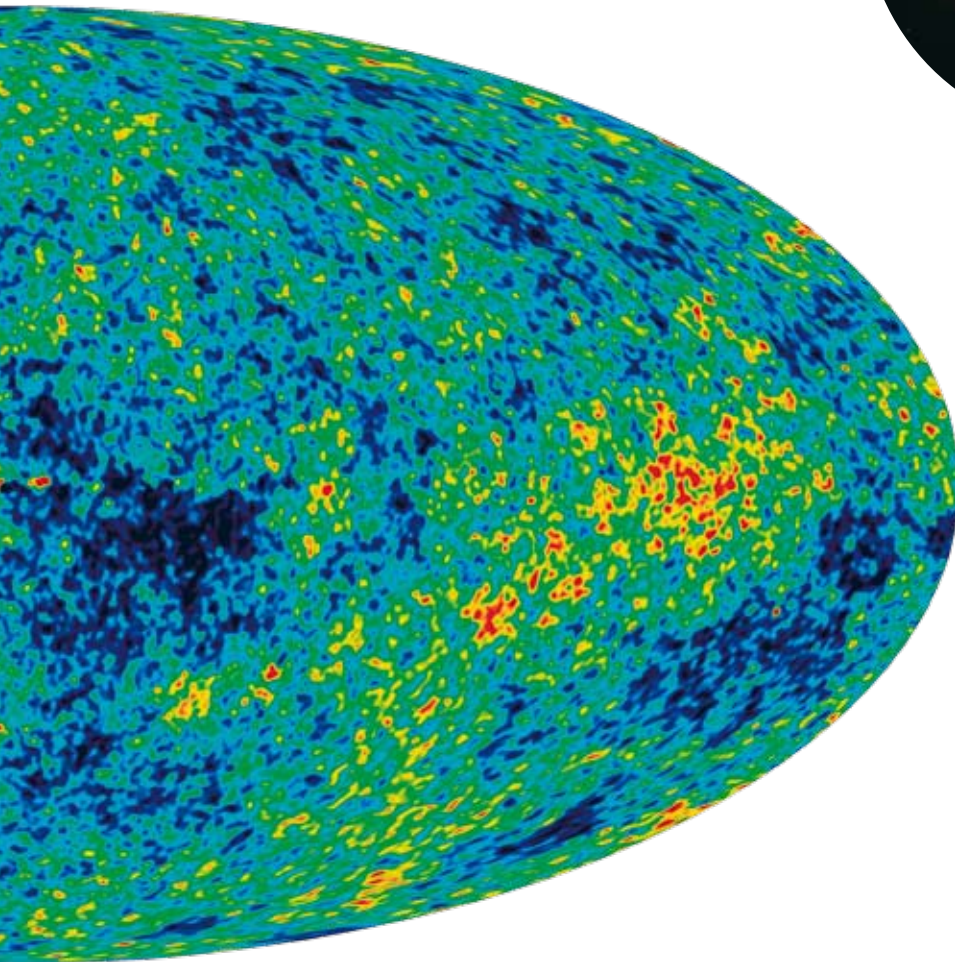
Et minut efter universet blev til, havde det udvidet og afkølet sig så meget at atom-kernepartikler begyndte at klumpe ud af "suppen". Det var protoner, neutroner og elektroner. Alle grundstofferne er opbygget af protoner, neutroner og elektroner - og intet andet. Så efter et minut var altså ingredienserne til alle grundstofferne blevet til, men der skulle endnu gå milliarder af år inden de blev til de mange grundstoffer vi kender omkring os - byggestenene i hele den fysiske verden der omgiver os.

Et grundstof er det samme som et atom. Det simpleste atom er hydrogen (brint), der består af en proton og en elektron. Brinten kom altså til universet allerede 1 minut efter dets

dannelse. Det er intet under at mere end 90% af alle atomer i universet er brintatomer.

Det næste grundstof i rækken er helium, der består af to protoner, to neutroner, og to elektroner. Grundstofferne adskiller sig fra hinanden ved antallet af protoner. Protonerne og neutronerne i et atom danner tilsammen atomkernen. Uden om atomkernen kredser elektronerne, lidt som planeterne omkring Solen. Alle grundstofferne har det samme antal elektroner i sig som de har protoner.

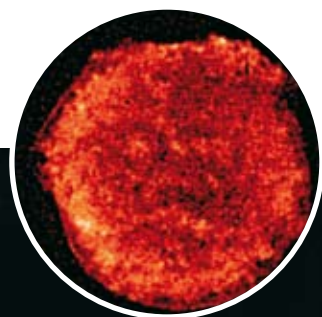
Figur 2. Den planetariske tåge Helix. Her bliver grundstoffer der er dannet i stjerner som Solen gennem milliarder af år blæst ud i Universet. © NASA/NOAO/ESA the Hubble Helix Nebula team, M. Meixner (STScI) og T.A. Rector (NRAO).



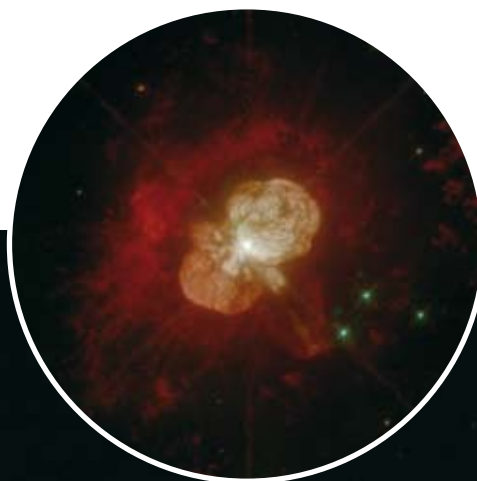
For at opbygge tungere grundstoffer end brint, må protoner og neutroner koble sig sammen til større klumper - tungere atomkerner. Engang troede man at alle de grundstofferne vi kender i naturen, kunne være dannet ved at protoner og neutroner stødte sammen i de første timer og dage af universets levetid, mens der stadig var meget varmt og store tætheder. Observationer og eksperimenter har imidlertid vist, at universets ursuppe kun dannede brint og helium, og de tre sjældne grundstoffer lithium, beryllium, og bor. Det skyldes bl.a. at neutronen er ustabil. Når den

bevæger sig frit i rummet - altså ikke sidder inde i et atom - omdanner en typisk neutron sig til en proton i løbet af ca. 10 minutter. Der var altså kun af størrelsesordenen 10 minutter til rådighed i universets begyndelse til at danne grundstoffer. Derefter var der ikke flere neutroner til rådighed til nye grundstoffer.

Figur 3. Tycho supernovaen, som er et af de steder der er blevet dannet nye tunge grundstoffer. ©Max-Planck Institut fuer Extraterrestrische Physik, Garching b. Muenchen, Germany



Figur 4. Endnu en supernova under opsejling. Her ses stjernen Eta Carinae, som er meget ustabil, og snart vil blive en ny supernova, der vil danne nye grundstoffer til vores univers. © J. Hester/University of Arizona/NASA



Stjerner som grundstoffabrikker

Ur-universet nåede kun at danne de fem letteste grundstoffer. Resten af grundstofferne er dannet gennem milliarder af år, dybt inde i stjerner. I slutningen af stjernernes liv blæses de nydannede grundstoffer ud i rummet, således at rummet mellem stjernerne langsomt er blevet - og stadig bliver - mere og mere rigt på tungere grundstoffer som kulstof, ilt, jern, guld, bly, uran, osv.

Stjernerne er gigantiske, kontrollerede fusionskraftværker der skaber energi til deres lys ved at "forbrænde" (altså fusionere) lette grundstoffer til stadig tungere grundstoffer. Det er den samme energikilde som driver en brintbombe, eller et fusionskraftværk (når vi engang får bygget et sådan). I størstedelen af stjernernes liv får de deres energi ved at omdanne brint til helium. Herved får vi altså stadig mere helium i universet, og stadig mindre brint - men endnu ingen kul og jern mv.

Mod slutningen af stjernernes liv er de blevet så varme inden i at helium kan omdannes videre til kulstof og kvælstof, og for nogles vedkommende videre til ilt, neon, aluminium, o.s.v., op til og med jern. Når stoffet er blevet til jern, kan man ikke vinde mere energi ved yderligere fusioner. Hvis stjernen er stor nok, vil stadig større områder i dens indre blive til jern. Til sidst vil der være skabt en så mægtig bobbel af jerdamp (egentlig "jern-plasma") i stjernens indre at jernatomkerne ikke længere kan modstå vægten

af sig selv. På det tidspunkt sker der noget højt bemærkelsesværdigt. Jern-atomkerne bryder sammen under deres egen vægt og bliver igen til neutroner. Neutronerne styrter sammen mod stjernens centrum, og danner til sidst en lille neutronklump - en neutronstjerne - på kun 10 kilometers størrelse.

Hver kubikcentimeter af dens stof vejer en milliard tons. Dannelsen af neutronstjernen udløser så meget energi, at hele resten af stjernen blæses ud i rummet. Det er det man ser som en supernovaeksplosion.

Eksploderende stjerner

I supernovaeksplosionen blæses det stof ud som stjernen har skabt gennem millioner af år. Astronomerne estimerer at stort set alt det ilt, fluor, neon, natrium, magnesium, aluminium, silicium, fosfor, svovl, chlor, argon, kalium, calcium, scandium, titan, vanadium, chrom, mangan, jern, cobalt, og nikkel der findes i naturen er "affaldsproduktet" fra de atomkerneprocesser der har fået de store stjerner til at lyse gennem deres liv.

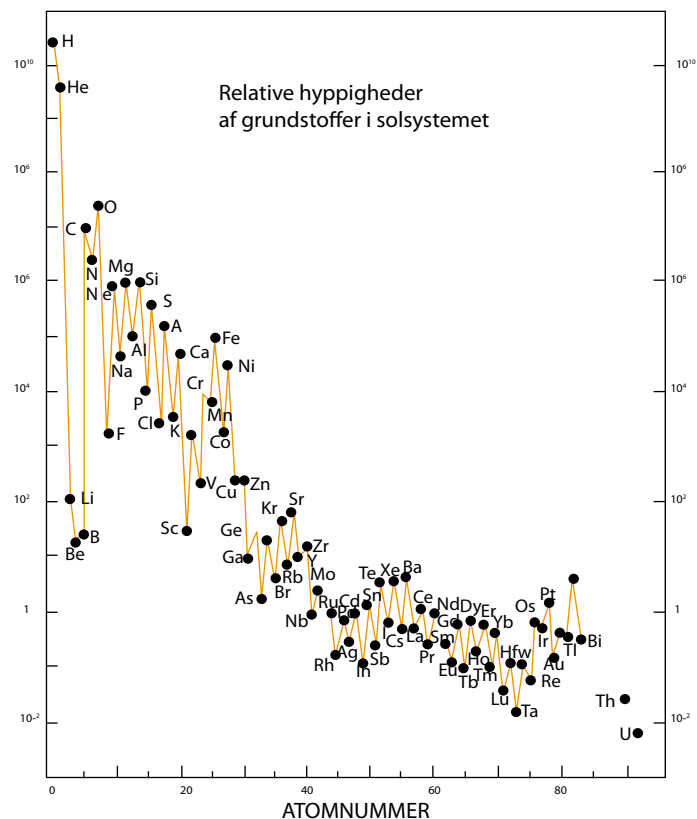
Under selve supernovaeksplosionen vil store mængder nydannede neutroner blæse gennem stjernens gasser. Herved vil specielt det jern der findes i stjernen blive ændret til meget tunge grundstoffer. Der vindes ikke energi ved disse

processer. De forbruger noget af den energi eksplosionen indeholder. Fx dannes naturens tungeste grundstof, uran, ved at jern optager de energirige neutroner fra eksplosionen. Når den radioaktive uran på Jorden henfalder over milliarder af år og opvarmer Jordens skorpe, kan man med rette sige, at det er rester fra supernovaeksplosionens enorme energireserver, der holder jordskorpen varm. Også grundstoffer som guld, platin, osmium, selen, europium, og xenon dannes på denne måde. De er alle kommet til os fra en eksploderende stjerne.

Det er kun de allerstørste stjerner der bliver til supernovaer. Stjerner der fødes med mindre end 8 gange Solens masse formår kun at forbrænde deres grundstoffer frem til kulstof og kvælstof. Herefter stopper kerneforbrændingerne. Der bliver aldrig varmt nok i deres indre til at kulstoffet kan forbrændes videre til ilt, neon, magnesium, osv. til jern. Til gengæld kommer det meste - måske alt - kulstof og kvælstof i naturen fra forbrændingerne i de "små" stjerner - altså dem der ligesom vores egen Sol aldrig vil blive til supernovaer.

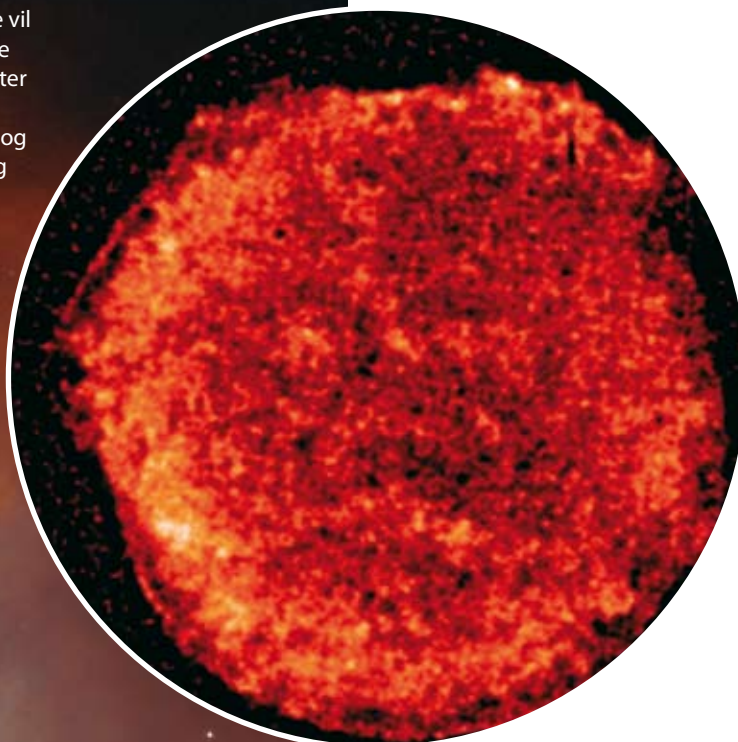
Gennem en besynderlig række af "mini-eksplosioner" i slutningen af de relativt små stjerners liv, skabes der også strømme af nydannede neutroner. Neutronerne her er forskellige i deres energi fra neutronerne i supernovaeksplosionen. Derfor danner de andre tunge grundstoffer end

Figur 5. Hyppigheder af de forskelligt naturligt forekommende grundstoffer i vores solsystem.
©: Geologisk Museum.



supernovaeksplosionerne gør. Omkring 2/3 af alle grundstoffer tungere end jern dannes her - bl.a. barium, bly, og strontium.

De små stjerner eksploderer aldrig, men de puster sig voldsomt op i slutningen af deres liv. Solen vil om ca. 7 milliarder år blive lige så stor som Jordens nuværende bane om Solen. På det tidspunkt er Solen blevet det man kalder en rød kæmpestjerne. En million milliarder tons stof vil blæses ud af Solen hvert sekund i denne fase af dens liv. Disse stoffer vil være beriget på kulstof, kvælstof, bly og mange andre stoffer der er dannet i Solens indre gennem dens liv. Måske vil varmen fra disse enorme gasmasser fordampe Jorden på det tidspunkt, og vores jordiske rester vil blæse med solstoffet ud i det interstellare rum, hvor det engang vil blive til nye stjerner og planeter, i naturens evige opbygning af stadig mere komplekse former for materie.



Meteoritter indeholder ægte stjernestøv

Af Anja C. Andersen

I 1987 fik vi fralokket kulkondritterne en velbevaret hemmelighed: De indeholder små mængder støv der ikke er dannet i solsystemet, men fandtes i det interstellare støv allerede før solsystemets dannelse. Det har vist sig at stamme fra for længst uddøde stjerner, og det har givet astronomer en helt enestående chance for at studere stjernestøv direkte i laboratoriet.

Kulkondritter

Alle stjerner - inklusive vores egen Sol - er dannet ud af de interstellare skyer der findes i mælkevejsystemet. Disse skyer (figur 1) indeholder gas og støv, og de bliver hele tiden beriget med materiale fra gamle stjerner, der mister deres yderste lag eller eksploderer som supernovaer (kapitel 1.1).

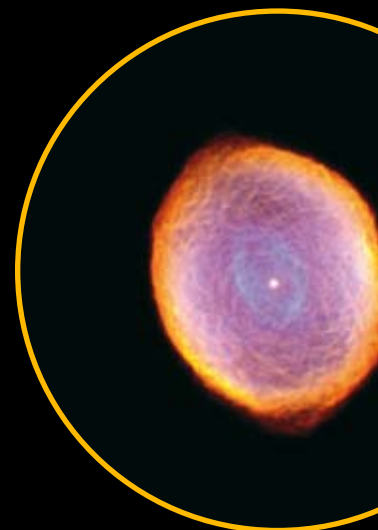
Tidligere mente man, at solsystemet var dannet af en homogen masse, fordi stoffet både var blandet grundigt sammen og blevet kraftigt opvarmet. Man forestillede sig, at alle tidligere spor eller karakteristiske egenskaber, der kunne føres tilbage til de stjerner, som har bidraget med gas og støv til solsystemet, var blevet udslettet i denne dannelsesproces (kapitel 1.3).

Inden for de senere år har det imidlertid vist sig, at dele af det oprindelige interstellare støv har overlevet uforandret under solsystemets dannelse. Dette oprindelige interstellare støv er fundet i små mængder i de meteoritter, der kun har været udsat for meget ringe påvirkning under solsystemets dannelse - kulkondritterne (kapitel 3.3). Kulkondritter har stort set den samme sammensætning af grundstoffer, som den sky der blev til solsystemet havde (figur 2).

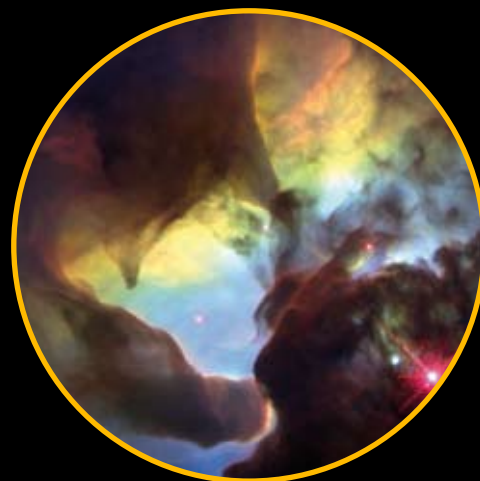
Omkring 6% af alle meteoritter er kulkondritter, men indtil 1969 fandtes der mindre end 100 kg kulkondritter fordelt på forskellige museer over hele Jorden. I 1969 faldt som manna fra himlen to kæmpemæssige stykker kulkondrit ned. Et nær byen Allende i Mexico, Allendemeteoritten, (meteoritter blev tidligere opkaldt efter det nærmeste postkontor) og et nær byen Murchison i Australien. Murchison var på 82 kg og Allende blev anslået til at have været på omkring 4 tons, hvoraf de 2 tons er blevet indsamlet. Allende eksploderede i luften og spredtes over et stort område, så mindre nye stykker findes stadig nu og da. 1969 var også året, hvor

amerikanerne arbejdede på højtryk med de forestående månelandinger, hvilket betød at mange laboratorier var godt forberedte til at analysere stenmateriale fra Månen. De støvfrie laboratorier og alt det udstyr der var beregnet til at sikre, at månestenene ikke blev forurenede med jordisk materiale, var imidlertid også som skabt til analysen af de to meteoritter. I analysen af Murchisonmeteoritten fandt man således hele 74 forskellige aminosyrer og nogle nukleotid baser, som man med sikkerhed ved ikke skyldes jordisk forurening.

Figur 3. Den planetariske tåge IC418. I midten ses stjernens kerne som er blevet til en hvid dværg. Udenom ses alt det materiale som stjernen har kastet af sig i den sidste fase af sit liv. Solen vil også udvikle sig til en planetarisk tåge om ca. 5 mia. år. ©NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).



Figur 1. Interstellar sky (Lagoon Nebula). Skyen består af gas og støv og befinder sig i vores egen galakse Mælkevejen i en afstand fra Solen på 5.000 lysår. Det er i skyer som denne at der dannes nye stjerner. Billedet er taget med Hubble Rumteleskopet. © A. Caulet/ST-ECSA/NASA.



Grundstoffernes dannelse

De to kulkondritter har vist sig at være helt afgørende for vores nuværende forståelse af solsystemets dannelse, stjernernes udvikling og grundstoffernes dannelse.

Da universet blev dannet for 13,6 milliarder år siden i "Big Bang", blev der dannet H og He samt meget små mængder Li, B og Be. Alle de andre grundstoffer er dannet efter "Big Bang" i stjernernes indre.

H og He fusionerer i en stjernes indre til nye grundstoffer. Det afhænger af stjernens masse, hvilke grundstoffer, der kan udvikles i den enkelte stjerne. Lette stjerner – som f.eks. Solen – kan danne en række bestemte grundstoffer, og når der ikke er mere brændstof, falder de sammen til hvide dværge og afskyder samtidig dele af de yderste lag og bliver til en planetarisk tåge (figur 3). Herved beriges det interstellare rum med nogle af de nydannede grundstoffer. For tunge stjerner sker det hele hurtigere og mere effektivt. De lever kortere og producerer flere forskellige grundstoffer end de lette stjerner. Tunge stjerner ender med at kollapse i en supernovaeksplosion (figur 4).

Det betyder, at forskellige isotoper er dannet i helt bestemte typer af stjerner. Det betyder også, at Mælkevejen hele tiden beriges med tungere grundstoffer. Sammensætningen af grundstoffer

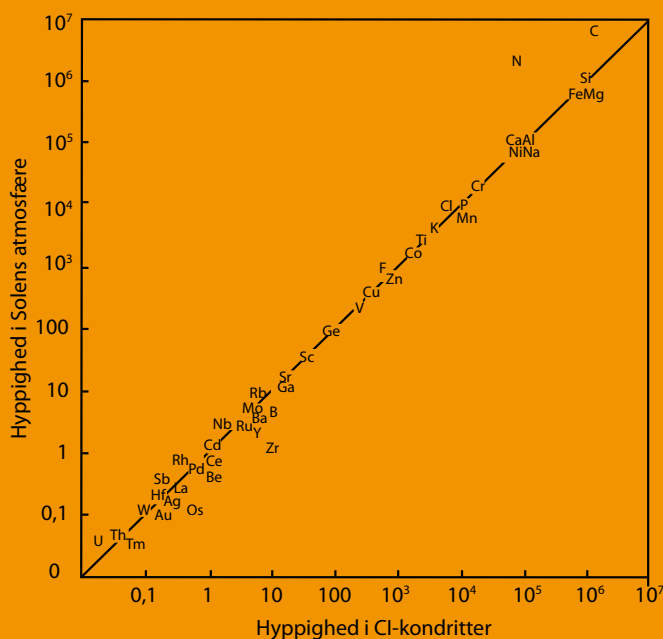
i Mælkevejen er derfor anderledes nu, end den var dengang solsystemet blev dannet for ca. 4,6 milliarder år siden. Og den vil også fortsætte med at ændre sig fremover. Universet bliver så at sige hele tiden mere og mere "forurennet" med tungere grundstoffer. Pt. udgør andelen af grundstoffer tungere end helium ca. 1% af den samlede synlige stofmængde i universet.

Identifikation af stjernestøvet

Når materialet fra en kulkondrit opvarmes til mellem 400-1000° C frigiver det gas. Ved de fleste temperaturer er sammensætningen af isotoper den samme som den normale sammensætning i solsystemet (dvs. en blanding af de kilder der findes i solsystemet for det pågældende grundstof, f.eks. oprindeligt, kosmisk stråling, solvinden osv.) (figur 2).

Når man varmer prøven op, ser man at der ved bestemte temperaturer pludselig afgives gas med en sammensætning, der er markant forskellig fra solsystemets sammensætning (figur 5). Man konkluderer derfor, at støvet må indeholde mineraler der frigiver eventuelle inklusioner af gas ved den pågældende temperatur, og at mineralerne pga. sammensætningen af den frigivende gas ikke kan være dannet i solsystemet. Da disse mineraler er blandet op i en meteorit, der aldrig har været omstruktureret siden solsystemets dannelse, må de være dannet før solsystemet, og være blandet op med solsystem-skyen under dannelsesfasen eller (mere sandsynligt) i den interstellare sky der senere kollapsede og blev til solsystem-skyen. Disse mineraler, der er dannet uden for solsystemet før solsystemet eksisterede,

Figur 2. Oversigt over grundstoffernes hyppighed i Solens atmosfære sammenlignet med grundstoffernes hyppighed i en bestemt type af kulkondritter kaldet CI-kondritter. Grafen er normaliseret pr. en million siliciumatomer. Det at grundstofferne falder på en ret linie viser at indholdet af de forskellige grundstoffer er det samme i CI-kondritterne som i Solen. Det betyder, at CI-kondritterne har præcis den samme grundstof-sammensætning som Solen og at kondritterne derfor ikke har været udsat for særlig store kemiske ændringer, siden solsystemet blev dannet. Brint, helium, kulstof og kvælstof indholdet er lavere i meteoritterne som følge af at de er på gasform, og derfor ikke så villigt lader sig indfange i sten. © GM.



repræsenterer således uforandret stjernestøv.

Ved at opløse kulkondritten i syrer og baser, udtage bundfaldet eller overvæsken, separere støvkornene efter størrelse eller gennemføre lignende kemiske og fysiske udvælgelsesprocesser på materialet, har man fået frembragt stadig renere prøver af disse mineraler. Igennem 1970'erne og 1980'erne fik man derved til stadighed indkredset mineralernes identitet mere og mere, uden dog nogen sinde at være i stand til præcis at sige, hvad det var for et materiale støvkornene bestod af.

Efter omtrent 20 års søgen lykkedes det i 1987 endelig for en forskergruppe i Chicago at isolere den støvtype, som indeholdt de karakteristiske gasser. Det viste sig at være bitte små diamanter med en størrelse på ca. 2 nm, dvs. hver diamant består af rundt regnet 1200 kulstofatomer (figur 6), så der er i virkeligheden nærmere tale om diamantrøg end om diamanstøv!

Diamanterne

Det var noget af en overraskelse at kornene viste sig at være nano-diamanter.

På Jorden er grafit den mest almindelige form som kulstof antager, eksempelvis som sod. Derfor var vi overrasket over at finde nano-diamanter i meteoritterne i stedet for grafit, for vi havde regnet med, at grafit også var den mest almindelige form for kulstof i resten af universet.

Diamanter er opbygget af kulstof, men de kan indeholde urenheder i form af bl.a. kvælstof, neon og xenon. Kvælstofatomer kan erstatte kulstofatomer i diamanstens krystalstruktur, mens neon og xenon kan sidde som enkeltatomer fanget i diamantkrystallen.

Jordiske diamanter dannes under højt tryk. De steder i universet, hvor man finder de kraftigste trykbølger, er i den chok-front, der opstår efter en supernovaeksplosion. Derfor var den første teori om de små diamanter oprindelse netop, at de blev dannet, når små grafitpartikler mødte en chok-front efter en supernovaeksplosion.

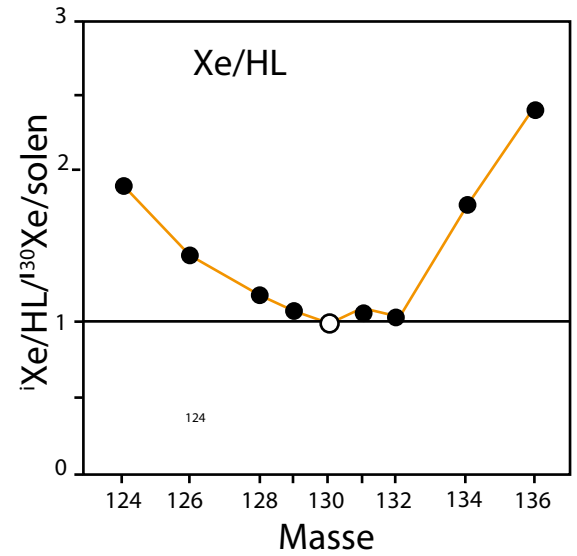
Der opstod dog hurtigt indvendinger imod denne teori, idet man også ville forvente at finde noget af den grafit i meteoritterne, som havde undgået at møde en chok-front fra en supernova. Fra Allendemeteoritten, som har den højeste mængde diamanter per gram, kan man udvinde 1 milligram diamanter per 10 gram meteorit, men man finder mindre end en titusindedel gram grafit i den samme prøve og grafitkornene er meget store i forhold til diamanterne – typisk 0,3-20 mikrometer i diameter. Det virker derfor ikke umiddelbart sandsynligt, at der har været så mange supernovaeksplosioner i tidligere tider at alle grafitkornene er blevet omdannet til diamanter.

Figur 4. Supernova-resten kaldet Krabbe tågen. Tågen er resterne af en tung stjerne der eksploderede for 900 år siden. Denne supernova-rest befinder sig 7000 lysår borte i stjernebilledet Tyren. Det er bl.a. sådanne eksplosioner der er med til at berige universet med tungere grundstoffer og nydannede støvkorn.
© NASA/ESA/ J. Hester and A. Loll (Arizona State University).

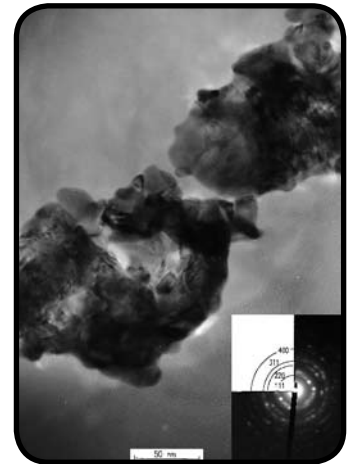
Der opstod derfor hurtigt en ny teori om, hvor diamanterne kunne være dannet. Denne teori tog udgangspunkt i, at man i industrien var begyndt at fabrikere nano-diamanter under lave tryk. Diamanter kan udkrystallisere i en kulstofgas ved lave tryk, blot der er brint tilstede. Tilstedeværelsen af brint forhindrer dannelsen af grafit. Diamanter kan dermed dannes der, hvor kulstofkoncentrationen er høj, mens trykket godt måtte være lavt. Der er primært to steder i universet hvor dette findes, nemlig i de yderste atmosfærelag af gamle, kolde, røde (~2000° C), kulstofrige kæmpestjerner og i gassen fra en ekspanderende supernova, som ifølge teorien vil indeholde et kulstofrigt område. Ud fra målinger af diamanterne er det ikke entydigt, hvorvidt de primært dannes i røde kulstofrige kæmpestjerner, som er slutstadiet i et livsforløb for en let stjerne, eller i resterne fra en supernovaeksplosion, som er slutstadiet for en tung stjerne. Selve det forhold

mellem de to kulstofisotoper – C^{12} og C^{13} – vi måler i diamanterne tyder på at de er dannet i røde kulstofrige kæmpestjerner, mens den xenon og neon, der også er målt fra diamanterne er et direkte fingeraftryk fra en supernova (oven i købet mindst to forskellige supernovaepisoder). Så når vi skal prøve at forstå dannelsen af nano-diamanter i universet må vi have for øje, at der nok er mere end blot en type stjerner, der er i stand til at danne diamanstøv. Dette er også logisk, set i den sammenhæng, at hele 3% af det kulstof der var til rådighed dengang solsystemet blev dannet, har været i form af nano-diamanter.

Hvor store mængder diamanter som disse to scenarier hver især kan producere, vil have stor betydning for vores fremtidige forståelse af, hvilken type af stjerner der er den primære bidragsyder til de kulstofatomer, som vi hver især består af.

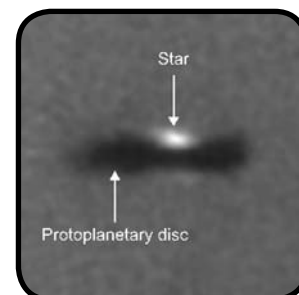


Figur 5. Hyppigheden af xenongassen som den er blevet målt i nano-diamanterne fra Allendemeteoritten. Den relative hyppighed er blevet normaliseret til hyppigheden i Solens atmosfære, og sat til 1 for Xe130. Xe124/Xe130 og Xe136/Xe130 forholdet i diamanterne er markant højere end i Solen. Det er denne forskel, der indikerer at diamanterne ikke er dannet i solsystemet men må være stjernestøv der har overlevet solsystemets dannelse. © Anders & Zinner, 1993, Meteoritics 28, 490.



Figur 6. Et transmissions elektron mikroskopbillede af nano-diamanter fra Allende meteoritten, hver klump indeholder ca. 1.000 diamanter og hver diamant består af ca. 1.200 kulstofatomer. Hver klump af nano-diamanter er ca. 0,0001 mm i diameter. © A.C. Andersen.

Solsystemets dannelse – fra støv til planeter



Figur 1. Protoplanetarisk disk set fra siden, i Oriontågen.
Copyright: Wide Fields and Planetary Camera 2, Hubble Space teleskopet, NASA. © Wide Fields and Planetary Camera 2, Hubble Space teleskopet, NASA.

(1.3) En stjerne fødes

Synet af nattehimmelen, fyldt med stjerner på en måneløs nat, holder aldrig op med at fylde os med undren over dens skønhed, og over størrelsen af universet. Dog virker de fleste stjerner kolde og fjerne, set fra Jorden. Alligevel er der én stjerne der er så blændende nærværende i vores liv, at vi nogle gange glemmer at det er en stjerne – nemlig vores sol. Solen består primært af ioniseret gas og indeholder mere end 99% af al massen i vores solsystem. Solen har dog ikke altid været som vi ser den i dag, omringet af de ni planeter. Stjerner som Solen, dannes ud fra gasskyer, der primært består af hydrogenmolekyler (brintmolekyler). Når en gassky når en kritisk størrelse, masse eller massetæthed (densitet) begynder den at kollapse under sit eget tyngdefelt. Som tågen skrumper ind vil den, ligesom en roterende skøjteløber, der trækker armene ind til kroppen, rotere hurtigere og hurtigere. Denne rotationsbevægelse får tågen til at flade ud og begynde at tage form som en skive – også kaldet den protoplanetariske disk. Sådan en protoplanetarisk disk kan på nuværende tidspunkt observeres i Oriontågen (Fig. 1) og kan muligvis give os et indblik i, hvordan vores eget solsystem kan have set ud for ca. 4,56 mia. år siden, da vores sol var i sit T-Tauri stadium. T-Tauri stjerner er helt unge stjerner med masser der minder om Solens, og som stadig undergår gravitationsbetiget sammentrækning, og

som er karakteriseret ved at have bipolære jetstrømme (Fig. 2). T-Tauri stadiet varer ca. 10 mio. år, og repræsenterer mellemeleddet mellem en protostjerne og en mindre stjerne som Solen i dens hovedfase. Det er i dette T-Tauri stadium at Solens planeter begyndte at dannes. Ved at klumpe sig sammen når de stødte sammen, blev det der startede som støvpartikler, til større og større objekter som asteroider og planeter.

Denne tilvækstproces deles almindeligvis op i tre stadier: (I) sammenklumpning af støv med partikelstørrelser på få μm , til 1-10 km store planetesimaler, (II) såkaldt "runaway growth" af de største planetesimaler, og derved dannelsen af planet-kim, og (III) sammenklumpning af planet-kim, og derved dannelsen af klippeplaneterne.

Kondritiske meteoritter og det første faste stof i solsystemet

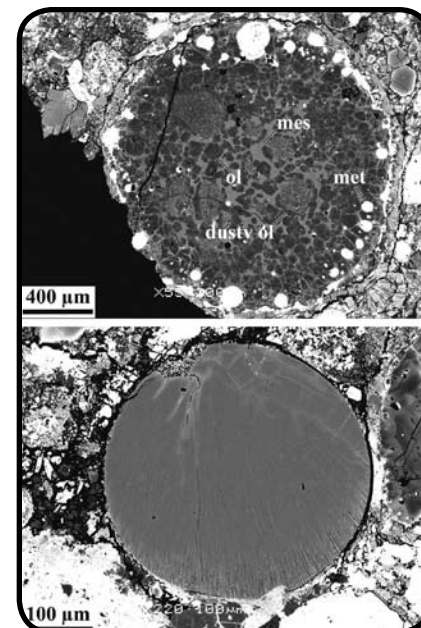
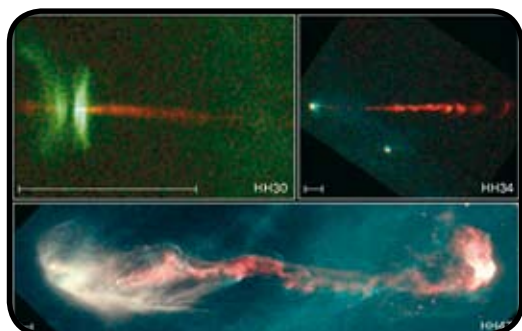
Kondritterne bliver traditionelt opfattet som de ældste og mest primitive sten fra solsystemet, og kommer fra udifferentierede asteroider, der ikke har undergået indre opsmeltning. I de fremherskende modeller for hvordan det tidlige solsystem dannedes, bliver kondritterne regnet for at være de første objekter der klumpede sig sammen af støv og partikler fra den protoplanetariske skive. (Fig. 3). Ved nøje at undersøge disse meteoritter, kan vi derfor få

et enestående glimt af de omgivelser, processer og den historie, der udspillede sig på samme tid som dannelsen af den tidlige Sol og de tidlige planet-kim.

Kondritterne består primært af kondruler, som er mm-store runde objekter der blev helt eller delvist opsmeltet i det unge solsystem, og genkrystalliseredes indenfor minutter eller timer, inden for et temperaturinterval mellem 1530 og 1030°C, inden de senere blev samlet i kondrit-moderlegemet (Fig. 4). De to primære mineraler der udkrystalliseredes i kondrulerne er silikatmineralerne olivin og pyroxen. Olivin og pyroxen er også primære bestanddele af kondritmatrixen – det finkornede silikatmateriale, der omgiver kondrulerne, og de andre mere grovkornede bestanddele i kondritterne, og som udfylder hulrummene imellem dem.

En anden vigtig bestanddel i kondritterne er de inklusioner der kaldes calcium- aluminium-inklusioner eller CAIer, som næsten udelukkende består af krystalline silikater og oxider, der er rige på calcium, aluminium og titan. De er dannet ved temperaturer på over 1030°C. Ikke alle CAIer er dannet ved opsmeltning, og ligesom kondrulerne ser det ud som om nogle CAIer har været udsat for opvarmning adskillige gange. De fleste CAIer har endvidere isotop- og elementforhold der viser at de, eller deres

Figur 2. Bipolære jetstrømme fra unge stjerner. Disse tre foto giver os et meget klart billede af en kollapsende disk af støv og gas der opbygger stjerner, og bidrager med materiale til opbygningen af planetsystemer. Billederne viser også flammekasterlignende strømme af varm gas der stammer fra dybet af flere begyndende stjernesystemer, og maskingeværilignende udbrud af materiale, der bliver skudt ud fra stjernerne med hastigheder på 500.000 km i timen. ©Wide Fields and Planetary Camera 2, Hubble Space teleskopet, NASA.



Figur 4. Back-scatter elektronmikroskop-billeder af kondruler fra Allendeteoritten. Det øverste billede viser en porfyrisk kondrule, bestående af olivin (ol) og metal (met), som sidder i en glasrig matrix (mes). Det nederste billede viser en kondrule med radierende krystaller af pyroxen. ©A. Krot.

forgængere, dannedes ved fordampning og/eller kondensation.

De mineraler der findes i CAler viser at de er dannet indenfor et relativt snævert temperaturinterval. I sjældne tilfælde indeholder CAler kun mineraler, der er stabile ved temperaturer på mere end 1380°C, men de fleste indeholder mineraler der er stabile ved ca. 1130 til 1230°C. Solsystemets alder bliver på nuværende tidspunkt fastsat efter de nyeste og mest præcise aldre på CAI, som er på 4,5672 mia. år. Denne alder er fundet i CAler fra kondritten Efremovka.

Det at forstå hvordan og hvor CAler og kondruler blev dannet, er et af de mest udfordrende problemer man står overfor i kosmokemien

Astrofysiske forhold ved CAI- og kondrulerdannelse

På nuværende tidspunkt er vi afhængige af teoretiske modeller, når vi prøver at forstå udviklingen af den protoplanetariske disk, og dens indre struktur. Vi er især interesserede i at kunne fastlægge temperaturudviklingen inde i disken, da dette kan give os vigtige oplysninger om de astrofysiske forhold der gjorde sig gældende, da CAI og kondruler dannedes. De numeriske modeller der anvendes til dette, viser at der har været ca. -75 til 530°C i diskens midtplan, ved en afstand på 1 AU (AU er

forkortelsen for Astronomisk Enhed (Unit), og er afstanden fra Solen til Jorden), og -175 til 130°C ved ca. 2,5 AU fra en stjerne der er i sit T-Tauri stadium. Vi regner med at det er i disse afstande fra Solen, at Jorden og de fleste af meteoritterne og deres bestanddele er dannet.

Det ser dog ud til at calcium-aluminium-inklusionerne dannedes ved temperaturer (1030°C) langt højere end de estimerer vi får fra midtplanet i T-Tauri stjernerne. Opvarmningen af disken forårsages imidlertid også af indfald af materiale på disken, og temperaturen i disken vil derfor stige efterhånden som masseforøgelsen tiltager. Disk temperaturen omkring en typisk protostjerne vil derfor være højere end for en stjerne der har nået sit T-Tauri stadium, og dette kan forklare hvordan CAler kan dannes indenfor 2 AU fra den centrale stjerne.

Et andet spor der kan fortælle os om calcium-aluminium-inklusionernes dannelse, er den uddøde aluminiumisotop ^{26}Al . ^{26}Al henfalder til ^{26}Mg , med en halveringstid på 730.000 år, så der er ikke noget af det oprindelige ^{26}Al til stede i dag. Størstedelen af CAlerne har et meget højt indhold af datterisotopen ^{26}Mg , i forhold til andre Mg-isotoper, og det kan bedst forklares ved at calcium-aluminium-inklusionerne engang har indeholdt ^{26}Al . Tilstedeværelsen af radioaktivt ^{26}Al i det tidlige solsystem kan forklare, hvordan vi fik opsmeltet de begyndende planetlegemer

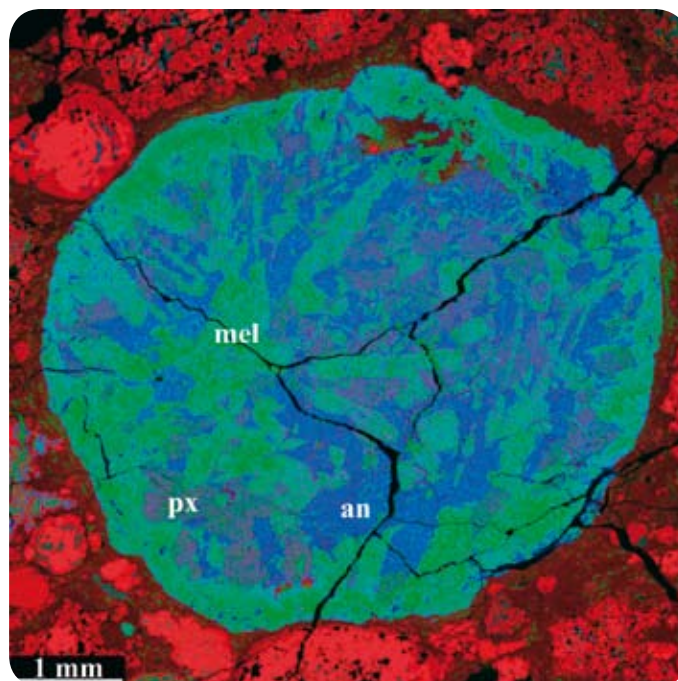
og giver os samtidig et redskab til at opklare tidsforskellene på begivenheder, der fandt sted i det meget tidlige solsystem. Nye og meget præcise målinger af Mg-isotoperne, som er foretaget ved Geocenter København, viser at de fleste CAler i vores solsystem kan være dannet inden for et interval på helt ned til 20.000 år. Denne tidsskala er ikke i overensstemmelse med den almindelige opfattelse af udviklingen i en T-Tauri stjerne, men kan sagtens stemme overens med at CAler blev dannet ved indfald på disken rundt om proto-stjernen, som en del af dens udvikling.

Til forskel fra CAlerne, har kondrulerne meget varierende overskud af ^{26}Mg , hvilket fortæller os at kondrulerne begyndte at dannes samtidigt med CAlerne, og fortsatte med at dannes helt op til 3 mio. år efter solsystemets fødsel. Endvidere har variationer imellem kondrulerne i de



Figur 3. Allendemeteoritten. ©M. Bizzarro.

Figur 5. Kombineret røntgenkortlægning, af indholdet af hhv. Mg (rød), Ca (grøn) og Al (blå) for et poleret udsnit af Efremovkameteoritten, som indeholder en magmatisk CAI. Denne CAI indeholder pyroxen (lilla), anorthit (blå) og melilit (grøn). © A. Krot.



forskellige kondritgrupper, samt sporene efter gentagne cyklusser af processer, ledt de fleste til at tro at de er dannet ved fænomener der fandt sted i hele asteroidebæltet. At kondruler er den primære bestanddel i kondritterne, fortæller os at de er dannet ved en af de vigtigste processer i nebulaen i det tidlige solsystem. Realistiske modeller for kondruledannelse må tage højde for et miljø med meget høje temperaturer, og at dette miljø nødvendigvis måtte eksistere gennem længere tid. På nuværende tidspunkt er de mest lovende forklaringer på de høje temperaturer chokbølger der muligvis skete samtidig med en gravitationelt ustabil disk og/eller sammenstød af planetesimaler.

SAH99555 – En enestående basaltisk meteorit

I 1999 opdagede et hold af franske meteoritjægere, ledt af Luc Labenne, en ny basaltisk meteorit – SAH99555 - i den nordafrikanske Saharaørken. Denne enestående meteorit tilhører en sjælden gruppe af akondritiske meteoritter der kaldes angritter. Denne gruppe af magmatiske meteoritter er opkaldt efter meteoritten Angra dos Reis (kendt som ADOR), som faldt i Brasilien i 1869. Angritter har en meget ens sammensætning af iltisotoper, og kommer fra et moderlegeme der var ekstremt forarmet på de volatile elementer – de elementer der lettest afgasser fra asteroiden. Samtidig er de fattige på silika og rige på calcium. SAH99555 er en finkornet bjergart, der primært består af aluminium- og titaniumrig pyroxen, calciumrig olivin og anorthit. Almindeligvis har man antaget at de

akondritiske meteoritter kommer fra differentierede små planetlegemer, der er dannet som en yngre generation af asteroider, i sammenligning med kondritternes udifferentierede moderlegemer. Denne tolkning er delvist baseret på at man finder CAI'er i kondritterne, samt det faktum at to angritter - ved et banebrydende studie fra 1992 af forskerne Gunter Lugmair og Steve Galer - blev dateret til at være 4,557 mia. år gamle. Selvom denne alder var den ældste præcise alder man havde fundet for nogle magmatiske meteoritter, var de stadig 10 mio. år yngre end CAI'erne.

Da SAH99555-meteoritten var frisk og uforvitret, forsøgte et hold forskere fra Geocenter København at datere meteoritten med to forskellige isotopsystemer. Det første isotopsystem er baseret på henfaldet af ^{238}U og ^{235}U til hhv. ^{206}Pb og ^{207}Pb . Dette system giver os det dateringsspecialister kalder en absolut bly-bly-alder for både mineraler, bjergarter og meteoritter. Resultatet af disse analyser gav overraskende en alder på 4,566 mia. år – åbenbart kun en million år yngre end CAI'erne! I lyset af dette resultat, fortsatte forskerne med at søge efter spor af den kortlivede isotop ^{26}Al , i form af et overskud af ^{26}Mg , ligesom for CAI'er og kondruler.

Et tidligere indhold af ^{26}Al i SAH99555 ville være af stor interesse, da det ville gøre os i stand til at datere angrit-dannelsen i forhold til dannelsen af CAI'er. Desuden ville ^{26}Al have været en kraftig varmekilde i det tidlige solsystem, der ville være stærk nok til at opsmelte hele småplaneter på kun titals kilometers størrelse, hvis de var dannet tidligt nok i solsystemets historie. Sådant en varmekilde ville give en ideel forklaring på hvordan disse små planetare objekter kunne være smeltet.

Resultaterne viste at alle angritterne indeholder små mængder af overskydende ^{26}Mg , i forhold til andet materiale fra objekter i det indre solsystem, inklusive Jorden, Månen, Mars og kondritterne. Det overskydende ^{26}Mg kan benyttes til at beregne aldre for den magmatiske aktivitet på angritternes moderlegeme, og det viser sig at den magmatiske aktivitet er ca. 3 mio. år yngre end dannelsen af CAI'erne, som er solsystemets ældste objekter. Ved at kombinere denne aldersforskel med den absolutte bly-bly-alder for SAH99555, er det muligt at beregne en ny alder for calcium-aluminium-inklusionerne på ca. 4,5695 mia. år. Denne CAI-alder er ca. 2 mio. år ældre end de tidligere bud, og viser at solsystemet nok er ældre end tidligere antaget.

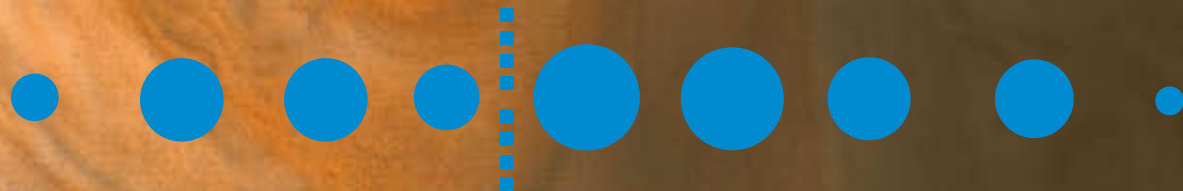
En anden vigtig betydning af de meget høje aldre for den magmatiske aktivitet på angritternes moderlegeme er relateret til de relative aldre for hhv. differentierede og udifferentierede planetlegemer, hvor hhv. de akondritiske og kondritiske meteoritter kommer fra. De nye aldre for angritterne viser os at de differentierede moderlegemer, hvor akondritterne kommer fra, må være ældre end de udifferentierede moderlegemer, hvor kondritterne kommer fra, på trods af at kondritter traditionelt anses som de ældste og mest primitive bjergarter i solsystemet. Det giver dog god mening at akondritterne er ældre end kondritterne, da den udbredte tilstedeværelse af den varmeproducerende ^{26}Al i det tidlige solsystem fik de tidligst dannede planetlegemer til at smelte op, mens de kondritiske moderlegemer dannedes 2-3 mio. år senere, hvor ^{26}Al var henfaldet så meget at det ikke længere var i stand til at forårsage opsmeltning og differentiering af planetlegemer.



Figur 6. Angriten SAH99555. Billedudsnittet er ca. 5 cm. ©Luc Labenne.

Chapter (2)

Solsystemets faste legemer



Merkur

(2.1)

Planeten Merkur er den planet i vores solsystem, der er tættest på Solen, og også en af de planeter i solsystemet vi ved mindst om.

Merkur har en meget høj massetæthed, der er en del højere end både Venus og Jordens. Det tyder på at en usædvanlig stor del af planeten består af metallisk jern. Det har også vist sig at Merkur har et magnetfelt ligesom Jorden, så dele af planetens kerne må stadig være flydende. Hvordan det er muligt, når planeten er så lille, er ikke forstået til bunds, men må enten skyldes, at kernens kemi er anderledes end Jordens kerne, eller at Solens tyngdefelt deformerer Merkur, når den i sin bane ændrer afstand til Solen. Det frigør energi i Merkurs indre og medvirker således til at holde den delvist opsmeltet.

Merkurs skorpe minder lidt om Månens højland, som primært består af anorthosit – en feldspatrig bjergart. Højest sandsynligt er Merkurs skorpe udkrystalliseret fra et globalt magmaocéan tidligt i planetens historie, ligesom det er tilfældet på Månen. Det ser ikke ud som om vulkanisme har spillet nogen betydelig rolle på Merkur, da den ikke har nogen tydelige lavastrømme på overfladen, og heller ikke er nogen nedslagsbassiner der er fyldt med lava, som i Månens tilfælde.

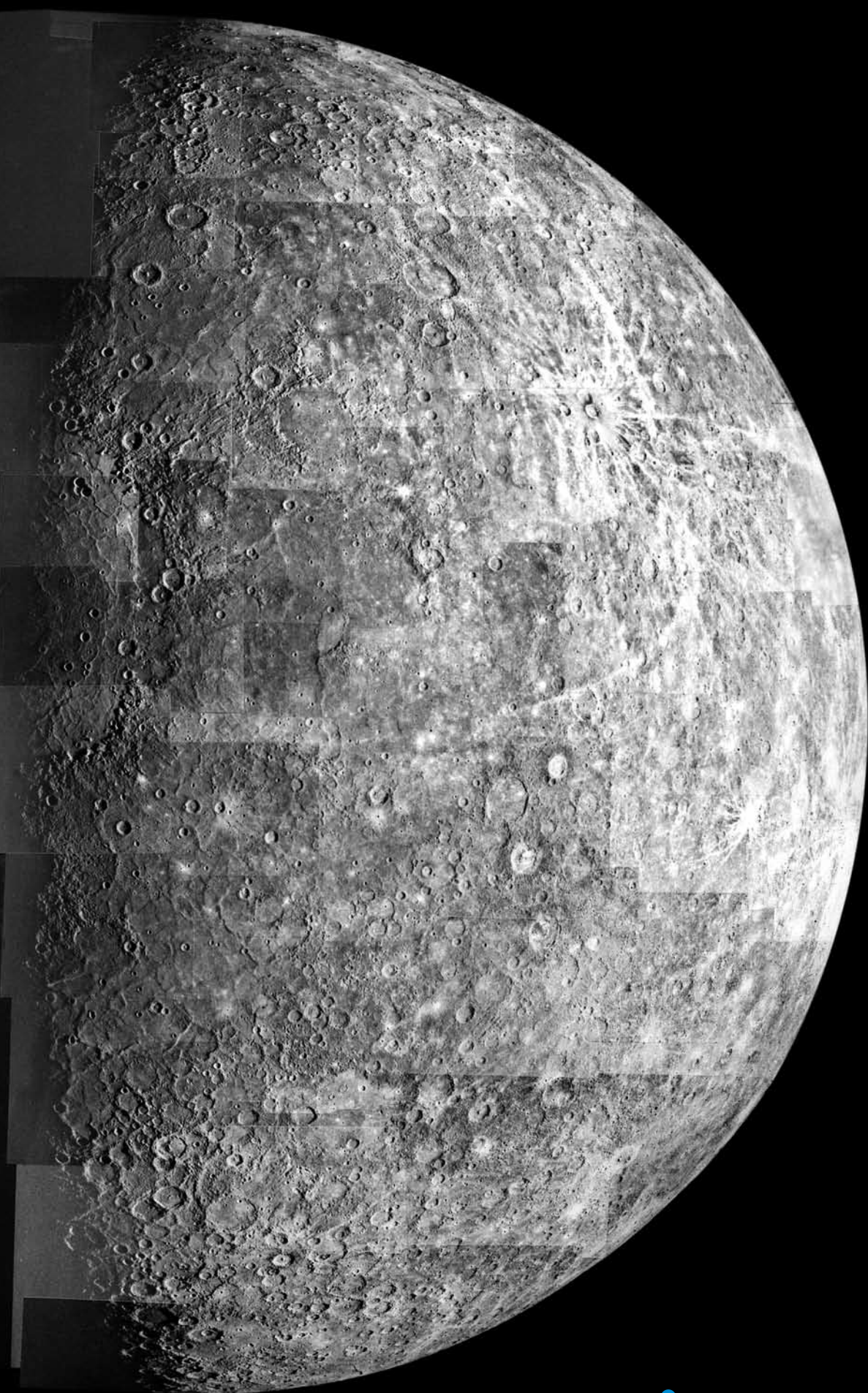
En interessant opdagelse fra Merkur er at der muligvis er is i nogle af Merkurs dybe kratere ved polerne. Det var nok et af de sidste steder man

forventede at finde is, da Merkur er så tæt på Solen.

I det hele taget er Merkur en planet vi ved ganske lidt om med sikkerhed. Den viden vi har om Merkur, stammer fra dens bevægelse rundt om Solen, dens påvirkning af og på de andre planeter, og så de billeder vi har af dens overflade, fra teleskoper og Mariner 10 sonden.

Den 3. august 2004 sendte NASA rumsonden Messenger af sted mod Merkur, som efter planen ankommer i marts 2011. Den medbringer instrumenter der ville give os en meget større forståelse af Merkur. Hvis du har lyst til at vide mere om denne mission og følge med i resultaterne, kan det gøres på:

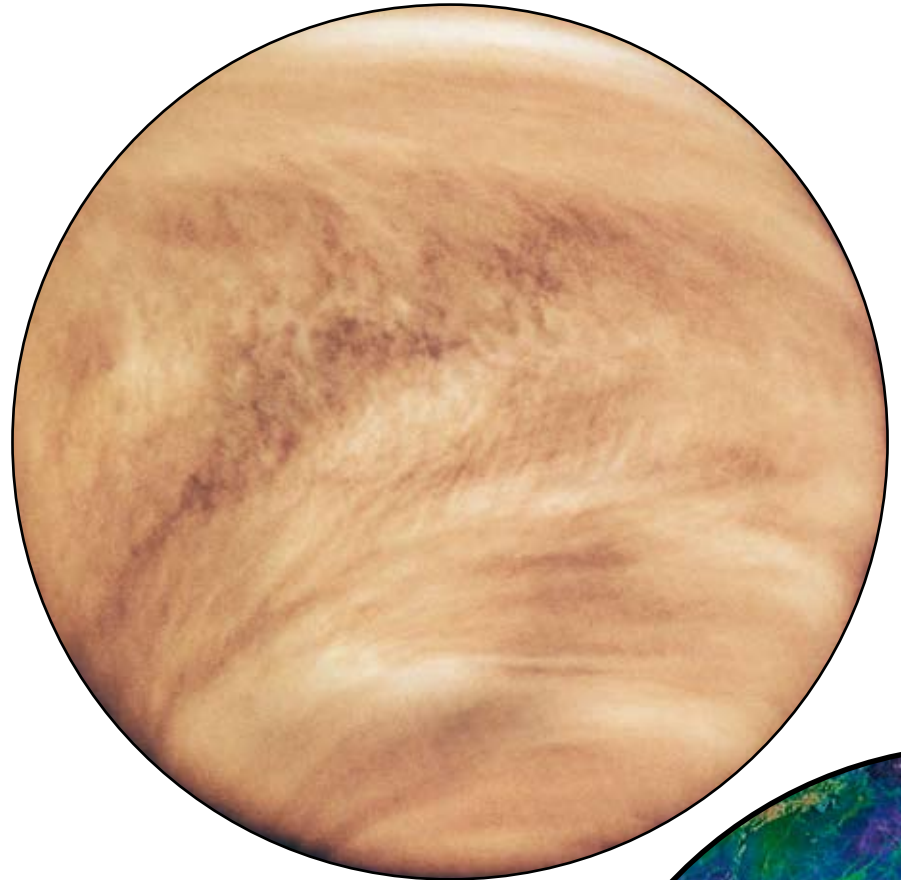
http://www.nasa.gov/mission_pages/messenger/main/index.html



Figur 1. Merkurs kraterfyldte overflade.
©NASA /JPL.

Venus

Figur 1. Her ses Venus som vi kender den, med sit tætte skydække.
©NASA



Synet af Venus på aftenhimlen farvet af Solens sidste stråler er altid betagende. Næst efter Solen og Månen er Venus det klareste objekt på himlen. Venus ligger lidt tættere på Solen end Jorden og ses derfor altid tæt på Solen. Den kan derfor kun ses på morgenhimlen lige før Solen står op eller på aftenhimlen lige efter Solen er gået ned.

Jordens tvillingeplanet?

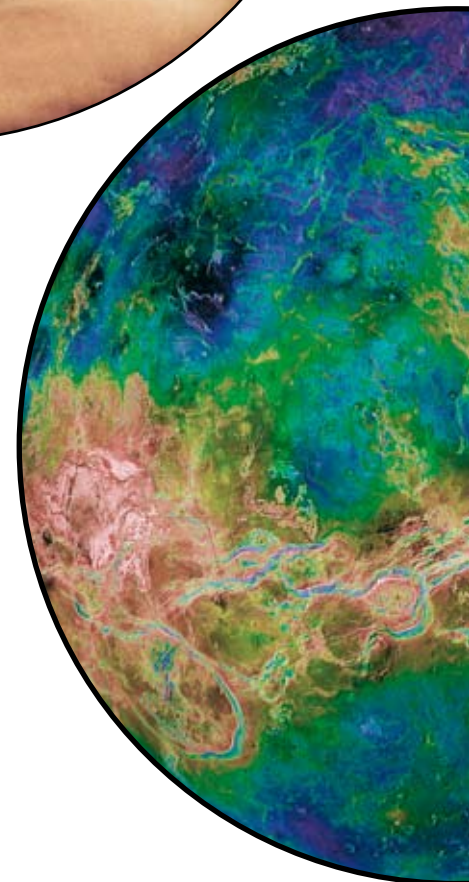
Venus, som er den anden planet fra Solen, bliver også kaldt Jordens tvillingeplanet, da den kun er lidt mindre end Jorden og stort set har samme massefylde. Det er også den planet der ligger tættest på Jorden.

Venus opbygning minder også meget om Jordens, med en indre metalkerne, en silikatkrasse og en tyndere skorpe. Dog genererer Venus ikke sit eget magnetfelt ligesom Jorden. Det skyldes formentlig at Venus roterer meget langsomt. Venus er også forskellig fra Jorden ved ikke at have nogen måne.

Skyer af svovlsyre

Venus har en atmosfære som er ca. 95 gange tættere end Jordens, med skyer der primært består af svovlsyre, og luft der består overvejende af CO_2 , og som også er meget rig på ædelgasser som argon, krypton og neon. Den tætte atmosfære gør at temperaturen på Venus overflade når op på 450°C . Det er højere end Merkurs overfladetemperatur, selvom Merkur er tættere på Solen.

Den tætte atmosfære gør det umuligt at se Venus overflade fra Jorden. Det var derfor i mange år en velbevaret hemmelighed hvad der gemte sig under det tætte skylag. I 1975 lykkedes det for Sovjetunionen at få data tilbage fra en sonde på Venus overflade. Tidligere sonder var brudt sammen på vej ned gennem atmosfæren på grund af det uventede høje tryk og den høje temperatur. Senere er det også lykkedes at kortlægge hele overfladen ved hjælp af billeddannende radar. Alle de billeder der er vist af Venus overflade her i kapitlet er radarbilleder. Lidt overraskende kan vi i dag sige at vi har kortlagt Venus overflade bedre end Jordens. Den vand og isdækkede del af Jorden er nemlig ikke lige så godt kortlagt som Venus overflade. Den overflade som radarbillederne afslørede viste sig, noget overraskende, slet ikke at ligne Jordens. Trods de to planeters næsten identiske størrelser viser det sig at de har udviklet sig meget forskelligt.



Figur 2. Højdekort over Venus, lavet ved hjælp af radarbilleder.
© NASA/JPL-Caltech

Dage længere end år

Venus roterer ikke bare ekstremt langsomt – den drejer også den forkerte vej. Hvor alle andre planeter på nær Uranus drejer med uret så drejer Venus mod uret – og bruger ikke mindre end 243 dage på at dreje en omgang. Det er faktisk længere tid end et Venus år. Venus bruger 225 dage på at bevæge sig en gang rundt om Solen. Dagens længde, dvs. den tid der går fra Solen står højest på himlen den ene dag til den står højest på himlen den næste dag er dog kortere – nemlig 120 dage.

Millioner af vulkaner

Venus adskiller sig også fra Jorden ved at have en skorpe med stort set ens tykkelse på ca. 30 km, af basaltisk sammensætning. Det ser ud som om stort set hele Venus overflade har samme alder, ca. 300 til 500 mio. år, som er dannet ved at tyndtflydende lavastrømme der har dækket hele planetens overflade indenfor en kort periode. Til sammenligning har Jordens skorpe meget forskellige aldre alt efter om man måler på den oceaniske eller den kontinentale skorpe. At der har været masser af vulkansk aktivitet på Venus, kan ses af de næsten en million større og mindre vulkaner der findes på planetens overflade.

Figur 3. Kraterne Howe (i midten), Danilova (øverst til venstre) og Aglaonice (øverst til højre) er nogle af de nedslagskratere der findes på Venus. Det mindste er 37 km stort, mens det største er næsten 63 km. På grund af den tætte atmosfære, bliver Venus kun ramt af meteoriter af en vis størrelse. De små meteoriter kan simpelthen ikke slippe ind gennem den tætte atmosfære. Så de kraterer der observeres på Venus, er alle mere end 30 km i diameter. © NASA/JPL-Caltech

Vand på Venus?

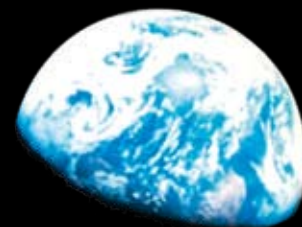
Venus har muligvis haft et ocean på mindst 4 meter og muligvis helt op til 100 meters dybde. Det kan ses på forholdet mellem deuterium og hydrogen på planeten. Der er forskellige teorier om hvorfor vandet forsvandt, hvis der rent faktisk har været noget. Nogle mener det skyldes et kæmpe nedslag i planetens tidlige historie, der var stort nok til at få planeten til at rotere den "gale" vej, og ved samme lejlighed fik oceanerne til at fordampe. Andre mener at det er den voldsomme drivhuseffekt der er skyld i at vandet er fordampet og forsvundet ud af Venus atmosfære.

Om der har været et ocean eller ej, så har det i hvert fald ikke haft en størrelse der nærmer sig Jordens oceaner, og det er hovedårsagen til de forskelle man ser mellem Venus og Jorden. Vandet er nemlig essentielt, hvis man skal have pladetektonik på en planet. Hvor hele Jordens overflade er dannet ved pladetektoniske processer, så er hele Venus overflade dannet ved såkaldt hot-spot vulkanisme, hvor et eller flere vulkancentre fungerer som en ventil til at komme af med planetens indre varmeproduktion.

Figur 4. Den 1,5 km høje og 400 km brede vulkan i midten af billedet er Sapas Mons - en af Venus utallige vulkaner. I baggrunden ses vulkanen Maat Mons. De lyse områder er lavastrømme. © NASA/JPL-Caltech

Jorden og Månen

Meteoritter er en gave til geologien, fordi de giver et indblik i de processer som oprindeligt dannede Jorden. De geologiske processer, som gør Jorden til en dynamisk og beboelig planet nedbryder hele tiden gamle overfladebjergarter og erstatter dem med nye. Derfor er alle spor af de bjergarter som dækkede overfladen på den unge Jord forsvundet. Vi kan kun spekulere over hvordan miljøet på Jordens overflade var og hvilke processer der opererede.



Af Mikik Rosing

Hvad meteoritter kan fortælle om Jorden

(2.3)

Meteoritterne kommer næsten alle fra et stort set begivenhedsløst fjernlager mellem Mars og Jupiter. Her har de ligget næsten uforandrede siden solsystemets oprindelse. Med jævne mellemrum sender dette asteroidebælte vareprøver til os videbegærlige jordboere. På den måde får vi adgang til prøver af de byggesten vores verden oprindeligt blev konstrueret af.

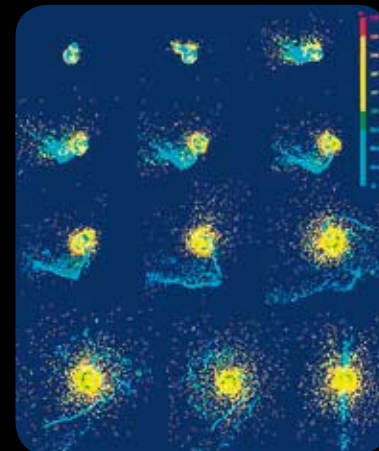
De fleste meteoritter er brudstykker af mindre legemer, som alle har deltaget i forskellige tilløb til dannelse af egentlige planeter, men som er gået i stå i forskellige stadier af udviklingen. Meteoritter belyser derfor de allertidligste processer i Jordens opbygning. Nogle meteoritter, kondritterne, repræsenterer det primitive materiale som vores Jord er dannet af. Ved at analysere deres sammensætning kan vi finde den gennemsnitlige sammensætning af Jorden. Denne viden er uhyre vigtig, fordi alle de materialer vi har på Jorden i dag er udtaget af dette gennemsnitsmateriale ved kemiske

processer som har sorteret grundstofferne. Når vi studerer kontinenterne, havvandet eller atmosfæren, kender vi altså både det oprindelige materiale de er udtaget fra, og deres sammensætning i dag. Vi kan altså se hvilke grundstoffer som er koncentreret og hvilke der mangler i forhold til udgangspunktet. Med den viden kan vi forstå de processer som har dannet bjergene, havene og luften, og vi kan også tit beregne hvornår sorteringen fandt sted. Vi kan tidsfæste processerne fordi radioaktive grundstoffer og de grundstoffer de med tiden omdannes til også adskilles ved sorteringsprocesserne. Hver sorteringsproces nulstiller derfor sit eget radioaktive stopur.

Vi kan nu sige at Jorden blev opbygget som planet ganske kort tid efter solsystemets begyndelse for 4.569 millioner år siden. Småpartikler i Solens nebula samledes i stadig større klumper. Klumperne kolliderede og opbyggede såkaldte planetesimaler, som igen smeltede sammen og dannede egentlige planeter. Det tidlige støv indeholdt store mængder af radioaktive stoffer som

producerede varme. Små partikler kunne nemt skille sig af med varmen, men efterhånden som de klumpede sammen i stadig større legemer ophobedes den radioaktive varme, og legemerne begyndte at smelte. Jern og nikkel smeltede og sank i dybet, hvor det dannede kerner af flydende metal. De lette grundstoffer fordampede og opbyggede en tidlig atmosfære, medens store dele af stenmaterialet smeltede og dækkede Jorden med et flere hundrede kilometer dybt magmaocean. Ud fra de radioaktive isotoper ved vi at Jorden var samlet til nogenlunde sin nuværende størrelse og havde udskilt sin jernkerne allerede ca. 20 millioner efter solsystemets dannelse.

Figur 1. Her ses en simulation af det månedannende nedslag, hvor en meteor på størrelse med Mars smeltede sammen med Jorden. Noget af materialet fra dette nedslag dannede Månen. © Southwest Research Institute.



Månen dannes

På dette tidlige tidspunkt havde Jorden en søsterplanet som kredsede i næsten samme afstand fra Solen. Søsterplaneten har mindet meget om Jorden i sin opbygning, men var betydelig mindre. Nogenlunde på størrelse med Mars. To planeter i næsten samme afstand fra Solen var en farlig konstruktion, som kun holdt i ganske kort tid. Inden for de første 20 millioner år kolliderede de to planeter med ufattelig kraft. Enorme mængder af stenmaterialet fra de ydre lag af de to planeter blev slynget bort fra kollisionen, medens de to jernkerner smeltede sammen til den kerne Jorden har i dag.

En stor del af det materiale som blev slynget ud ved kollisionen faldt tilbage til Jorden, mens de fjernest liggende stumper samlede sig og dannede et nyt himmellegeme – Månen. Månen består næsten udelukkende af stenmateriale som det der danner Jordens ydre del, kappen, og den har ingen eller kun en meget lille metalkerne. Umiddelbart efter kollisionen var en stor del af Månen smeltet til et dybt magmaocean. Magmaet blev afkølet mod det kolde verdensrum

og dannede en skorpe af bjergarten anorthosit, som næsten udelukkende består af det kridhvide mineral feldspat. Det er denne skorpe som giver Månen sit klare hvide skin. Gennem tiden har meteornedslag på Månen slået større og mindre huller i skorpen, og da Månen ikke har nogen geologisk aktivitet forsvinder arrene ikke med tiden. I forbindelse med meget store nedslag opstod kratere som er adskillige hundrede kilometer i tværsnit. Basaltmagma trængte senere op fra dybet og fyldte de store kratere med sort basaltisk lava. De mørke områder som vi kalder "Månens have" (mare) fordi man i gamle dage mente, at det var have som dem vi har på Jorden er altså i virkeligheden størknede lavasøer.

Vores søsterplanet ramte os skævt ved den kollision som dannede Månen og derfor kom Jorden til at rotere om sin egen akse og Månen til at kredse om den samme akse. Vi har altså arvet vores døgn- og månedsrytme fra den sidste gigantkollision i en række af begivenheder som førte til dannelsen af vores planet fra en oprindelig støvsky.



Figur 3. Jorden og Månen set fra Galileosonden i 1992 på dens vej til Jupiter. © NASA/JPL.

Figur 4. Månen set fra Galileosonden. Man ser tydeligt Månens gamle lyse urskorpe og de yngre mørke mare-områder. © NASA/JPL.



Livets opståen

De første titals af millioner år var således meget hektiske, og der var ikke stabile miljøer på jordoverfladen over længere tidsrum. Meget overraskende har det imidlertid vist sig, at allerede 150 millioner år efter solsystemets begyndelse var Jordens overflade størknet og nedkølet nok til at vanddamp i atmosfæren kunne fortættes og danne de første oceaner. Det ved vi, fordi der i Australien er fundet 4,4 milliarder år gamle korn af mineralet zirkon som er dannet i kontakt med havvand. De ældste rigtige sammenhængende bjergartsområder vi kender på Jorden findes i området omkring Nuuk i Vestgrønland. Her er bevaret store områder af bjergarter, som oprindeligt blev dannet på Jordens overflade og som derfor bærer på en

geologisk hukommelse om tilstandene da de blev aflejret for 3.800 millioner år siden. Ud fra disse gamle sedimentære bjergarter kan vi se at livet allerede da florerede i havene. Der har altså været liv på Jorden i mindst 3.800 millioner år.

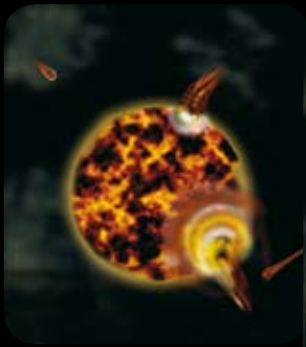
De ældste bjergarter er bevaret fordi de indgik i opbygningen af kontinenterne. Meget tyder på at Jorden først for alvor begyndte at danne kontinenter for 4 milliarder år siden. Kontinenter er ikke blot landområder der tilfældigvis stikker op over havet. Kontinenterne består af specielle lette bjergarter, hovedsagelig granit, som ikke findes på oceanbunden. Oceanerne er store fordybninger hvor bjergarterne er domineret af den mørke tunge bjergart basalt (ligesom Månens have). Grunden til at oceanbunden

ligger lavt og kontinenterne højt er simpelthen at kontinenterne består af lettere materiale og derfor flyder højere på den varme, bløde og tunge kappe nedenunder.

Alt i alt var Jorden i grove træk færdigkonstrueret med alle dens vigtigste komponenter for ca. 3.800 millioner år siden.

Månens betydning for Jorden

Jordens måne er meget stor i forhold til Jorden sammenlignet med de andre planeter og deres måner. Månen roterer med Jorden i en afstand af ca. 385.000 km og en tur rundt om Jorden varer en måned, som i virkeligheden er ca. 27



For 4.567 mio. år siden samledes Jorden ud fra materiale der i sammensætning mindede meget om de kondritiske meteoritter. Jernkernen udskilte sig kort efter.



Igennem de næste 850 mio. år producerede Jorden ikke nogen konstruktioner der varede ved.

Oceanerne dannedes højst sandsynligt for 4,4 mia. år siden på Jordens overflade.

Dette giver mulighed for at livet opstod for 4.400 mio. år siden.

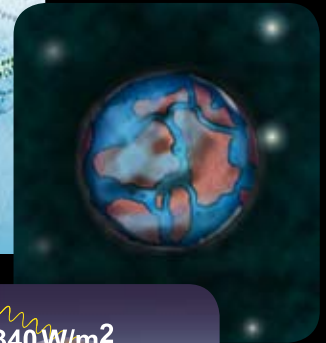


For 3.800 mio. år siden trivedes livet i havene og fotosyntese har nok fundet sted.

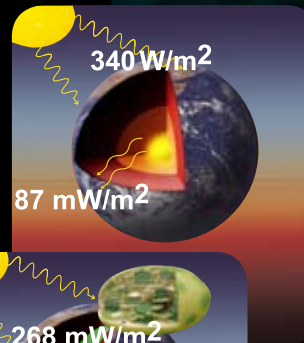


For 3.800 mio. år siden stabiliseredes kontinenterne nok til at små bidder kunne bevares frem til i dag.

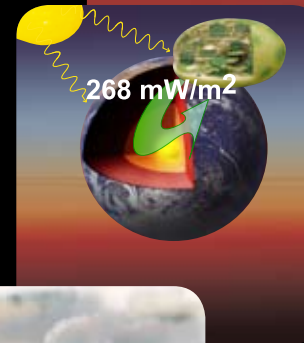
Stabiliseringen af kontinenterne markerer begyndelsen af den geologiske tidssøjle. Nogle velkendte miljøer kendes helt fra starten.



Jordens pladetektoniske maskine drives af den indre varmeproduktion som bidrager med 87 mW for hver m² af Jordens overflade. Til sammenligning bidrager Solen med 340 mW/m² til Jordens overflade.



Klorofyl indfanger 268 mW/m² af Solens energi og omsætter den til kemisk energi, som hjælper med at holde Jordens geokemiske cyklus i gang.



At fotosyntetisk liv satte skub i den geokemiske cyklus, kan have accelereret granitproduktionen og medvirket til stabiliseringen af kontinenterne.



dage og 8 timer. Jordens rotation om sin egen akse tager som bekendt 24 timer. Det vil sige at Jorden roterer under Månen, så Månens tyngdetiltrækning trækker i forskellige dele af Jorden i løbet af døgnet. Jorden selv er relativt stiv og robust bygget, men ikke desto mindre ændrer selve Jorden form på grund af påvirkningerne fra Månen. Fænomenet kaldes tidejord og betyder at punkter på jordoverfladen hæver og sænker sig ca. 20 cm i løbet af et døgn. Oceanerne har selvfølgelig meget nemmere ved at ændre form, og det betyder at en tidevandsbølge på omkring 1 meters højde skyller over Jorden i løbet af døgnet, eller rettere,

Mars

Sin beskedne størrelse til trods er Mars en af de mest spændende planeter i solsystemet. Det er ikke tilfældigt at Mars helt uden konkurrence er den planet i solsystemet der sendes flest sonder til fra Jorden. Landskabet på Mars overgår på flere måder Jordens, den har iskapper, atmosfære og et varierende klima. Men den væsentligste årsag til udforskningen er at der har været masser af vand på Mars – og hvor der er vand kan der også være liv.

Mars' opbygning

Mars er den fjerde planet fra Solen, og dermed nabo til Jorden. Med en gennemsnitlig diameter på 5.794 km er den meget mindre end Jorden og har hele to måner, Phobos og Deimos.

Hele Mars' overflade er dækket af et tyndt lag af rødt støv, som skyldes at det jern der er i støvet, simpelthen er rustet. Det røde støvlag er grunden til at Mars bliver kaldt den røde planet. Den røde farve gør det også nemt at kende Mars på himlen – selv når man ser den her fra Jorden kan man se at den er noget specielt.

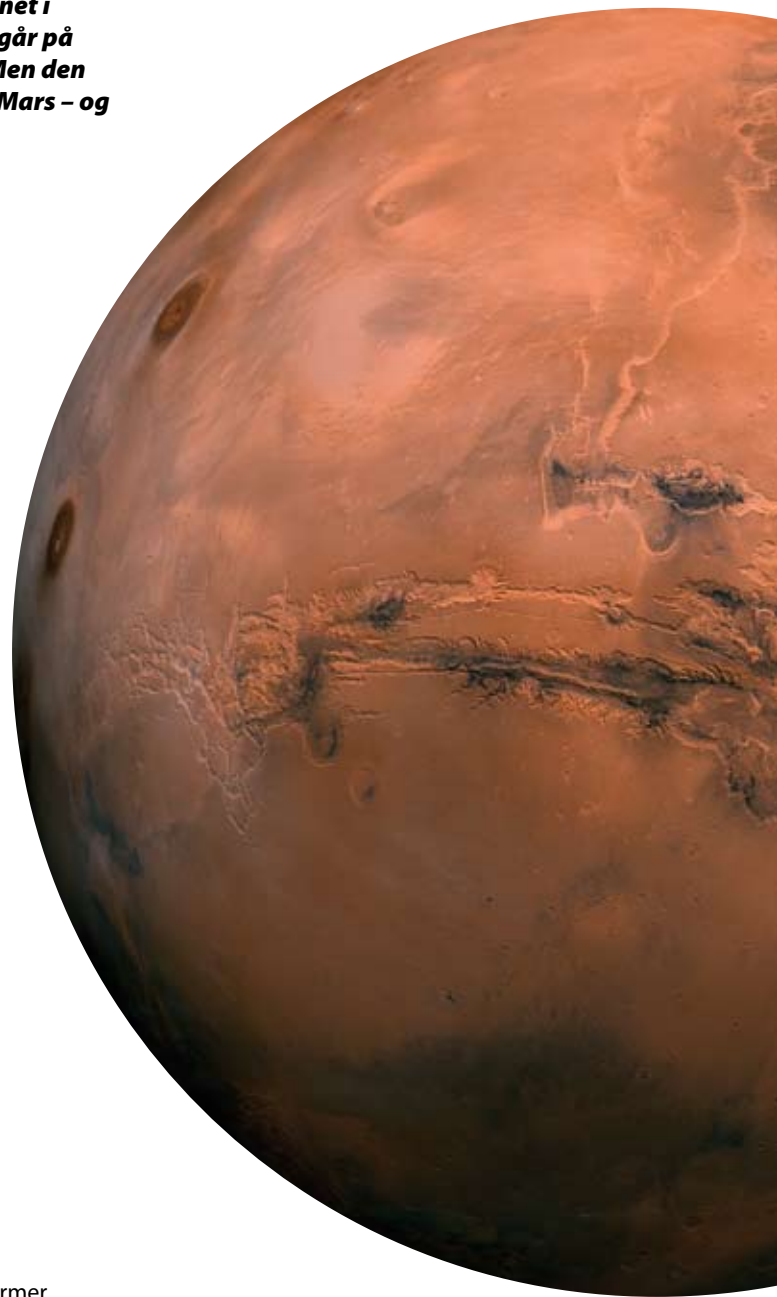
Mars' klima ligner Jordens mere end nogen anden planet. Selvom der er en gennemsnitlig årstemperatur på -55°C , kan temperaturen nå op på 20°C ved ækvator om sommeren.

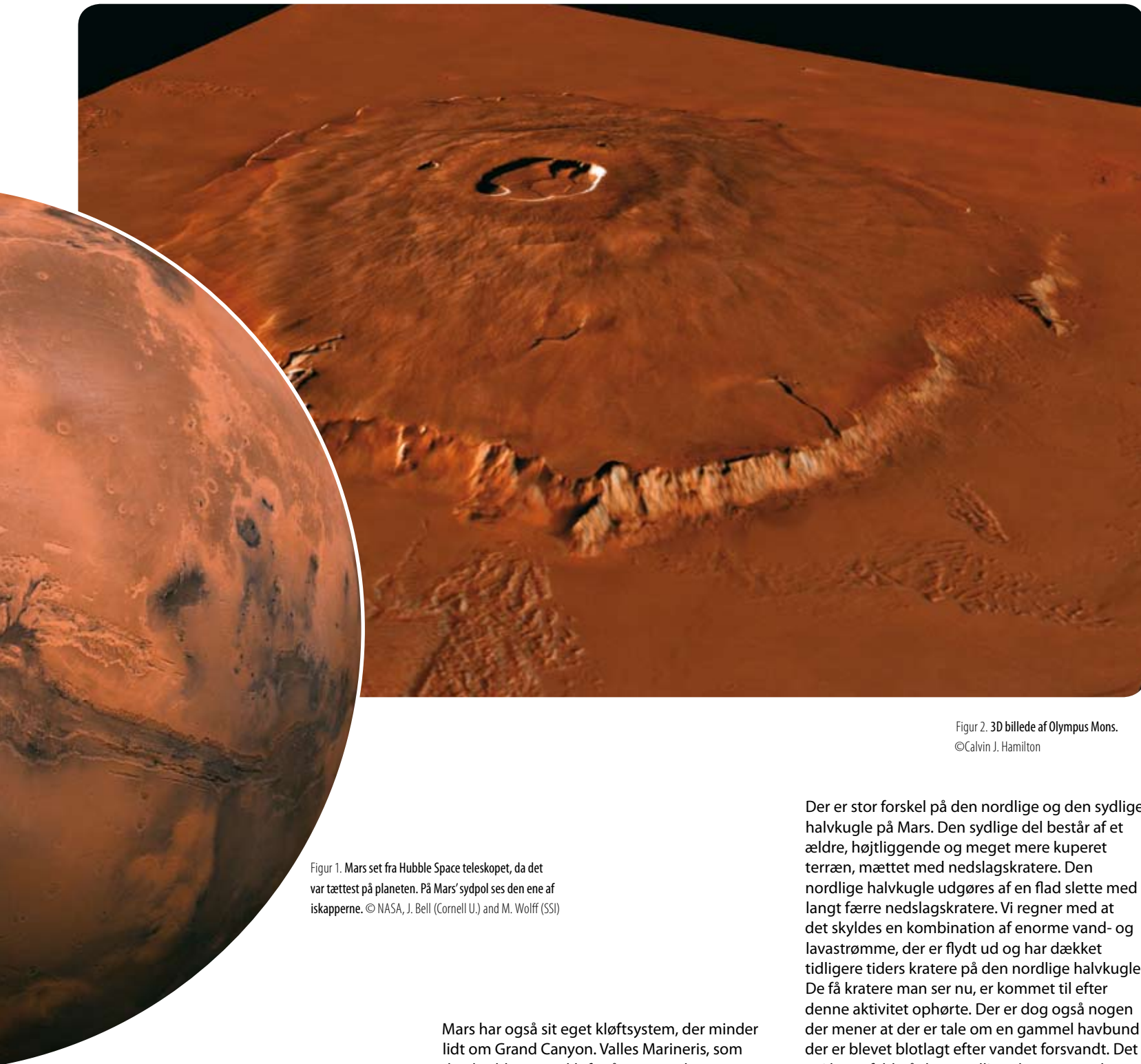
Dagslængden på Mars er i gennemsnit på 24,6 timer, og ligner også på denne måde Jorden. Til gengæld tager det Mars 687 dage at nå en gang rundt om Solen, mod Jordens 365 dage.

Mars' øvre del (lithosfæren) har en gennemsnitlig massefylde der minder om jordisk basalt. Skorpen, som er den alleryderste del af lithosfæren, er i gennemsnit mindst 40-50 km tyk, og udgør ca. 4% af Mars' samlede volumen. Kernen har en radius på 1300-1500 km, og udgør godt 20% af Mars.

Mars' overflade

Mars har nogle utrolige landskabsformer. Man kan både se den største og den højeste vulkan i vores solsystem på Mars. Den højeste vulkan, Olympus Mons, når 23 km op over det omkringliggende terræn. Til sammenligning er det højeste bjerg på Jorden, Mount Everest, "kun" knap 9 km højt. Jordiske bjerge kan ikke blive meget højere end Mount Everest fordi tyngdekraften hele tiden forsøger at jævne overfladen ud. På Mars er tyngdekraften mindre og Mars' skorpe er også tykkere end Jordens. Det er hovedårsagerne til at der kan opbygges så stort et bjerg på Mars.





Figur 1. Mars set fra Hubble Space teleskopet, da det var tættest på planeten. På Mars' sydpol ses den ene af iskapperne. © NASA, J. Bell (Cornell U.) and M. Wolff (SSI)

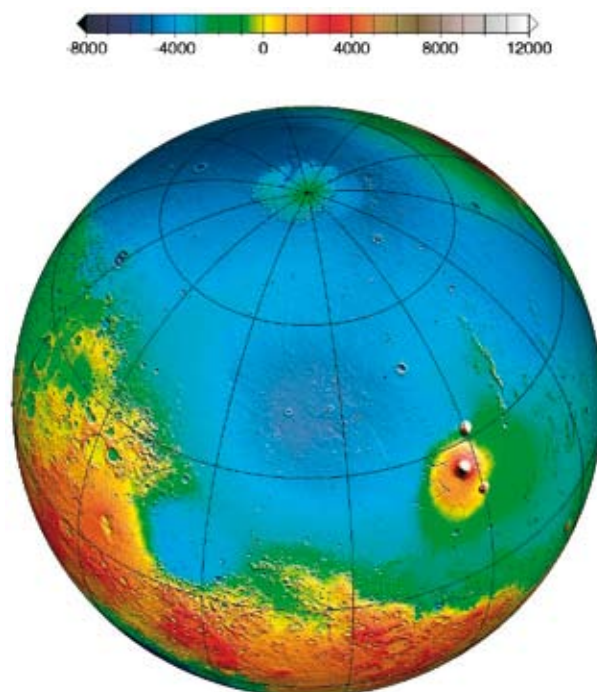
Figur 2. 3D billede af Olympus Mons.
©Calvin J. Hamilton

Mars har også sit eget kløftsystem, der minder lidt om Grand Canyon. Valles Marineris, som den hedder, er en kløft på mere end 3.000 km. Det svarer til afstanden fra vestkysten til østkysten af USA. Kløften skærer igennem Mars overflade, med en maksimal dybde på 8 km. Selvom selve kløften ikke er gravet af vand viser den tydelige tegn på vand-erosion, og det anslås at der i perioder er løbet ikke mindre end 5 km³ vand igennem kløften i sekundet. Det er 15.000 gange mere end vandstrømmen gennem Amazonfloden når regntiden topper. Mars er derved den eneste anden planet end Jorden i vores solsystem, der viser spor efter en hydrologisk cyklus.

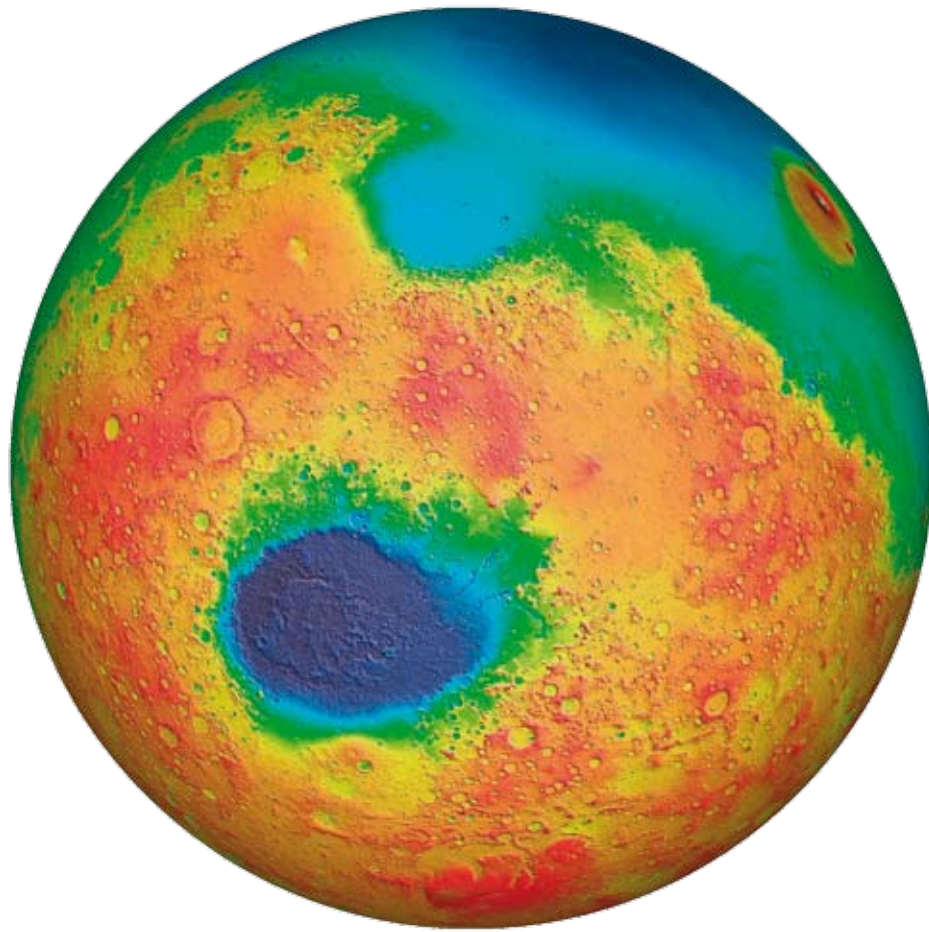
Der er stor forskel på den nordlige og den sydlige halvkugle på Mars. Den sydlige del består af et ældre, højtliggende og meget mere kuperet terræn, mættet med nedslagskratere. Den nordlige halvkugle udgøres af en flad slette med langt færre nedslagskratere. Vi regner med at det skyldes en kombination af enorme vand- og lavastrømme, der er flydt ud og har dækket tidligere tiders kratere på den nordlige halvkugle. De få kratere man ser nu, er kommet til efter denne aktivitet ophørte. Der er dog også nogen der mener at der er tale om en gammel havbund der er blevet blotlagt efter vandet forsvandt. Det er i hvert fald på den nordlige slette at vandet ville have samlet sig, da sletterne på den nordlige halvkugle ligger ca. 7 km lavere end højlandene på den sydlige halvkugle.

Mars' atmosfære

Mars' atmosfære er meget forskellig fra Jordens nitrogenrige atmosfære. Udover at være meget tyndere end Jordens atmosfære, består Mars' atmosfære primært af CO_2 . Det modsatte er tilfældet i iskapperne på Mars, de består hovedsageligt af vand-is. Kun en meget lille brøkdel af isen på Mars består af vand (H_2O). Der er perfekt overensstemmelse mellem Mars' atmosfære og gasindholdet i de meteoritter som menes at komme fra Mars. Det er blandt andet derfor at vi kan fastslå at disse meteoritter er fra Mars, da de forskellige planeters atmosfærer er lige så forskellige som menneskers fingeraftryk.



Figur3. Topografisk kort over Mars' sydlige halvkugle.
© MOLA Science Team



Figur 4. Topografisk kort over Mars' nordlige halvkugle.
© MOLA Science Team

Mars poler og iskapper

Af Christine Hvidbjerg

Polare iskapper på Mars

Mars er den eneste anden planet, udover Jorden, hvor man har fundet iskapper af frossent vand. Iskapperne er formet i et gigantisk spiralmønster, som ikke kendes tilsvarende fra Jordens iskapper. I iskapperne kan man se en fin lagstruktur, som fortæller om fortidens klimaændringer på Mars ligesom årringene i et træ.

Is på Mars

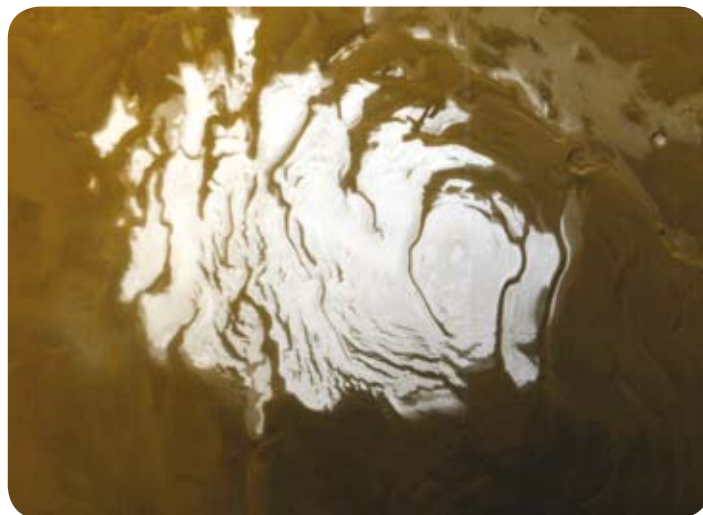
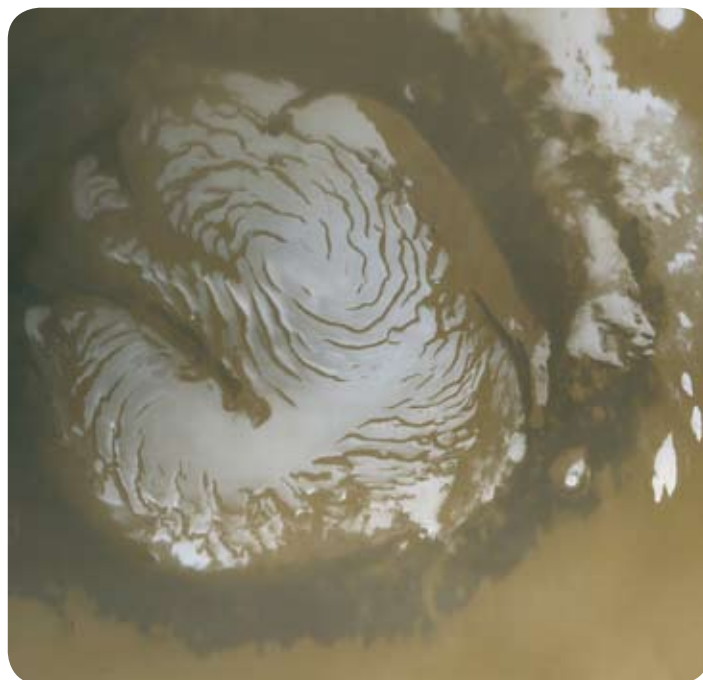
Der findes to slags is på Mars: Almindelig is og tøris. Almindelig is er frossent vand, dvs. H_2O , som vi kender fra Jorden hvor det findes i iskapper og gletschere. Tøris er frossen CO_2 . Frossen CO_2 kaldes tøris fordi det fordamper i stedet for at smelte.

Vintersneen på Mars består mest af tøris. Om vinteren bliver det så koldt i de polare egne, at det sner med tøris. Tørisen fordamper igen om foråret. Snedækket kan ses fra Jorden i kikkert, og i århundreder har man kendt til Mars' "polkalotter", som kommer og går ved vintertid.

Langt det meste af det vand (H_2O) man har fundet på Mars findes som frossen is i de polare iskapper. Iskapperne er opbygget gennem millioner af år og er på størrelse med Grønlands Indlandsis.

Kappernes lagdeling og spiralstruktur

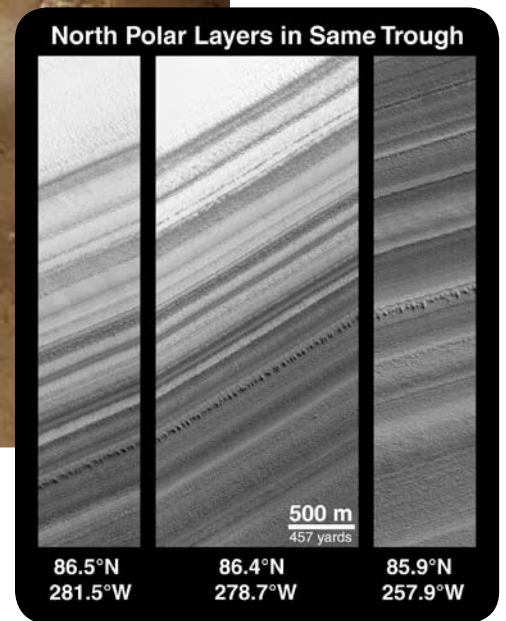
På iskapperne danner udstrakte hvide terrasser og mørke skrånninger et gigantisk spiralmønster omkring polen. I de mørke skrånninger kan man se lag med skiftende støvindhold. Lagene kan følges over store afstande og viser at klimaet har varieret igennem Mars' historie.



Figur 1. Iskappen i nord (øverst) og i syd (nederst).
©NASA/JPL/MSSS.

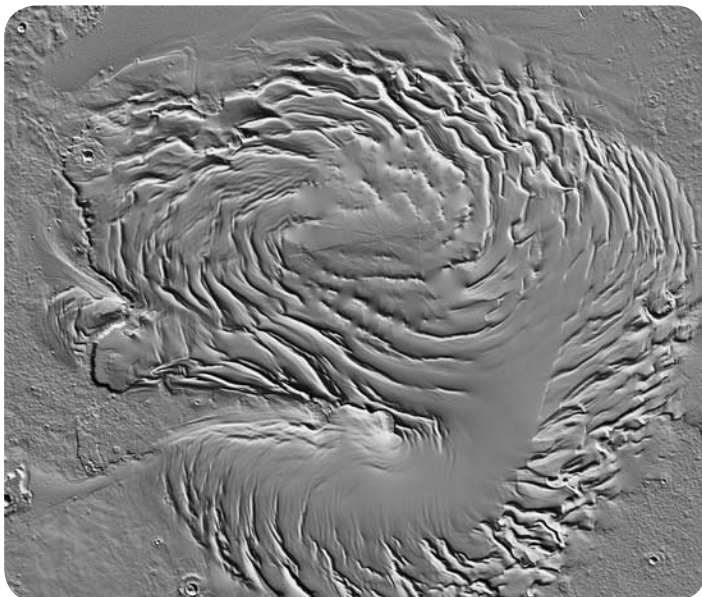


Figur 2. Forårsstorm over Mars nordlige iskappe. ©NASA



Figur 3. Der er mere end 100 km mellem disse billeder fra en skrænt på den nordlige iskappe. Lagene formodes at indeholde is fra de sidste 1-2 millioner år. ©NASA/JPL/MSSS.

Figur 4. Tegn på udflydning af bundsmeltevand fra den nordlige iskappe? ©MOLA Science Team.



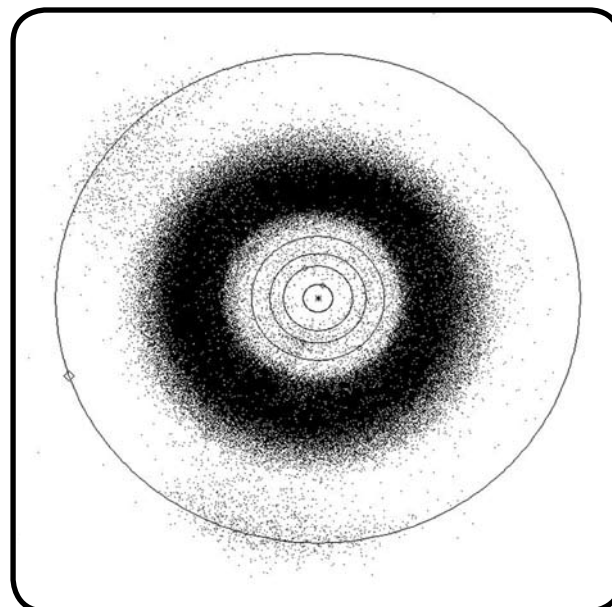
Asteroider

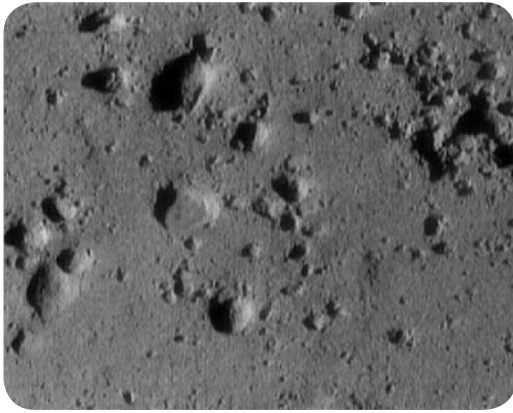
Asteroiderne er meter til kilometer store objekter af klippe og metal i kredsløb om Solen der, på trods deres overvældende antal, ofte er overset i diskussionen om solsystemet. I dag kendes der mere end 200.000 asteroider, altså langt flere end planeter, måner og kometer tilsammen, og dette antal vokser med ca. 30.000 nye opdagelser hvert eneste år. Alle disse mange himmellegemer kan, med undtagelse af asteroiden Vesta, ikke ses med det blotte øje og har derfor ikke fået den interesse som de fortjener. Da asteroiderne for ca. 4,5 milliarder år siden blev skabt af det samme stof som planeterne, kan asteroiderne fortælle meget om, hvordan det tidlige solsystem udviklede sig. Man forestiller sig desuden at asteroiderne spiller en vigtig rolle i livets opståen – en rolle som den dag i dag kan bestemmes ud fra studier af asteroider. Beviserne for livets opståen her på Jorden regner vi med for længst er gået tabt pga. den geologiske udvikling.

Asteroidebæltet

Asteroiderne kommer fra et meget specielt sted i solsystemet, nemlig netop ved overgangen fra det indre solsystem med de jordlignende planeter Merkur, Venus, Jorden og Mars, til det ydre solsystem med gasplaneterne Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun. Som man kan se fra figur 1, der viser solsystemet set ovenfra, er asteroiderne fordelt i en stor ring omkring Solen, denne samling af asteroider betegnes asteroidebæltet. Hver prik er en kendt asteroide og cirklerne er planeternes baner. Asteroidebæltet viser, ligesom de indre og ydre planeter, tegn på forskellighed i kompleksitet; den indre del af bæltet indeholder asteroider der har gennemgået opsmeltning og derfor er meget jordlignende med metalkerner og lettere ydre lag som kappe og skorpe, hvorimod asteroiderne i det ydre asteroidebælte er primitive kulkondritter der ikke har gennemgået nogen betydelig ændring siden deres dannelse og derved ligner det stof som solsystemet oprindeligt blev skabt af.

Figur 1. Oversigt over det indre solsystem. Cirklerne er planeternes baner og prikkerne er hver en kendt asteroide. Samlingen af asteroider imellem Mars og Jupiters baner kaldes for asteroidebæltet og det menes at være der at asteroiderne oprindeligt er blevet skabt. ©GM





Figur 2. Nærbillede af Eros taget fra 250 m højde der viser et kun 12 m bredt udsnit af overfladen. ©NASA/JHU.

Kun fire af de mange asteroider har været besøgt af rummissioner. På sin vej gennem asteroidebæltet mod Jupiter fotograferede Galileo-rumsonden i 1991 og 1993 asteroiderne Gaspra og Ida som de første asteroider taget i nærbilleder. Meget overraskende har Ida en lille måne i kredsløb, kaldet Dactyl, som ikke er større end ca. 1,5 km i diameter. Også missionen Near Earth Asteroid Rendezvous (NEAR) fotograferede asteroiden Mathilde i 1997 og foretog en landing på asteroiden Eros i 2001. Under Eros-landingen blev der taget billeder i så høj opløsning at man kan se asteroidebæltets opbygning, se figur 2 og 3. Mathilde og Eros er begge jordnære asteroider, dvs. asteroider med en bane der kan bringe dem nær Jorden, hvilket bevirker at de har en svag sandsynlighed for engang at kolliderer med Jorden.

Ved at se på billederne af de fire besøgte asteroider, de indre planeter eller vores egen måne, opdages det hurtigt at adskillige kratere markant præger overfladen. Disse kratere er skabt ved sammenstød med asteroider eller fragmenter af asteroider.

Den manglende planet

Asteroidebæltets placering har igennem tiden været diskuteret grundigt, da man mente at der skulle have været en planet hvor asteroiderne nu findes. Titius og Bode opdagede i 1766 en regelmæssighed i planeternes middelfstand fra Solen, og angiveligt viste det sig at der manglede en planet mellem Mars og Jupiter. I jagten på denne planet fandt man i 1801 den største af asteroiderne, Ceres. Fordi Ceres kun er ca. en fjerdedel så stor som Månen og dermed var for lille til at blive accepteret som planet, fortsatte man jagten og fandt adskilligt flere asteroider, selvom man aldrig fandt den manglende planet. Asteroidebæltet er ikke, som man kunne tro, en planet der er blevet knust i mange stykker, men derimod en planet det aldrig var lykkedes at samle. Solsystemets største planet Jupiter, der blev skabt meget

tidligt i solsystemets udvikling, forhindrede med sin enorme masse asteroidebæltets sammenklumpning og hermed dannelsen af den omtalte planet, og Jupiter sørger nu med tiden for asteroidebæltets udtømning af asteroider. Hele asteroidebæltets samlede masse er mindre end 1 promille af Jordens masse og det tyder på at der er forsvundet rigtigt meget masse. I modsætning til planeternes baner, der er stabile inden for en tidsskala på milliarder af år, er asteroidernes baner i asteroidebæltet kaotiske og Jupiters store tyngdefelt bevirker at asteroider der befinder sig i bestemte baner bliver skubbet ud af asteroidebæltet. Asteroider der forlader asteroidebæltet kan blive opslugt af Solen, blive slynget helt ud af vores solsystem eller ende i stabile baner i det indre solsystem, hvor de en dag kan risikere et sammenstød med Jorden eller en anden planet. De ustabile baner, også kaldet resonansområder, vil hurtigt blive tømt for asteroider og såfremt ingen nye asteroider skulle have i resonansen ville vi ikke umiddelbart forvente at se "løsslupne" asteroider i det indre solsystem den dag i dag, da de for længst skulle være blevet fjernet ved kollisioner med planeter

eller Solen. Da vi rent faktisk ser asteroider bevæge sig nær Jorden, er det fordi kollisioner mellem asteroiderne selv i asteroidebæltet kan bevirke at asteroidefragmenter efter sammenstødene ender i resonansområderne, for på denne måde at forlade asteroidebæltet ved hjælp af Jupiters tyngdefelt. Denne udtømning af asteroidebæltet menes at foregå hele tiden, i et tempo der over milliarder af år langsomt aftager efterhånden som asteroidebæltet tømmes for asteroider.

Nedslag

Asteroidestykker kan på egen hånd finde vej til vores planet, og hvis de når frem til Jorden bevæger de sig typisk med hastigheder på omkring 72.000 km/time. Størstedelen af de små asteroidestykker der rammer Jorden brænder op i gnidning med luften i vores atmosfære. Dette fænomen er velkendt og kaldes en anelse fejlagtigt for stjernesku. Nogle få asteroidestykker overlever dog turen igennem atmosfæren og når de rammer jordoverfladen kan de skabe ødelæggelser i store omfang, afhængigt af hvor store og hurtige stykkerne er. Et af de mest voldsomme nedslag skete for 65 millioner år siden og tænkes at have udryddet omkring 60% af dyrearterne på Jorden, inklusive dinosaurerne. Heldigvis er de store nedslag meget sjældne, men med deres ødelæggende kraft taget i betragtning er det foruroligende at de jordnære asteroider ikke endnu kendes tilnærmelsesvis godt nok til at kunne forebygge et eventuelt katastrofalt nedslag.



Figur 3. Asteroiden Eros fotograferet fra 200 km's afstand. Pilen viser hvor NEAR missionen landede på asteroidens overflade. ©NASA/JHU.

Solsystemets ydre planeter

Fire kæmper og en dværg

De ydre planeter i solsystemet er alle dem der befinder sig længere væk fra Solen end asteroidebæltet. I rækkefølge væk fra Solen tæller de: Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun og Pluto. De fire første i den række bliver også kaldt gaskæmperne og er blandt andet kendetegnet ved ikke at have en fast overflade, samt at de alle har ringsystemer.

Længst væk fra Solen ligger Pluto, som også er dækket af is, men er meget mindre end de andre, og derfor må være dannet ved nogle andre processer end sine kæmpestore naboer.

Spor efter den oprindelige nebula

Når man ser på Jupiter og Saturn, viser det sig at deres gasdel stort set har samme sammensætning som Solen, og primært består af hydrogen (brint) og helium.

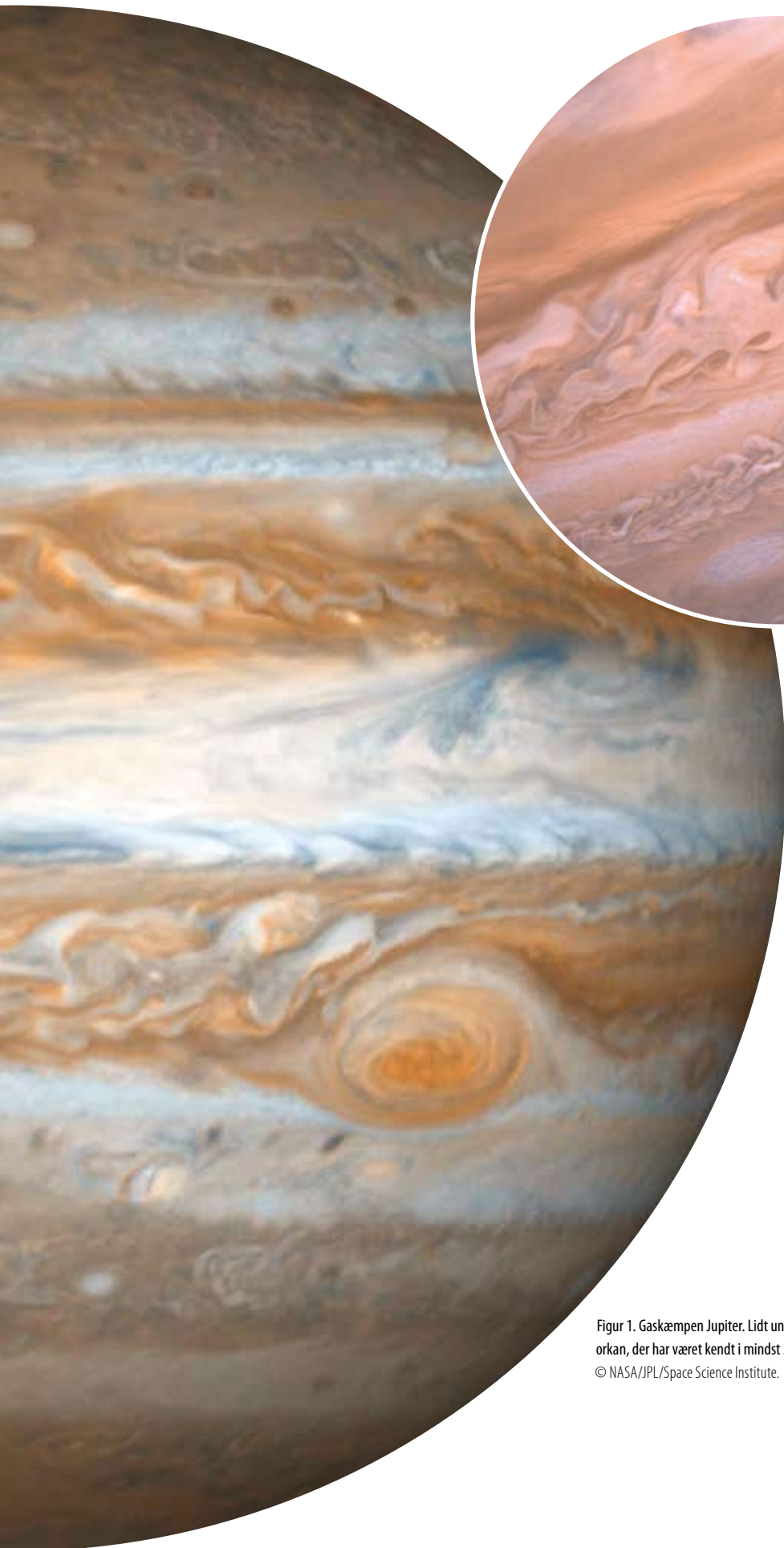
Det fortæller os at gassen omkring de ydre planeter kommer fra den oprindelige nebula – den roterende skive af gas, som solsystemet dannedes ud fra.

Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun har alle fire en indre del, der består af klippemateriale der i sammensætning formentlig minder om Jorden. Klippedelene hos de ydre planeter har lignende størrelser, mens gasdelenes størrelse varierer meget. Man forestiller sig derfor at gaskæmpernes dannelse er foregået i to trin – det første trin, som er dannelsen af klippedelen, foregår ved at støv, småpartikler og is blev kittet sammen til de indre dele af planeterne, mens andet trin sker når klippe- og isdelen har nået en størrelse på ca. 10 Jordmasser, og dermed en tyngdekraft der er stor nok til at tiltrække gas fra nebulaen.

Forskellen på mængden af gas omkring de fire planeter skyldes at Uranus og Neptun er dannet længere væk fra Solen end Jupiter og Saturn. Jo længere væk man kom fra Solen i det tidlige solsystem, des mindre materiale var der til stede. Af samme grund tog det de ydre gaskæmper længere tid at blive så store så gas fra nebulaen kollapsede omkring dem. Da de endelig nåede den størrelse som var kritisk for at gassen kunne kollapse omkring dem, var en stor del af gassen fra den oprindelige nebula forsvundet. Derfor er Uranus og Neptun mindre end Jupiter og Saturn.

Is og planeter

Man kan undre sig over at de indre planeter ikke er de største, hvis massetætheden var størst tæt på Solen, men det skyldes simpelthen at de kun består af den meget lille faste del af det materiale der var i den oprindelige gassky. Alle de stoffer der var i gasform blev blæst ud af det indre solsystemet. Længere fra Solen frøs store mængder vanddamp fra det indre solsystem til is og sørgede på den måde for at der var ekstra meget materiale til rådighed til at opbygge de store ydre planeter. Da der var væsentligt mere is end støv og småpartikler i nebulaen, har isens placering og stabilitetsområder været altafgørende for tilvæksten af planeterne i solsystemet.



Figur 2. Nærbillede af Jupiters voldsomme storme. Rundt om orkanerne kan man se turbulens i atmosfæren.
©NASA/JPL-Caltech.

Jupiter – solsystemets kæmpe

Næst efter Solen, er Jupiter det største objekt i vores solsystem. Hvis den havde været bare 13 gange større, havde den været en brun dværg, som er de mindste stjerner i vores univers. Jupiter er mere end 300 gange tungere end Jorden, og så stor og massiv, at man regner med et tryk på omkring 50 mio. atmosfæres tryk i planetens center.

Jupiter er den af planeterne der er vokset hurtigst. Det kan vi blandt andet se på asteroidebæltet, som ligger mellem Mars og Jupiters baner. På grund af Jupiters tyngdefelt, har asteroidebæltet ikke haft mulighed for at samle sig til en planet.

Jupiters overflade er evig foranderlig på grund af enorme vindsystemer i atmosfæren. Mest kendt er nok Jupiters røde plet, som i virkeligheden er en orkan der er flere gange Jordens størrelse. Den blev opdaget af Robert Hooke i 1664 og har derfor raset i over 300 år.

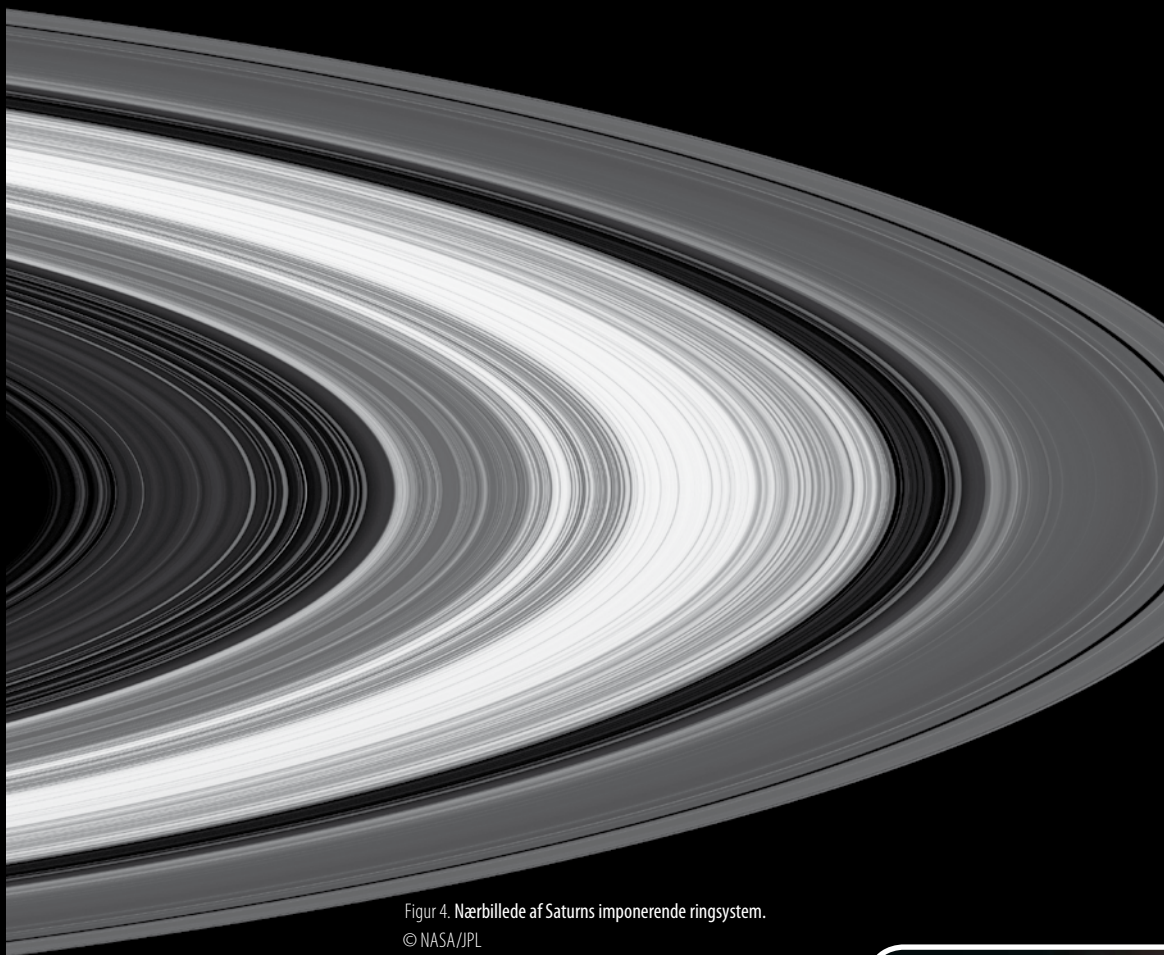
Figur 1. Gaskæmpen Jupiter. Lidt under midten ses en orkan, der har været kendt i mindst 300 år.
© NASA/JPL/Space Science Institute.

Saturn

Saturn, som er den næste gaskæmpe, er den sjette planet fra Solen. Dens indre er opbygget nogenlunde på samme måde som Jupiter, men selvom den er den næststørste planet i solsystemet, udgør dens masse mindre end 1/3 af Jupiters.

Planeten er nok bedst kendt for sit fantastiske ringsystem, der består af isstumper som højst sandsynligt er resterne af en eller flere kometer der er kommet for tæt på Saturn, og er blevet revet i stykker i dens tyngdefelt. Ringene strækker sig hundrede tusinde kilometer ud fra planeten, og er delt op i 2 tydelige ringe, som hver består af en mængde finere ringe. Ringene har ikke nogen særlig lang levetid og må derfor være dannet for nylig.

Af alle planeter i vores solsystem har Saturn det kraftigste vindsystem, med vindhastigheder på ca. 500 m/s. Til sammenligning kan vindhastigheden i Jordens jetstrømme nå op på 110 m/s.



Figur 4. Nærbillede af Saturns imponerende ringsystem.
© NASA/JPL



Figur 3. Saturn med sit berømte ringsystem.
© NASA/JPL/Space Science Institute.

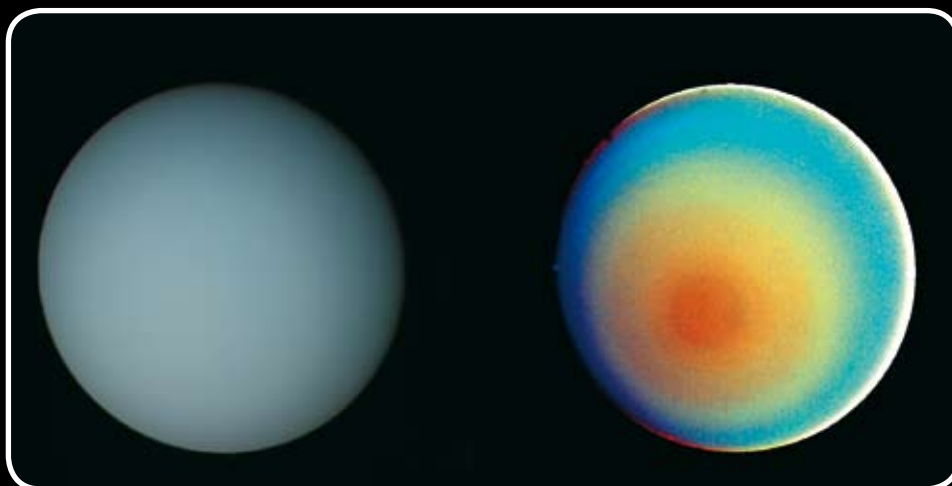


Figur 5. Tordenstorm på Saturn. Det mystiske mønster man kan se til højre, lidt over midten, er et voldsomt stormvejr som blev fotograferet på Saturn i 2004. © NASA/JPL/Space Science Institute.

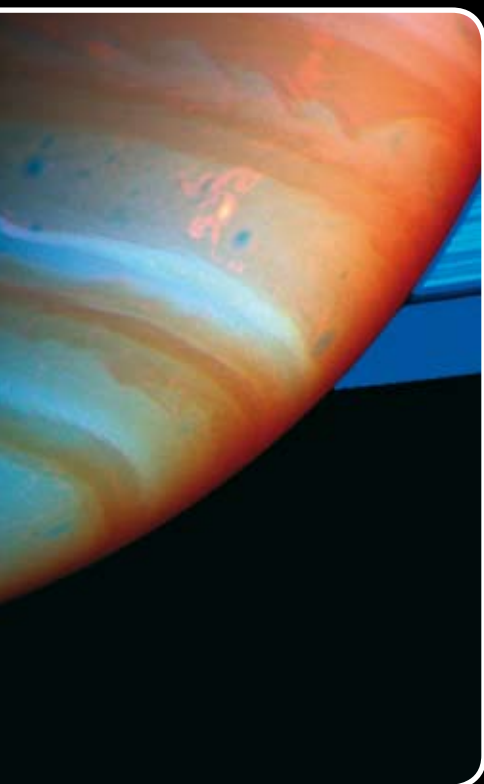
Uranus

Uranus er den tredjestørste planet i vores solsystem. Størstedelen af planeten består af frossen og flydende "gas" der består af vand, ammoniak og metan. De ydre lag indeholder, udover hydrogen (brint) og helium, også mindre mængder af vand, ammoniak og metan, og det er metangassen som giver planeten dens blågrønne farve. Planeten har ikke mindre end 11 ringe i sit ringsystem.

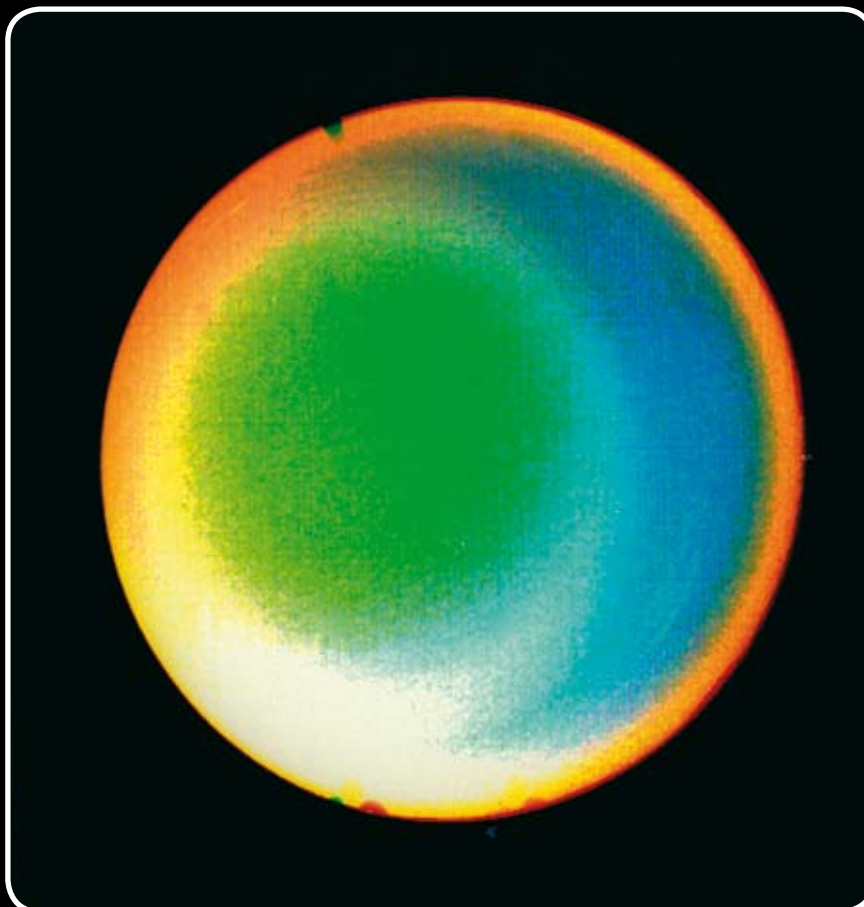
Uranus er helt særlig i vores solsystem, fordi den roterer rundt om en liggende akse i forhold til de andre planeter – dvs. at Uranus skiftevis vender sine to poler ind mod Solen, hvorimod de andre planeter vender deres ækvator ind mod Solen. Det mener man skyldes et stort nedslag på planeten – stort nok til at slå Uranus helt ud af sin oprindelige kurs. Det ville kræve at objektet der slog ned på Uranus var lige så stort som Jorden og ramte Uranus skævt. Nedslaget er formentlig sket da Uranus opbyggedes ved at opsluge andre legemer i sin nærhed.



Figur 6. Uranus vist i ægte farver (til venstre) og uægte farver (højre). © NASA/JPL



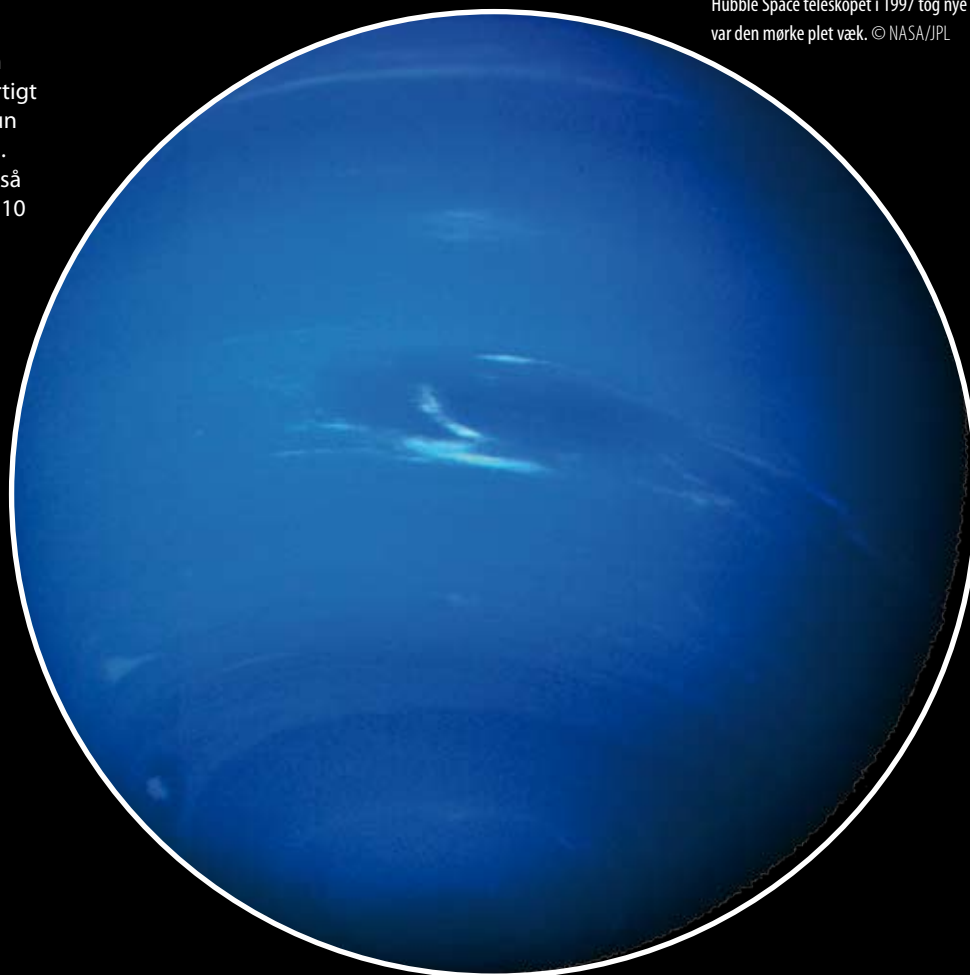
Figur 7. Uranus © NASA/JPL



Neptun

Neptun er kun en anelse mindre end Uranus, og minder i sin opbygning meget om Uranus. Til forskel fra Uranus, har Neptun et voldsomt vindsystem, med orkaner og vindstyrker der når op på mere end 330 m/s. Til forskel fra vindsystemerne på Jupiter, ser det ud som om Neptun har en meget mere foranderlig og hurtigt skiftende vinddynamik. Atmosfæren på Neptun består primært af hydrogen, helium og metan. Ligesom de andre gaskæmpere, har Neptun også et ringsystem. I Neptuns tilfælde består det af 10 ringe.

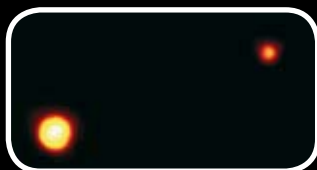
Figur 8. Iskæmpen Neptun. Den mørke plet midt i billedet er en orkan der blev fotograferet i 1989 af Voyager 2. Da Hubble Space teleskopet i 1997 tog nye billeder af Neptun, var den mørke plet væk. © NASA/JPL



Figur 9. Skysystem på Neptun.
© NASA/JPL

Pluto

Pluto er den mindste planet i vores solsystem, med en diameter på kun 2/3 af Månens. Den blev opdaget i 1930, og hvis vi havde opdaget den i dag - med den viden vi nu har om solsystemet - så ville den nok slet ikke blive betragtet som en planet, men derimod som et islegeme, der tilhører den inderste del af Kuiperbæltet, hvor også en del af kometerne stammer fra. Pluto bliver ofte betragtet som et dobbelt-planet system, sammen med dens største måne, Charon, fordi Charon er ca. halvt så stor som Pluto.



Figur 10. Pluto og dens måne Charon.
© Dr. R. Albrecht, ESA/ESO Space Telescope European
Coordinating Facility; NASA.

Solsystemets måner

Af Christine Marvil

(2•8)

Fra tidernes morgen har mennesket været fascineret over vores egen Måne. Hvad er det i det hele taget for en lysende skive der skifter form og position fra nat til nat? Hvor stor er den? Hvor langt væk er den og hvordan er den blevet til? De fleste mennesker har nok på et tidspunkt stoppet op, kikket op på fuldmånen og spekuleret over, hvordan det mon er at vandre rundt på dens overflade. Vi er kommet langt i forståelsen af vores gådefulde Måne, men selv efter Apollo-missionerne til Månen er der stadig mange ting vi ikke forstår om månen. Nu har missionerne til de andre planeter i solsystemet vist, at de andre planeters måner er mindst lige så gådefulde som vores egen Måne – vi er kun lige begyndt at forstå hvordan de er blevet til.

Jorden er langt fra det eneste legeme i vores solsystem, der har en måne. Faktisk har de fleste planeter i vores solsystem adskillige måner, og der er sågar blevet observeret adskillige måner omkring asteroiderne i asteroidebæltet.

Månerne i solsystemet er utroligt forskellige – faktisk er de lige så forskellige som planeterne i solsystemet er. Nogle har næsten cirkulære baner rundt om deres planet, mens andre har meget irregulære eller langstrakte baner. Nogle er store, mens andre er små, og nogle har aktive vulkaner, mens andre har været inaktive i milliarder af år. Der er måner med forskellige typer af is (H_2O , CH_4 , N_2 og CO_2), og måner der er helt gølle. Måner der er indfanget af planeterne, og måner der er dannet sammen med planeterne. Der er måner der med tiden vil kolliderer med den planet de kredser om, mens andre en gang vil blive slynget helt væk fra planeten. Vores egen måne glider et par cm længere væk fra Jorden hvert år. I det følgende kapitel vil vi gennemgå nogle af de mange spændende måner fra solsystemet.

Jordens måne

Når man kigger på andre planeter og deres måner, er vores måne meget stor i forhold til Jordens størrelse. Den er meget speciel for det indre solsystem, da der slet ikke er andre måner af denne størrelse i dette område af solsystemet. Den er også den eneste måne i det indre solsystem, der er dannet sammen med sin planet. Når man ser på Månen, kan man med det blotte øje se at overfladen består af lyse områder og mørke områder. De lyse områder er Månens ældgamle skorpe, der primært består af mineralet anorthit. De mørke partier er vulkanske aflejringer – kaldet Mare basalt, som til dels minder om den basalt man finder på Jorden.

Mare basalterne stammer fra vulkaner på Månen, der var aktive indtil for godt 3 milliarder år siden. Lava fra vulkanerne fyldte nogle af de enorme kraterstrukturer op med basalt og dannede det vi i dag kalder mare. Tidligere troede man at de mørke områder var store oceaner og gav dem derfor den latinske betegnelse for hav – mare.





Figur 1. Jordens måne. På billedet ses tydeligt forskellen mellem den gamle lyse skorpe, og de mørke basaltiske bjergarter, der har fyldt nogle af Månens store kratere.

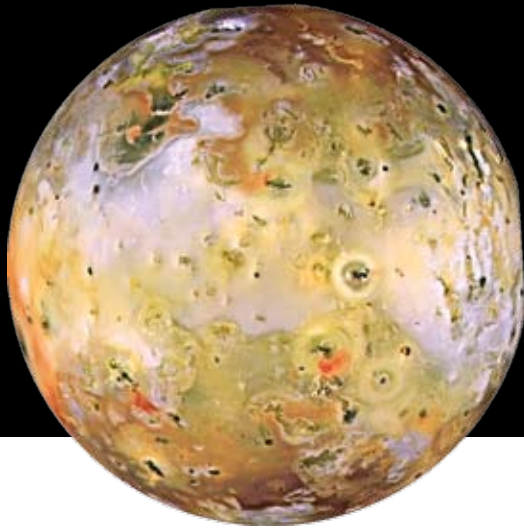
© NASA/JPL

Mars' måner Phobos og Deimos

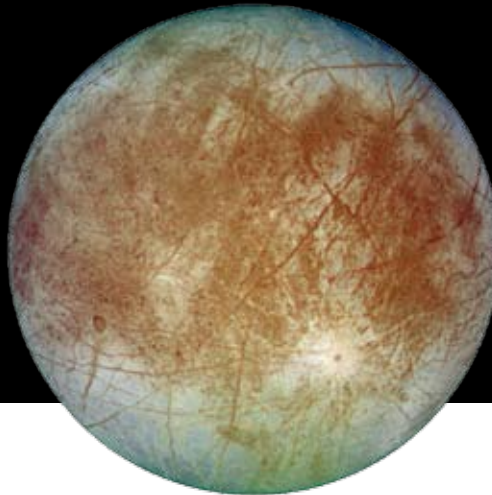
Disse to små måner er i kredsløb om Mars' ækvator. Deres sammensætning er helt anderledes end Mars' og man regner derfor ikke med, at disse måner er dannet sammen med planeten. Man kan også se at Phobos' og Deimos' baner er ustabile og at de derfor i en ikke alt for fjern fremtid vil styrte ned på Mars. Formentlig er både Phobos og Deimos tidligere asteroider, der er blevet indfanget af Mars' tyngdefelt. Det er ikke usandsynligt at Mars kan have indfanget asteroider, da den ligger lige på kanten af asteroidebæltet.



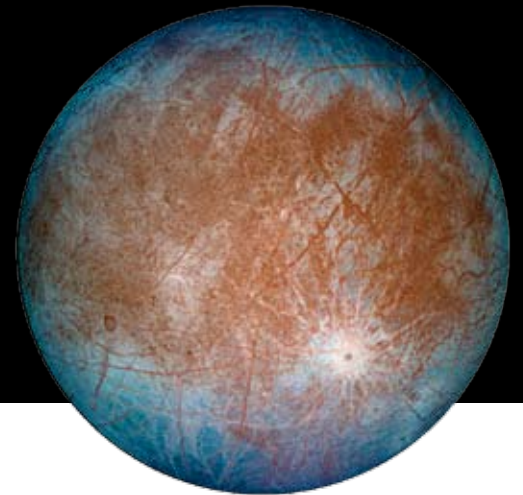
Figur 2. Mars' to små måner Phobos (nederest) og Deimos (øverest). Billedet viser månernes irregulære former, og man kan se nedslagskratere på begge måner. © NASA/JPL



Figur 3. Jupiters måne, Io. Billedet stammer fra NASAs Galileo mission © NASA/JPL

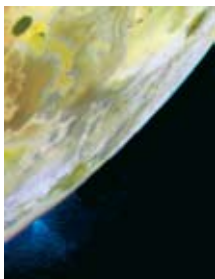


Figur 5. Jupiters måne, Europa i ægte farver og forstærkede farver. I det sydøstlige udsnit ses Europas Pwyll krater. © NASA/JPL



Jupiters måner

Jupiters fire største måner blev opdaget af Galileo Galilei den 7. januar 1610. Stor var Galileis overraskelse da han natten efter opdagelsen atter kikkede på de nyopdagede måner og opdagede at de havde flyttet sig i forhold til natten før. Galilei havde dermed for første gang observeret noget der - i strid med det kirkelige verdensbillede - ikke bevægede sig rundt om Jorden. Hvis man kikker på Jupiter i en ganske almindelig prismekikkert vil man let kunne se nogle af de fire største måner. På grund af specielt Ios korte omløbstid kan man ligesom Galilei, næsten time for time, se at den bevæger sig i forhold til Jupiter.

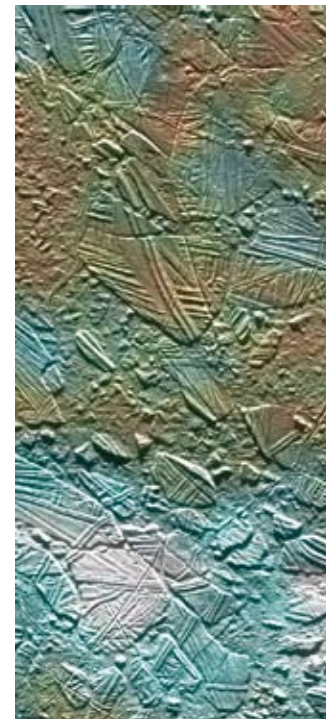


Figur 4. Jupiters måne Io. På billedet ses en ca. 100 km høj lavafontæne, fotograferet af NASAs Galileo rumsonde. © NASA/JPL

Jupiters måne Io

Io er det mest vulkanske aktive legeme i hele solsystemet. Den er kun lidt større end vores egen måne men på grund af de voldsomme tidekræfter fra Jupiter produceres der nok varme i dens indre til at holde Io opsmeltet. Varmeproduktionen skyldes at Ios indre bliver deformet når den i løbet af sit 19 timers omløb ændrer afstand til Jupiter. Deformationen producerer nok varme til at smelte månens indre. Det er den opsmeltning der danner den voldsomme vulkanske aktivitet, der til tider skaber lavafontæner der er flere hundrede kilometer høje, og kan ses ude fra rummet. Io har nogle meget dramatiske landskabsformer. F.eks. er bjergene op til 16 km høje. Til sammenligning er Jordens højeste bjergtinde, Mount Everest, "kun" knap 9 km høj. Der er også indsynkningskratere på op til 2 km dybde, og op til 200 km i diameter. Man har lokaliseret 61 aktive vulkanske områder på Io indtil videre. På grund af den voldsomme vulkanisme der hele tiden dækker månens overflade med ny lava, er der ikke blevet observeret nogen nedslagskratere på Io.

Figur 6. Her ses et nærbillede af isen der dækker Europas overflade. Det er tydeligt at isflagerne har været opbrudte, og har bevæget sig i forhold til hinanden. © NASA/JPL



Jupiters måne Europa

Europa er den mindste af Jupiters fire store klassiske måner, men af meget stor interesse. Det har nemlig vist sig at der er et 100km dybt ocean under Europas isdækkede overflade. Da vand har vist sig at være en forudsætning for livets opståen, er spørgsmålet om der kunne være livsformer dybt under månens overflade.



Figur 8. Jupiters ismåne Callisto © NASA/JPL



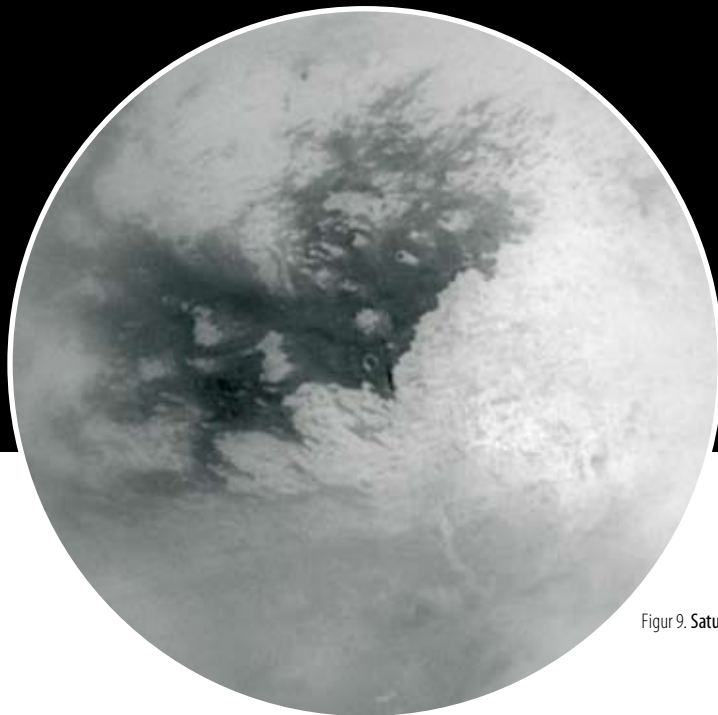
Figur 7. Jupiters største måne, Ganymede. © NASA/JPL

Jupiters måne Ganymedes

Ganymedes er den største måne i solsystemet, og den er endda større end planeten Merkur. Der ses enorme rifter på dele af denne månens overflade, som skyldes udbredt tektonisk aktivitet – dvs. at dele af månens skorpe har bevæget sig i forhold til hinanden. Fænomenet minder om kontinentaldrift på Jorden. En anden del af overfladen er fyldt med nedslagskratere, og vi ved derfor at denne del af Ganymedes' overflade er meget ældre og derfor har været udsat for meteornedslag i meget længere tid.

Jupiters måne Callisto

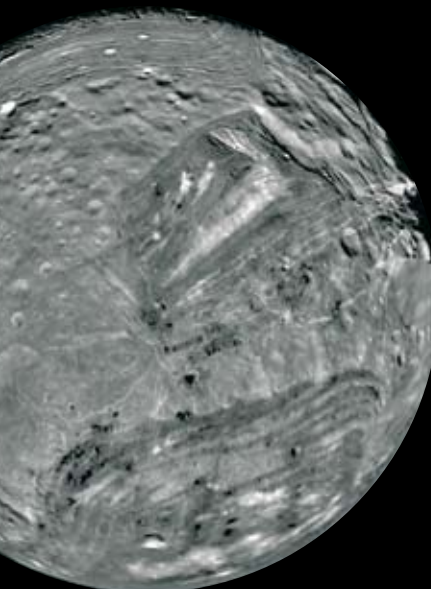
Denne måne er den tredjestørste i solsystemet, og næsten lige så stor som Merkur. Den har en indre kerne af klippemateriale, men det meste af denne måne består af is. Af alle satellitter i solsystemet, har Callisto den mest kraterfyldte overflade. Det fortæller os at Callisto har den ældste og mest inaktive overflade, vi kender til fra solsystemet. Der er tilsyneladende ikke sket nogen ændringer med månens overflade i de sidste 4 mia. år.



Figur 9. Saturns måne, Titan. © NASA/JPL

Saturns måne Titan

Titan er den største af Saturns måner. Den er den eneste store måne i kredsløb om Saturn, og næsten fire gange større end den næststørste måne, Iapetus. Denne måne har en nitrogenrig atmosfære der er tættere end Jordens, og muligvis flydende ethan, metan og nitrogen på overfladen. Disse stoffer findes som gasarter på Jorden men på grund af den lave temperatur på Titan er de her i flydende form. Specielt forekomsten af metan er gådefuld. Da metan nedbrydes i atmosfæren betyder det at der må være processer på Titan som producerer eller frigiver metan.



Figur 11. Uranus' måne Miranda. Som det ses af formerne på overfladen, har Mirandas overflade haft en kompleks dannelseshistorie. © NASA/JPL



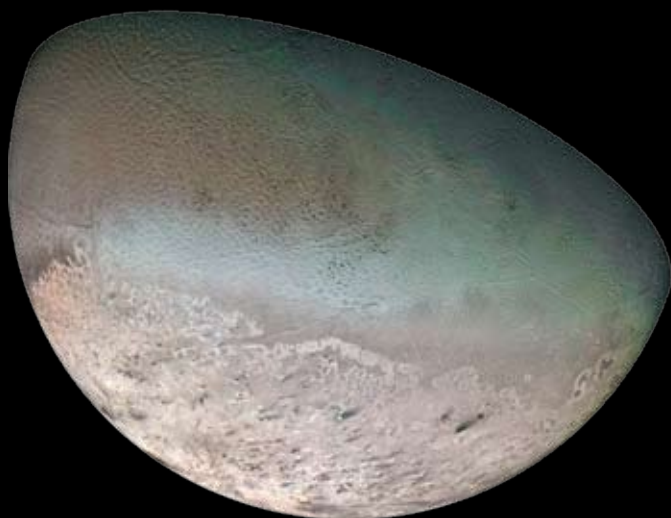
Figur 10. Første billede af Titans overflade, taget fra ESAs Huygens sonde, der landede på Titan i 2005. © NASA/JPL

Saturns måner Janus og Epimetheus

Disse to måner har næsten samme masse og samme kredsløb om Saturn, meget tæt på Saturns ringsystem. Af alle måner har disse to den laveste massefylde – faktisk er deres massefylde så lille at den er mindre end H₂O-is. En mulig forklaring er at disse måner har været opknust, og nu bare er porøst sammenkittede.

Uranus' måne Miranda

Miranda er en lille måne, der er mindre end asteroiden Vesta. Alligevel viser dens overflade at månen har gennemgået en dramatisk og kompleks dannelseshistorie. Da den er mindre end Uranus' andre måner og alligevel er den, der viser tegn på mest smeltedannelse, må der være andre årsager til opsmeltningen end radioaktivt henfald. Man regner med at der er store mængder af ammoniak i månens indre, der kan nedbringe smeltepunktet for bjergarter betydeligt.



Figur 12. Neptuns måne, Triton. Til alles store overraskelse har månen en meget varieret overflade. De sorte streger menes at være nedfald fra geysere på Tritons overflade.

© JPL/USGS

Neptuns måne Triton

Triton er den største af de indfangede måner vi har i hele solsystemet. At den er indfanget kan vi se fordi den bevæger sig rundt om Neptun i den "gale" retning – det vil sige at Neptun roterer i en retning, mens Triton drejer den modsatte vej rundt om Neptun. Det er det legeme i solsystemet der bevæger sig i den mest cirkulære bane. Triton har en tynd nitrogenholdig atmosfære, og har geysere der springer med flydende nitrogen.



Figur 13. Asteroiden Ida med dens måne Dactyl. Det var en stor overraskelse at opdage Idas måne, da man ikke troede at asteroidernes tyngdekraft var stor nok til at holde en måne i kredsløb. © NASA/JPL

Asteroiden Idas måne Dactyl

Dactyl var den første måne der blevet opdaget i kredsløb om en asteroide. Den blev opdaget i 1993 af Galileo rumsonden, på dens vej til Jupiter. Den er kun 1,6 x 1,2 km stor, og forskelle i Idas og Dactyls mineralsammensætning gør at vi med sikkerhed kan sige at Dactyl ikke bare er et stykke der er blevet slået ud af Ida.

I dag er der opdaget mange måner der befinder sig i kredsløb om asteroider.

Chapter (3)

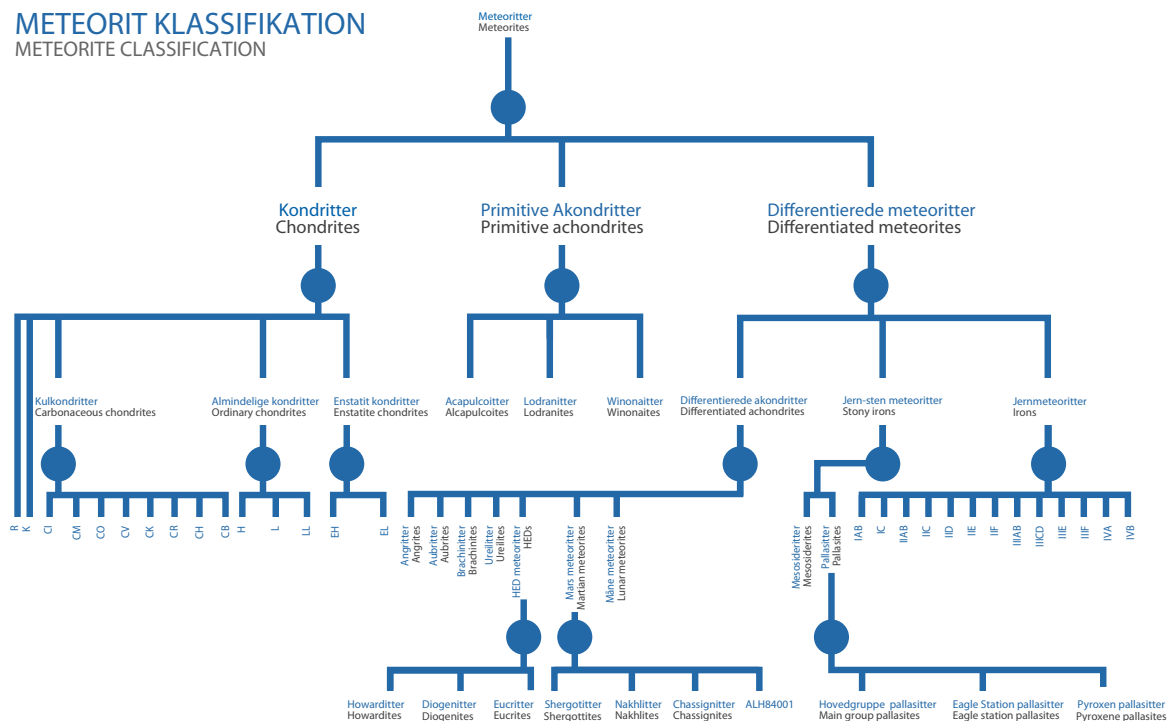
Meteoritter



Meteorittræ

Meteoritterne ankommer til Jorden i helt tilfældig orden og uden nogen form for information om deres oprindelsessted. Det første man gør med en nyfundet meteorit er derfor at finde ud af hvilken type den er – dvs. om den ligner nogle af de andre meteoritter vi har på Jorden i forvejen.

METEORIT KLASSIFIKATION METEORITE CLASSIFICATION



Af Christine Marvil

(3.1)

Som det fremgår af skemaet deler man meteoritter op i forskellige hoved- og undergrupper. Opdelingen sker på baggrund af meteoritternes tekstur, kemi og mineralogi.

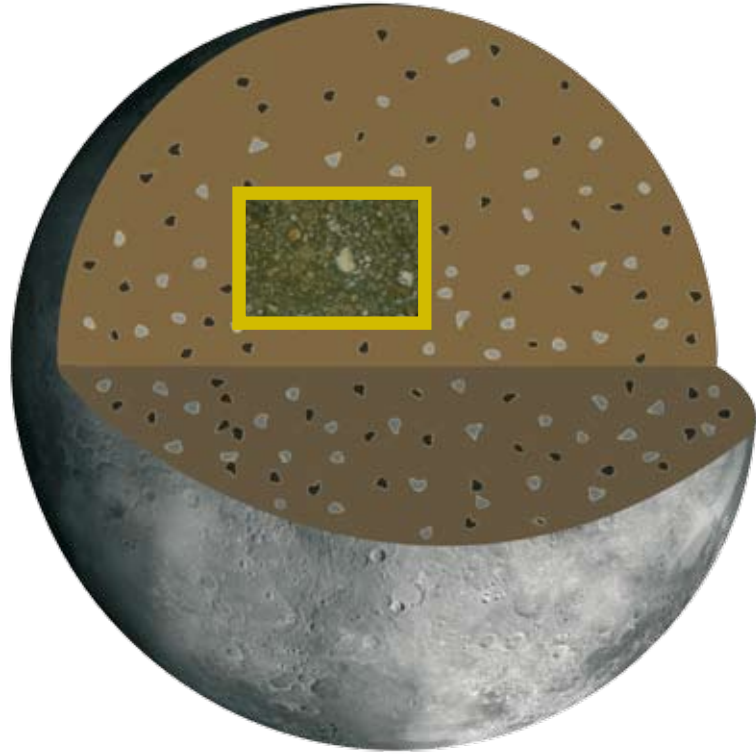
De tre hovedgrupper er baseret på om meteoritternes moderlegemer slet ikke har været opsmeltet (kondritter), om de har været udsat for begyndende opsmeltning (primitive akondritter) eller om de har været fuldstændigt opsmeltede (differentierede meteoritter).

Udover de viste grupper er der en del såkaldte ugrupperede meteoritter. Det er alle de meteoritter, der ikke passer ind i de allerede definerede grupper og som der er færre end fem eksemplarer af.

Forskelle i meteoritternes kemiske sammensætninger, deres aldre og deres mineralogiske sammensætning gør at vi kan "parre" visse meteoritter til oprindeligt at være kommet fra samme moderlegeme. Vi er ofte nødt til at bruge flere af disse discipliner i forsøg på at kunne skelne meteoritgrupperne fra hinanden. Som vi har fundet flere og flere meteoritter, har vores opfattelse af deres indbyrdes relationer også ændret sig. Med tiden er det f.eks. muligt at man finder flere meteoritter der ligner andre allerede fundne ugrupperede meteoritter, og nogle af disse meteoritter hermed vil udgøre nye grupper.

Skemaet her skal derfor ses som et billede på hvordan vi opfatter meteoritterne indbyrdes forhold lige nu.

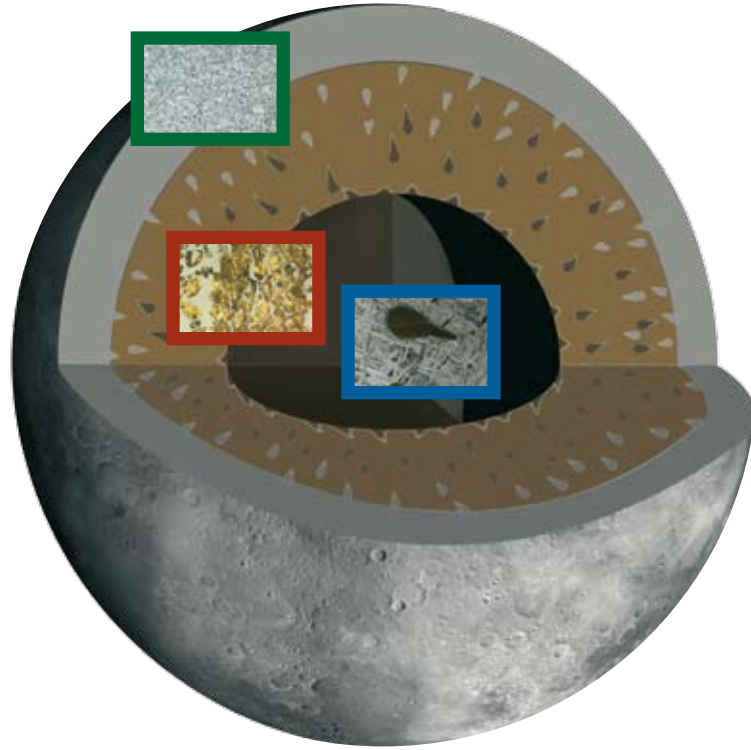
Hvor kommer meteoritterne fra?



Tværsnit gennem en primitiv asteroide, hvor støv, kondruler og metalkorn er bevaret næsten uforandret siden solsystemets oprindelse for ca. 4,6 mia. år siden. Kondritter er fragmenter af sådanne asteroider.

 Kondrit fra en primitiv asteroide

 Akondrit fra skorpen



Tværsnit gennem en magmatisk eller differentieret asteroide. Disse asteroider opsmeltedes inden for få millioner år efter solsystemets oprindelse og blev derved opdelt i en metalkerne, en silikatkappe og en skorpe.

 Pallasit fra kerne-kappe-grænsen

 Jernmeteorit fra kernen

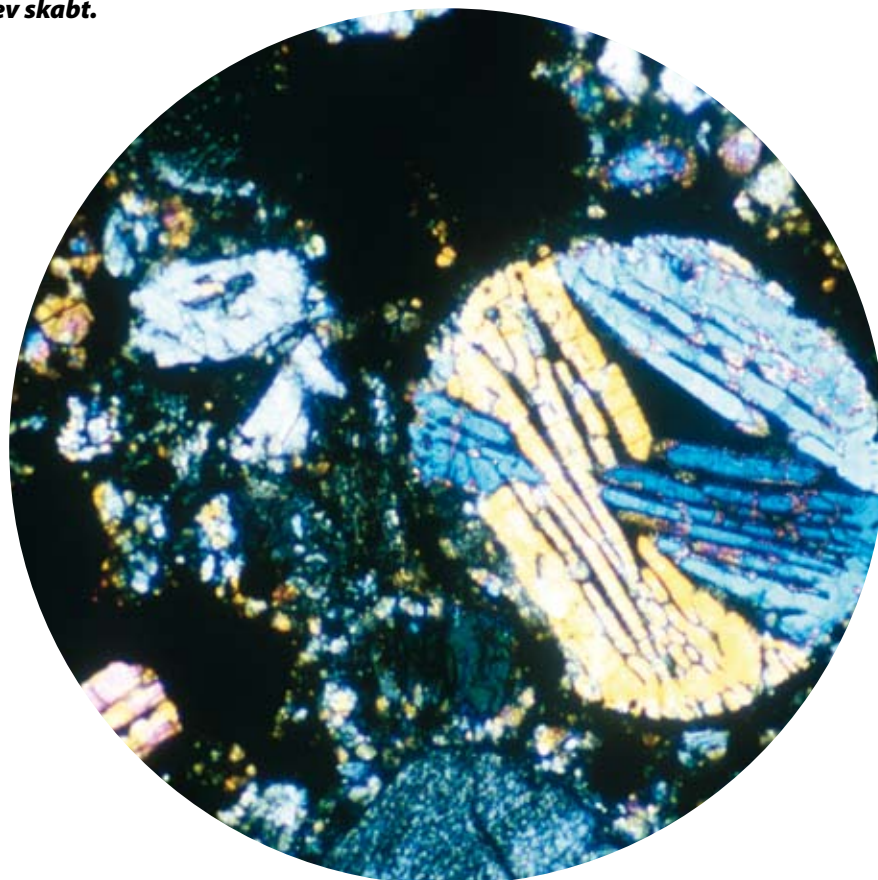
Kondritter og solsystemets ældste bevarede stof

Kondritter er en slags tidskapsler der indeholder materiale helt tilbage fra solsystemets oprindelse – 30 millioner år inden vores egen Jord blev til. Det er af dette materiale Jorden og vi selv blev skabt.

Figur 1. Et eksempel på hvordan det indre af en kondrit kan se ud, når man kigger på dem i mikroskop. I midten ses en kondrule som er få mm i diameter. ©GM

Vores arkiv til solsystemets dannelse

Selvom Jordens bjergarter kan være meget gamle, kan de ikke fortælle os meget om solsystemets oprindelse. De ældste jordiske sten er "kun" ca. 3800 millioner år – eller knap 800 millioner år yngre end selve solsystemet. Det skyldes at Jorden er en geologisk aktiv planet. Hvis vi vil finde materiale fra solsystemets oprindelse må vi derfor søge efter objekter, der ikke har været geologisk aktive siden solsystemets oprindelse. Kondritter er stumper af primitive asteroider, der ikke har haft nogen nævneværdig geologisk udvikling siden de blev dannet i det tidlige solsystem, og de indeholder derfor noget af det ældste og mest primitive materiale fra solsystemet.



Figur 2. Endnu en kondrule set i mikroskop. ©GM

Fra asteroide til meteorit

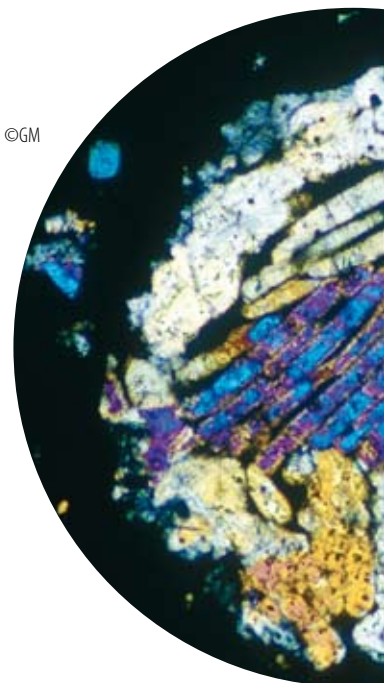
Primitive asteroider består af primitivt støv og små partikler, der blev dannet i det tidlige solsystem – længe inden planeterne dannedes. Dette primitive materiale klumpede sig sammen til stadig større objekter, hvoraf de største blev til planeter, mens andre endte som asteroider, der i dag kredser om Solen mellem Mars og Jupiters baner. Fra dannelsen af det første støv, tog det ca. 30 millioner år at opbygge hele Jorden.

Når primitive asteroider rammes af andre legemer eller ligefrem bliver involveret i en katastrofal kollision med en anden asteroide, sendes der fragmenter ud i solsystemet, der kan falde på Jorden i form af meteoritter. Ved at undersøge kondritterne bliver vi er i stand til at sige noget om hvad der er sket i vores solsystem siden det blev skabt for ca. 4.570 millioner år siden.

En kompleks historie

Kondritterne er den gruppe af meteoritter der oftest falder på Jorden. De består af en sammenkittet blanding af kondruler, calcium-aluminium-rige-inklusioner og finkornet matrix. Kondrulerne er mm-store kugler, der er dannet

som smeltdråber frit svævende omkring Solen. To kondruler, der nu ses lige ved siden af hinanden i en kondrit kan derfor godt være dannet med en million års mellemrum, flere hundrede millioner km fra hinanden, inden de ved et tilfælde blev bragt sammen i den samme klump materiale. Calcium-aluminium-rige inklusioner (CAI'er) dannedes som det første materiale i solsystemet, og er derved det ældste daterbare materiale vi kender til. Matrix i kondritterne består af støvpartikler, fragmenter af kondruler og CAI'er og metallisk jern. Kondritterne kan fortælle historien om solsystemets tidligste historie bedre end nogle andre meteoritter, fordi de, som de eneste, ikke har været udsat for genopsmeltning siden deres dannelse.

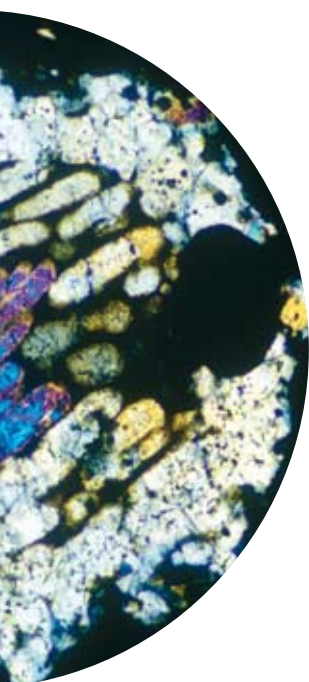




Figur 4. Her ses et nærbillede af Allendemeteoritten. Man kan tydeligt se de runde kondruler og de irregulære CAI'er i den finkornede matrix. ©GM



Figur 3. Kulkondritten Allende som er en af de allermest primitive kondritter vi kender til. Dette stykke er et ud af flere, som findes i Geologisk Museums samling.
©GM/Ole Bang Bertelsen.



Som billederne viser, er de forskellige typer af kondritter meget forskelligartede. Selv det utrænede øje kan sagtens se forskel på en metalrig kondrit som Gujba (fig. 5), der indeholder op til cm-store kondruler og en metalfattig kondrit som Kainsaz (fig. 6) hvor kondrulerne i gennemsnit ikke er mere end 0,5 mm i diameter. Der er samtidig mange andre forskelle på de forskellige typer kondritter. Nogle kondritter er meget oxiderede mens andre stort set ikke indeholder ilt. Når der ikke er ilt tilstede vil grundstoffet jern optræde i metallisk form og iltfattige kondritter kan derfor let kendes ved at de indeholder mange skinnende metalkorn. Samtidig er der stor forskel på kondritternes ilt-

isotopsammensætning (se afsnit om isotoper). Da alle disse forskellige typer kondritter består af støv og partikler fra det tidlige solsystem, må det tidlige solsystem have været meget komplekst. Vi håber at vi med tiden bliver i stand til at forstå og dermed forklare forskellene. Der er mange processer, der har spillet en rolle. Dels udviklede det unge solsystem sig hurtigt og det er derfor vigtigt at kunne datere de enkelte objekter præcist, så vi kan se hvordan de passer ind i rækkefølgen. Samtidig har der også været stor forskel på forholdene tæt på Solen og længere ude i solsystemet, hvor asteroiderne befinder sig i dag. Objekter der oprindeligt dannedes tæt på Solen er derfor sikkert anderledes end dem, der dannedes langt ude. F.eks. forestiller man sig at CAI'er dannedes tæt på Solen, mens kondrulerne dannedes længere ude. Når de i dag kan findes i den samme meteorit, må de derfor være blevet transporteret rundt i solsystemet. Endelig har de mindste objekter haft lettere ved at reagere med den gas, der oprindeligt var til stede overalt i solsystemet. Kondritter der består af meget små objekter, som f.eks. Kainsaz, er derfor anderledes end dem der består af store objekter, som f.eks. Gujba.

De kondritter, der har de samme egenskaber, kommer formentlig fra den samme asteroide.



Figur 5. Den metalrige grovkornede kondrit Gurbu. ©GM



Figur 6. Den finkornede og metalfattige kondrit Kainsaz. ©GM

Forskellige hovedtyper

Kondritterne opdeles i tre hovedgrupper, der igen opdeles i 14 undergrupper og adskillige typer, der falder uden for disse 14 grupper. Der kræves mindst fem meteoritter af samme type, før man taler om en gruppe. Ellers taler man om ugrupperede meteoritter. Dette gælder kondritter såvel som andre typer af meteoritter. Hovedgrupperne af kondritter er 1) almindelige kondritter, 2) enstatit-kondritter og 3) kul-kondritter.

Kondritterne deles op i disse grupper på baggrund af deres kemi, såvel som deres iltisotop-sammensætning samt forholdet mellem de forskellige bestanddele i kondritterne (f.eks. matrix, kondruler og calcium-aluminium inklusioner (CAI)).

Almindelige kondritter

Disse kondritter er, som navnet antyder, de oftest forekommende kondritter, og udgør ca. 80% af alle meteoritter og 85% af alle kondritter. Almindelige kondritter opdeles i tre undergrupper baseret på deres indhold af jern. Når almindelige kondritter forekommer så almindeligt, skulle man tro at der også var mange af de asteroide, de kommer fra. Det har imidlertid vist sig vanskeligt bare at finde en enkelt asteroide med samme mineralsammensætning som de almindelige kondritter.

Enstatit-kondritter

Disse kondritter udgør ca. 10% af alle kondritter. Mellem 60 og 80% af deres volumen består af

mineralet enstatit, som er et magnesiumrigt silikat. De deles op i to grupper, samt et enkelt ugrupperet individ. Denne opdeling sker på baggrund af deres indhold af metallisk jern. Enstatit-kondritter indeholder adskillige mineraler som ikke kendes fra Jorden. Det skyldes at mineralerne i enstatit-kondritterne er dannet under ekstremt iltfattige forhold i det tidlige solsystem, og sådanne forhold er sjældne her på Jorden.

Kul-kondritter

Disse kondritter udgør de sidste 5% af kondritterne, og bliver på nuværende tidspunkt opdelt i 8 undergrupper, baseret på deres kemiske sammensætning, deres mineralogi og deres iltisotop-sammensætning.

CI-kondritterne (Ivuna-type), som er en af de otte grupper, har samme sammensætning af grundstofferne som Solen. Undtagelser er elementerne N, C, He og H (kraftigt forarmet i CI-kondritter i forhold til Solen), samt grundstoffet Li som nedbrydes i Solens kerne (beriget i CI-kondritter i forhold til solen).

Allende kondritten er en såkaldt CV kulkondrit. Betegnelsen "V" kommer fra den første kendte V-type kulkondrit ved navn Vigarano.

Navngivning efter tekstur

Selvom kondritterne er de bedst bevarede prøver af materialet i det tidlige solsystem så er det desværre sådan at de er blevet en smule omdannede i den asteroide, hvor de

er blevet opbevaret i 4,5 milliarder år. Derfor får kondritter også et tal der henviser til deres omdannelsesgrad. Tallet varierer fra 1 til 6. Type 3 er de mindst omdannede af alle kondritterne og derfor dem, hvor materialet fra solsystemets oprindelse er bedst bevaret. Et godt eksempel er Allendemeteoritten, som er en CV3-type kondrit. De processer der har ændret tekturen i kondritterne, er rekrystallisation på grund af opvarmning i en asteroide (højere nummer) og omdannelser forårsaget af vand i asteroiden (lavere nummer).

Jernmeteoritter

Jernmeteoritter ligner ikke noget andet vi kan finde på Jordens overflade. Hvis man er så heldig at finde en jernmeteorit, vil man straks kunne mærke at den er omtrent dobbelt så tung som en almindelig sten af samme størrelse. Jernmeteoritter er små stumper af asteroiders planetkerner. Dybt nede i Jorden findes der tilsvarende materiale, men vi vil aldrig nogen sinde kunne få hentet en prøve op. Jernmeteoritter er derfor vores eneste mulighed for at se hvordan planetkerner ser ud.

Jernmeteoritter er ikke bare dobbelt så tunge som almindelige sten – de er også ofte smukt formede efter den voldsomme tur ned gennem Jordens atmosfære (Figur 1). Hvis man skærer dem over vil man kunne se at de indeni ofte består af en enkelt forgrenet krystal (Figur 2). Selv den store Agpalilikskive i rum 1 er et fragment af en stor forgrenet enkeltkrystal. Ved at studere krystallens udformning kan man sige noget om hvor langsomt asteroidekernen størknede – og dermed hvor stor asteroiden var.

Af Henning Haack

(3•4)



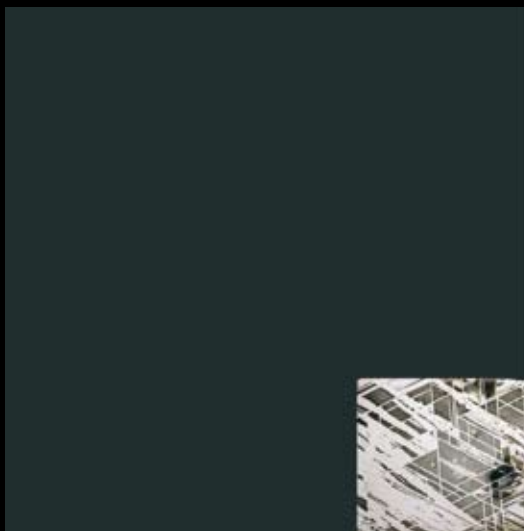
Figur 1. Fragment af IIIAB jernmeteoritten Henbury. Henbury kommer fra et meget stort forhistorisk nedslag i Australien. De største fragmenter var for tunge til at atmosfæren kunne bremse dem ned og de ramte derfor jordoverfladen med overlydshastighed. Det førte til at disse fragmenter, der formentlig vejede flere hundrede tons, fordampede og dannede en række såkaldte eksplosionskratere. De mindre fragmenter blev bremset ned i atmosfæren og faldt som meteoritter.

© D. Ball Arizona State University.

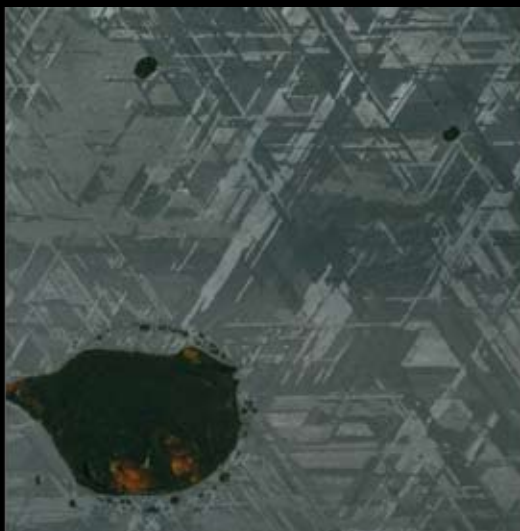


Figur 2. Poleret og ætset skive af jernmeteoritten Carbo, der kan ses i udstillingen. Carbo blev fundet i Sonora, Mexico i 1923. Den 15 cm brede skive har en meget tydeligt, sammenhængende, Widmanstätten struktur der viser at de oprindeligt størknede som et enkelt krystal. Ligesom den store Agpalilik-skive indeholder Carbo brunlige indeslutninger af mineralet troilit (FeS). Troilitten er størknet fra svovlholdige smelteindeslutninger, der blev tilbage efter det omkringliggende metal var størknet.

© O. Johnsen, GM.



Carlton



Gibeon



Carbo

Hvordan er jernmeteoritterne dannet?

Når der i det hele taget findes jernmeteoritter, så må der have eksisteret opsmeltede asteroider i det tidlige solsystem. Det eneste sted man kan danne metal med samme egenskaber som jernmeteoritter er i en asteroidekerne. Hvis man tager en asteroide, bestående af samme materiale som kondritterne, og varmer den op til metals smeltepunkt, så vil metallet smelte og løbe ind i centrum af asteroiden og danne kernen. Den samme proces fandt sted på planeterne, som f.eks. Jorden. Metallet tager alle de grundstoffer med sig som er opløselige i smeltet metal. Det er for eksempel guld og platin, hvilket er årsagen til at disse to grundstoffer er så sjældne på Jordens overflade. Det er altså ikke nødvendigvis de tungeste grundstoffer, der samles i kernen. Tunge grundstoffer som uran, bly og kviksølv er ikke opløselige i metal og bliver derfor i kappen og skorpen på opsmeltede asteroider og planeter.

Det har i mange år været en gåde, hvordan små asteroider kunne varmes op til ca. 1500 °C, så metallet kunne smelte og samle sig i asteroidens kerne. Moderlegemerne til jernmeteoritterne har ikke været større end ca. 100 km i diameter, og de ville hurtigt afkøles med mindre der var en både hurtig og kraftig energikilde til stede. Det menes nu at det var kortlivede radioaktive stoffer, der forårsagede opvarmningen og opsmeltningen. I den stjernetåge solsystemet dannedes fra, var der to kortlivede radioaktive isotoper af aluminium og jern tilstede: ^{26}Al og ^{60}Fe

(aluminium 26 og jern 60). Nye analysemetoder, blandt andet udviklet på Københavns Universitet, har vist at de to radioaktive stoffer var til stede i de asteroider, meteoritterne kommer fra. Som beskrevet i kapitel 1.1 så dannes ^{26}Al og ^{60}Fe i supernovaeksplosioner. Hvis materialet i en asteroide klumpede sig sammen inden de radioaktive stoffer var helt henfaldet, så vil asteroiden blive udsat for indre opvarmning og opsmeltning p.g.a. varmeudviklingen fra henfaldet. Da de kortlivede radioaktive isotoper henfalder helt i løbet af få millioner år må det betyde at solsystemet blev dannet kort efter en eller flere supernovaeksplosioner i vores umiddelbare nærhed.

Hvilke asteroider kommer jernmeteoritterne fra?

Hvis man analyserer jernmeteoritternes kemiske sammensætning, så kan man se at mange af dem ligner hinanden. Det gør de faktisk også rent bogstaveligt, da de jernmeteoritter, der har nogenlunde samme kemiske sammensætning sædvanligvis også viser sig at have samme type krystalstruktur, og indeholde de samme mineraler. Det tolkes sådan at de jernmeteoritter, der er kemisk og strukturelt sammenlignelige, også kommer fra den samme asteroidekerne. På den måde inddeler man jernmeteoritterne i grupper med hver deres betegnelse og formentlig fælles oprindelse i den samme asteroidekerne. Den største gruppe af jernmeteoritter kaldes IIIAB og indeholder knap 300 kendte meteoritter, deriblandt Cape York meteoritterne. Du kan finde navnene på de

øvrige jernmeteoritgrupper i det første afsnit af dette kapitel. Hvis man ser på de udstillede jernmeteoritter, vil man tydeligt kunne se at alle IIIAB jernmeteoritterne har samme struktur men er forskellige fra de fleste øvrige grupper af jernmeteoritter.

Der er dog langt fra alle jernmeteoritter, der falder i disse grupper. Dem der ikke passer ind i grupperne kalder vi unikke, eller ugrupperede. De unikke jernmeteoritter kommer formentlig fra asteroider hvorfra vi endnu ikke har fundet andre meteoritter. Ved at tælle antallet af jernmeteoritgrupper og unikke jernmeteoritter har vi således fundet ud af, at vi har knap 1000 kendte jernmeteoritter, som kommer fra knap 100 asteroider.

Når vi sidder med en stump af en asteroide jernkerne i hånden, så er der næppe meget tilbage af asteroiden – den må være blevet knust på et tidspunkt. Det giver derfor næppe mening at lede efter den på stjernehimlen. Men vi kan alligevel sige noget om, hvor vores jernmeteoritter kommer fra. Som beskrevet i kapitlet om asteroider så kan vi, ved at analysere det lys vi modtager fra asteroiderne, bestemme hvad deres overflader består af. Her har det vist sig, at en del af asteroiderne har overflader, der hovedsageligt består af metal. Vi har dog ingen mulighed for at måle overfladens kemiske sammensætning, så vi ved ikke om nogen af disse metalliske asteroider svarer til nogen af vores jernmeteoritgrupper.



Toluca



Old Woman

Figur 3. Sammenligning af Widmanstätten mønsteret i 5 forskellige jernmeteoritter: Carlton (fineste octahedrit); Gibeon (fin octahedrit); Carbo (medium octahedrit); Toluca (grov octahedrit); Old Woman (groveste octahedrit). Alle fem meteoritter er vist i naturlig størrelse. © O. B. Berthelsen/GM.

Hvor er resten af asteroiden blevet af?

Hvis vi har jernmeteoritter fra op mod 100 forskellige asteroidekerner så skulle man tro at vi også ville have en masse stenmeteoritter fra disse asteroiders kapper og skorper. Overraskende nok så er der ikke en eneste af stenmeteoritgrupperne, der ser ud til at komme fra samme asteroide som jernmeteoritgrupperne. Nogen af pallasitterne, som omtales i næste afsnit kommer formentlig fra grænsen mellem kernen og kappen i IIIAB asteroiden – men vi har ingen rene stenmeteoritter fra kappen eller skorpen af IIIAB asteroiden. Vi ved ikke hvor stenmaterialet er blevet af, men der er dog nogle bud på en forklaring. Vi kan se at IIIAB jernmeteoritterne har været udsat for kosmisk stråling i ca. 650 millioner år. Derfor må det med andre ord være 650 millioner år siden asteroiden blev knust – formentlig i et stort sammenstød med en anden asteroide. Vi har aldrig fundet stenmeteoritter, der har været udsat for kosmisk stråling i så lang tid, så noget kunne tyde på at de ikke kan overleve så længe i rummet. Dels nedbrydes stenmeteoritter hurtigere når de bombarderes med mikrometeoritter, og dels er der noget der tyder på at de hurtigere bevæger sig ind i Solen eller ud af solsystemet, end jernmeteoritterne.

Hvor store var asteroiderne?

Ved at analysere krystalstrukturen i jernmeteoritterne kan vi regne os frem til hvor hurtigt asteroidekernen afkøledes efter den var størket for knap 4,5 milliarder år siden.

Det man gør i praksis er at regne krystallernes udvikling igennem i en computer. Det viser sig at hvis kernen køler hurtigt ender krystallerne med at have en anden struktur end hvis den køler langsomt. Man prøver så med forskellige afkølingsrater indtil beregningen giver noget, der ligner det vi kan måle os frem til i meteoritterne. For gruppe IIIAB har vi for eksempel målt at kernen køledes med ca. 50 grader per million år. Det kan med andre ord ikke lade sig gøre at lave en kopi af en jernmeteorit i laboratoriet ved mindre man har overordentlig god tid!

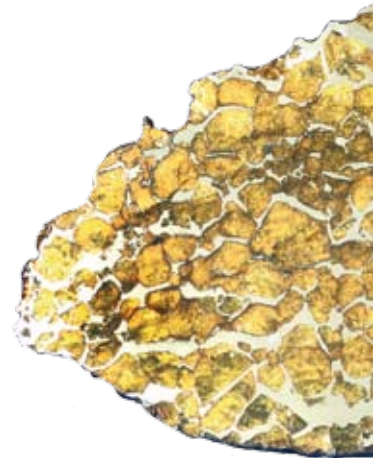
Da store legemer køler langsommere end små legemer så kan kernens kølehastighed fortælle os hvor stor asteroiden var. For IIIAB asteroidens vedkommende, må asteroiden have haft en radius på ca. 50 km. Selv om de opsmeltede asteroider havde en indre struktur i stil med Jordens, så var de med andre ord langt mindre.

Pallasitter

Pallasitter er nogle af de lettest genkendelige og smukkeste meteoritter. De består af nogenlunde lige del metal og silikat – det sidste i form af mineralet olivin. Hvis man holder en tynd skive pallasit op mod lyset, vil man kunne se lyset skinne gennem de cm-store olivinkrystaller.

Blandingen af metal og olivin giver os en god ide om hvor disse pallasitterne kommer fra. Olivin er et almindeligt silikatmineral som formentlig dominerede den nedre kappe i asteroider ligesom metal dominerede kernen. Det er derfor svært at forestille sig andet, end at pallasitterne kommer fra grænselaget mellem kerne og kappe i en differentieret asteroide.

Af Henning Haack

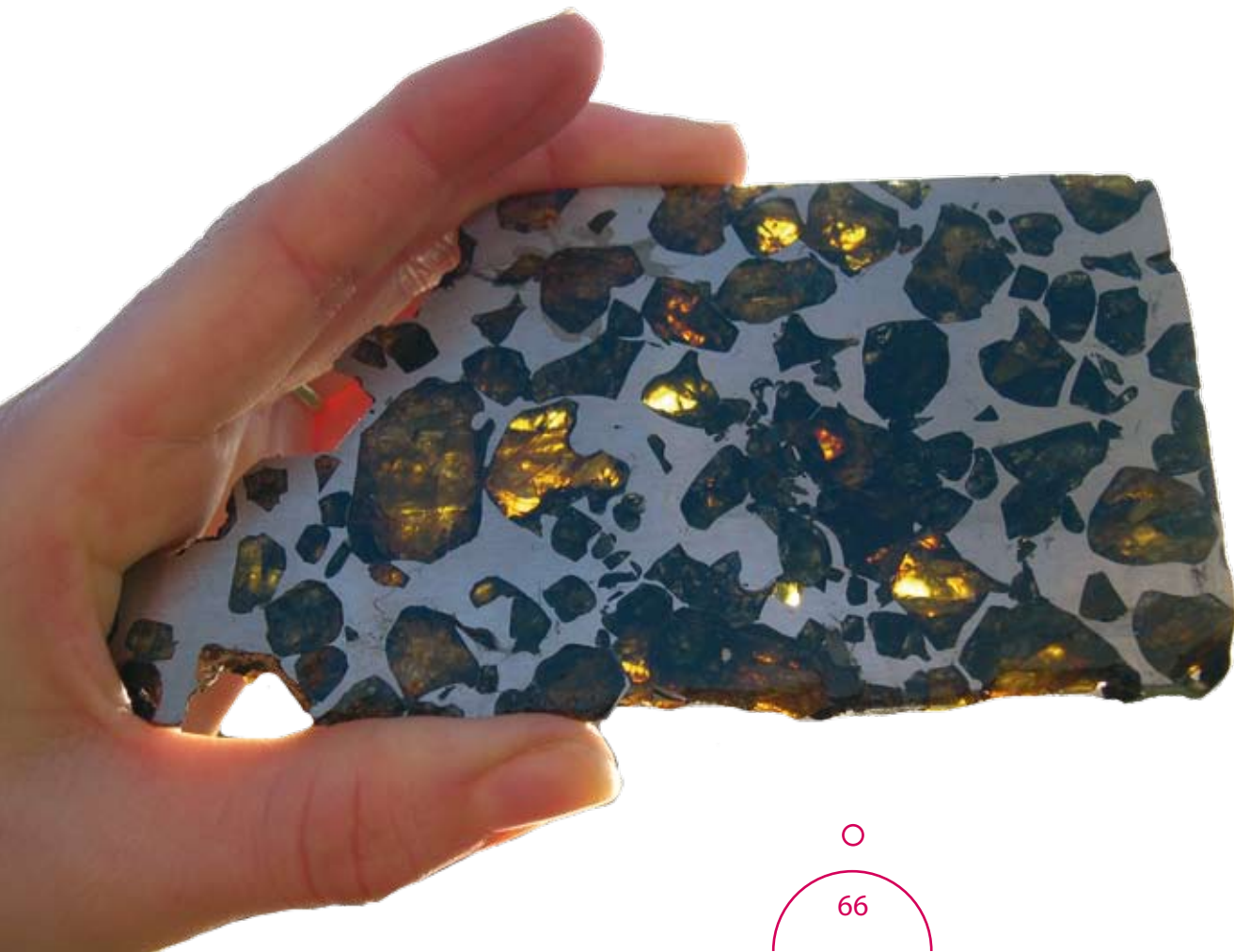


Hvor mange asteroider har vi pallasitter fra?

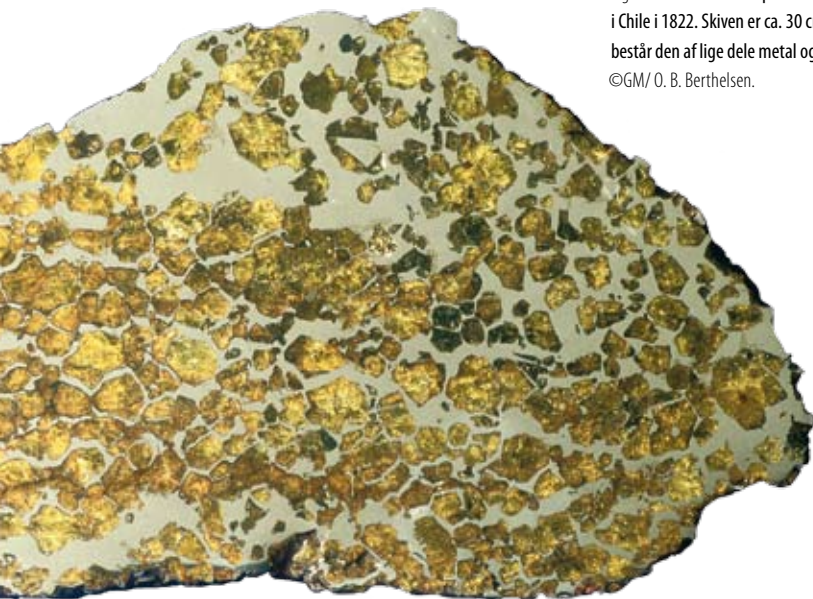
Det er ikke alle pallasitter, der kommer fra den samme asteroide. De store olivinkrystaller i pallasitterne indeholder ilt og ved at måle forholdet mellem de tre stabile iltisotoper ^{16}O , ^{17}O og ^{18}O kan vi undersøge om to meteoritter kan komme fra samme asteroide. Hvis en asteroide smeltes op, vil dens indre blive blandet grundigt, og ilt-isotopsammensætning vil ikke længere

variere tilfældigt indenfor den samme asteroide, som det er tilfældet i nogle kondritter. Analyser af iltisotopforholdene viser at vores pallasitter kommer fra mindst tre forskellige asteroider. Nogen af pallasitterne indeholder, udover olivin, en smule af et andet silikamineral – pyroxen. Det gælder for eksempel den udstillede pallasit Vermillion. Disse såkaldte pyroxenpallasitter må være kommet fra en asteroide, hvor kappen havde en anden kemisk sammensætning, således at der ikke udelukkende var olivin i bunden af kappen.

(3.5)



Figur 1. Poleret skive af pallasitten Esquel, der blev fundet i Argentina i 1951. Meteoritten består af lige dele metal og ravgule stykker af mineralet olivin. ©GM.



Figur 2. Poleret skive af pallasitten Imilac, der blev fundet i Chile i 1822. Skiven er ca. 30 cm bred. Ligesom Esquel består den af lige dele metal og olivin.
©GM/ O. B. Berthelsen.

Selvom pallasitter hører til nogle af de meteoritter vi bedst forstår oprindelsen af, så er der alligevel nogle ting vi ikke helt kan forklare. Det er f.eks. lidt svært at forstå at de ikke er delt bedre op i metal og silikat. Metallet har en dobbelt så stor massefylde som silikat og man skulle derfor tro at silikat hurtigt ville stige til vejrs inden i den smeltede metalkerne, sådan at grænsen mellem silikat og metal blev skarp. Men sådan var det åbenbart ikke – i de fleste pallasitter optræder metal og silikat sammen. Bemærk at den store pallasitskive, Imilac, er tydelig lagdelt. Noget kunne tyde på at silikat og metal er blevet genopblandet mens metallet størknede.

Pallasitten Krasnojarsk

Pallasitter har også haft deres rolle i historien. Den første person, der påviste at meteoritter kommer udefra var Ernst Friedrich Chladni der i 1794 udgav en artikel med titlen:

„Über den Ursprung der von Pallas Gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, und Über Einige Damit in Verbindung stehende Naturscheinungen.“ (Om oprindelsen af de af Pallas fundne og andre tilsvarende jernmasser og om nogle dermed forbundne naturfænomener).

Det den omtalte Pallas havde fundet, var netop en meteorit af den type, der senere vil blive opkaldt efter ham – pallasitten Krasnojarsk. En af de stykker han havde studeret, endte i København som den først registrerede meteorit i museets samling. Den kan ses i udstillingen (Figur 3).

Før Chladnis banebrydende værk troede man at meteoritter var sten der enten var slynget ud af vulkaner eller hvirvlet op i tordenvejr. At nogle folk ude på landet påstod at byger af sten kunne falde fra en klar himmel kunne de lærde naturligvis ikke tro på. Først da Chladni rejste Europa tynd og studerede beretninger om meteoritnedfald, og også studerede selve stenene, blev det klart at meteoritter var sten fra det ydre rum. En ny videnskab var dermed født.



Figur 3. Pallasitten Krasnojarsk, der blev fundet i Rusland i 1749 og studeret af den tyske forsker Peter Pallas i 1772. Meteoritten består ligesom de øvrige pallasitter af metal og gule olivinkrystaller. Krasnojarsk har ligget længe i Jorden og metallet er derfor kraftigt angrebet af rust. Krasnojarsk blev erhvervet af "Universitetets Nye Natural Theater" omkring år 1800, som den første meteorit i den samling, der i dag befinder sig på Geologisk Museum. Stykket måler 14 cm i bredden. © GM/G. Møller Brovad, SNM.

Mesosideritter

af Henning Haack

Rester fra en kæmpe kollision i det tidlige solsystem

Mesosideritter er nogle af de mest bemærkelsesværdige og gådefulde meteoritter. Næsten lige meget hvordan man undersøger dem, så får man nogle resultater, der umiddelbart virker selvmodsigende. En ting kan vi dog blive enige om: de er stumper af en stor asteroide, der var involveret i en katastrofal kollision med en anden asteroide, kort efter solsystemet blev dannet. Vores opgave er nu at rekonstruere, hvad det var der skete, på grundlag af nogle tilfældige stumper, der er faldet på Jorden. Uden at vi har set kollisionen er det selvfølgelig en vanskelig opgave. Der er flere forskellige teorier, men ingen af dem kan uden videre forklare alle mesosideritternes egenskaber.

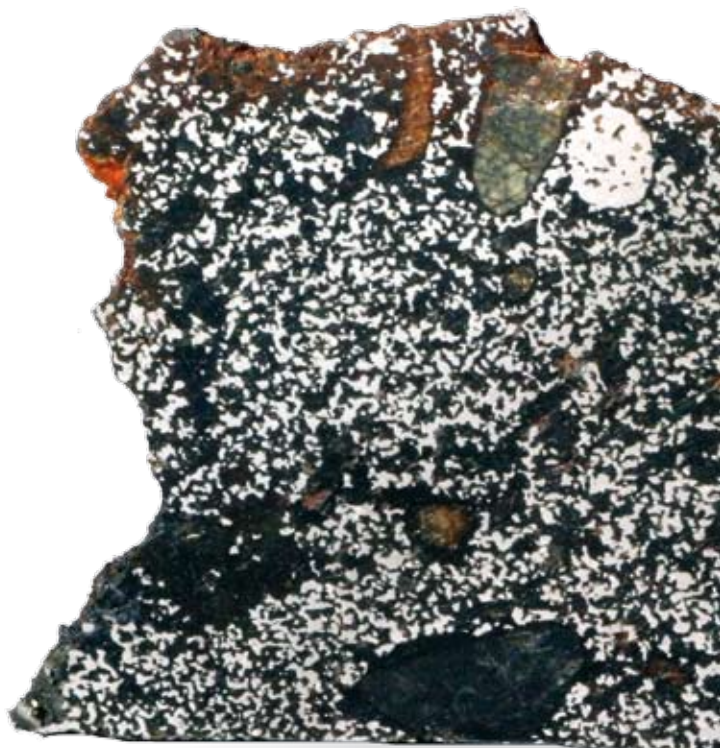
De mest gådefulde meteoritter

Mesosideritter består af basalt fra skorpen af et tidligere opsmeltet legeme, blandet grundigt sammen med smeltet metal fra en asteroides kerne. Om metallet kommer fra samme asteroide som basalten kan vi ikke rigtigt blive enige om. Under alle omstændigheder synes det besynderligt at mesosideritterne er blandinger af materialer fra overfladen og kernen. Kappen, som ellers er den der fylder mest i en asteroide, ser vi stort set ikke noget til. Metallet er usædvanligt, fordi det tilsyneladende er det langsomst afkølede materiale vi kender til. Dele af metallet har, ligesom jernmeteoritterne, en Widmanstätten struktur (se kapitel 3.4). Ved at analysere den, kan man regne sig frem til at metallet kølede langsommere end 1 grad

per million år. Ikke engang på Jorden har vi set bjergarter, der er kølet så langsomt. Den langsomme afkøling viser at asteroiden må have været stor – over 100 km i radius. Silikaterne er derimod meget hurtigt afkølede – omkring en grad per år. Det er nu ikke så selvmodsigende som man lige skulle tro, fordi silikaterne giver os kølehastigheden ved høj temperatur mens metallet viser afkølingsraten ved meget lav temperatur – nogen få hundrede grader. Det fortæller os at dengang meteoritterne var en del af den oprindelige asteroide blev de først kølet hurtigt ved høj temperatur og dernæst ekstremt langsomt ved lav temperatur. Den hurtige afkøling hænger formentlig sammen med den kæmpe kollision asteroiden var involveret i.

En stor asteroide

En anden mærkelig ting ved mesosideritterne er at de er meget yngre end alle andre meteoritter – på nær dem fra Mars. Der findes et radioaktivt stof i meteoritterne kaldet kalium 40. Det henfalder ganske langsomt til argon 40. Argon er en luftart, og hvis asteroiden er varm, så vil gassen hurtig finde vej ud i rummet. Ved at måle mængden af kalium 40 og argon 40 i mesosideritterne kan man derfor finde ud af hvor længe siden det er at mesosideritterne har været varme nok til at argon kunne undslippe. Det viser sig at være 3,9 milliarder år. Det kan måske synes som lang tid men det er usædvanlig lidt for en meteorit fra en asteroide. Meteoritter fra asteroider er normalt ca. 4,5 milliarder år gamle. Asteroider er langt mindre end planeter, og har





Figur 1. Mesosideritten Mincy der blev fundet i Missouri, USA i 1857. Man kan tydeligt se at det er en knust bjergart. Den består af store stumper af både basalt og metal i en grundmasse hovedsageligt bestående af mm-store basaltstykker, der er blevet blandet med metal mens metallet stadig var smeltet. Stykket måler 14 cm på den lange led. ©GM/O. B. Berthelsen.

derfor hurtigt mistet deres varme. Derfor har de ikke været geologisk aktive ret længe efter de blev dannet. Når mesosideritterne, som de eneste, tilsyneladende kom fra en asteroide der holdt sig aktiv meget længe, så tyder det igen på at den var usædvanlig stor.

To asteroider kolliderer

Der er grund til at tro, at den kollision der førte til dannelsen af mesosideritterne, var endog særdeles voldsom. Vi forestiller os at det der skete var, at en asteroide med en radius på omkring 150 km, blev ramt af en anden asteroide med en radius på mindst 50 km. De har formentlig ramt hinanden med en hastighed på omkring

5 km/s – det er den typiske hastighedsforskel mellem asteroider i asteroidebæltet. Den største asteroide var stadig delvist opsmeltet – i hvert fald var metallet i dens kerne helt opsmeltet. Det er svært at forestille sig hvad der vil ske i et sådant sammenstød – det er en kollision af en dimension langt ud over hvad noget menneske nogensinde har set. Det er dog muligt at regne forløbet igennem ved hjælp af computermodeller. Når man gør det finder man ud af, at begge asteroider vil blive totalt knust, og fragmenterne flyve til alle sider. Farten er dog ikke højere end at de fleste stumper efter en uges tid vil være faldet tilbage igen. De vil endvidere falde tilbage i hel tilfældig orden. Der er derfor intet mærkeligt i at metal fra kernen vil blive blandet med basalt fra overfladen – men måske

nok lidt mærkeligt at vi slet ikke har set noget af materialet fra kappen. På den anden side så aner vi heller ikke, om det materiale vi har fået, er typisk for hele asteroiden efter den fik vendt vrangen ud. Vi kan måske endda gå ud fra at det næppe er særlig typisk. Der er i hvert fald ikke nogen der omhyggeligt har udvalgt stumperne til os. Som altid i meteoritforskningen må vi arbejde med de stumper, der tilfældigt er blevet os tilkastet.



Figur 1. Geologisk Museums howardit, Old Homestead.
©GM/O. B. Berthelsen.



HED meteoritter

(3.7)

Hvad er HED meteoritter?

HED meteoritterne (howarditter, eucritter og diogenitter) tilhører gruppen af differentierede eller ikke-kondritiske meteoritter, der stammer fra en differentieret moderasteroide – det vil sige en asteroide hvis indre består af en kerne, en kappe og en skorpe. HED meteoritterne udgør den største suite af beslægtede magmatiske bjergarter vi har fra solsystemet, udover materiale fra Jorden og Månen.

En del af eucritterne er basalter, og dermed vulkanske bjergarter. De er for mere end 4 milliarder år siden dannet som lavastrømme der flød ud på en asteroides overflade. I alt regner vi med at lavastrømmene til sidst var mindst 10 km tykke, og dannede skorpen på moderasteroiden. Resten af eucritterne er mere grovkornede bjergarter med samme sammensætning som de basaltiske eucritter. De kaldes de kumulate eucritter.

Diogenitterne er grovkornede bjergarter, som dannedes i den øvre kappe på moderasteroiden. Der er nogen usikkerhed om i hvilken dybde de nøjagtigt blev dannet, men man regner med en dybde på mindst 20-50 km. Enkelte mineraler i diogenitterne er dog dannet i meget større dybde.

Howarditter består af en opkøst blanding af diogenitter og eucritter, der formentlig er dannet ved gentagne meteornedslag på asteroiden.

Vesta og HED meteoritterne

Oprindeligt var howarditter, eucritter og diogenitter opdelt i tre forskellige grupper, men da man fandt eucrit- og diogenitfragmenter inde i alle howarditterne, stod det klart at de tre grupper var nært beslægtede og måtte komme fra samme moderlegeme. Moderlegemet er højst sandsynlig asteroiden Vesta.

Der er flere grunde til at antage at Vesta er HED meteoritternes oprindelsessted.

- Mineralsammensætningen af Vesta og HED meteoritterne er ens. Vi kender samtidigt ikke andre store asteroider med samme unikke sammensætning som Vesta og HED meteoritterne.
- Vesta har en gennemsnitlig diameter på 516 km, og er dermed den tredjestørste asteroide i asteroidebæltet. En størrelse som Vestas er nødvendig for at kunne forklare dannelsen af HED meteoritterne, da nogle af mineralerne i meteoritterne, som stammer fra asteroidens øvre kappe, er dannet i mere end 120 km dybde.

- Man har fundet en beslægtet gruppe af mindre asteroider, Vestoiderne, som befinder sig i relativ nærhed af Vesta og har samme mineralsammensætning. De antages at være resultatet af en stort meteornedslag på Vesta, og forklarer hvordan vi har kunnet få materiale fra Vesta transporteret ned til Jorden.



Figur 2. Hammada al Hamra 262, som er en af Geologisk Museums eucritter. ©GM/O. B. Berthelsen.

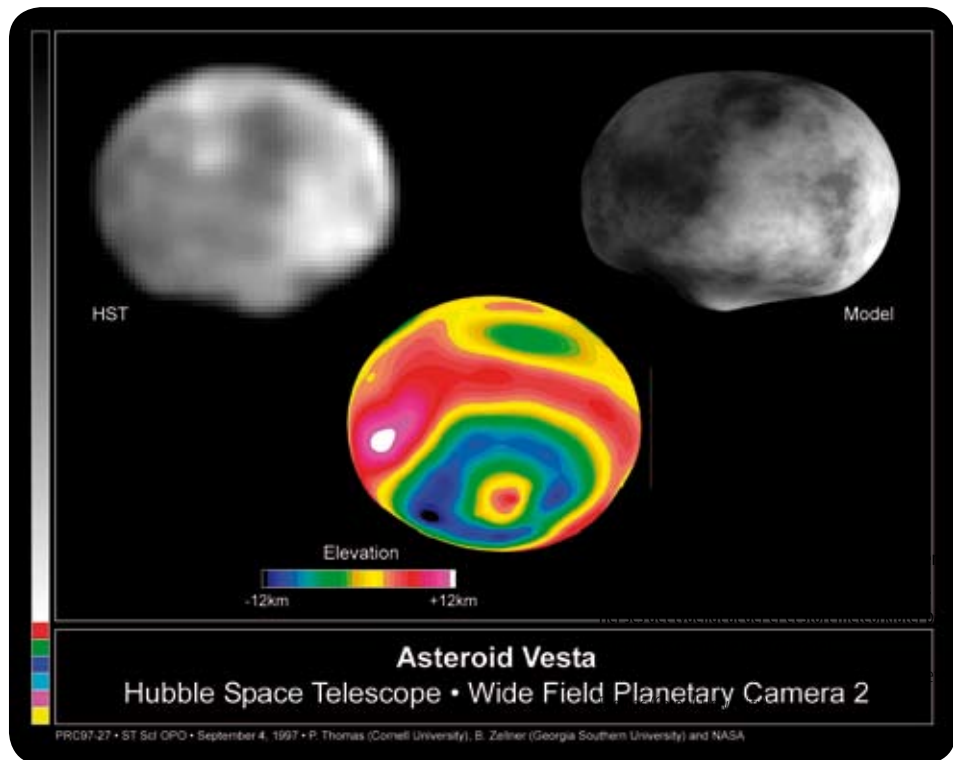


Figur 3. Diogeniten Johnstown, Geologisk Museum. ©GM/O. B. Berthelsen.

HED meteoriternes alder

HED meteoriternes hører til blandt det ældste materiale i solsystemet. Eucritterne er ældst af alle HED meteoritterne, og de ældste eucritter er kun et par millioner år yngre end de calcium-aluminium-inklusioner der findes i kondritterne, og regnes for at være det absolut ældste materiale i solsystemet med en alder på 4,567 milliarder år.

Indholdet af datterisotoperne efter de kortlivede radioaktive isotoper ^{26}Al , ^{60}Fe og ^{53}Mn i HED meteoritterne viser også, at moderlegemet til HED meteoritterne dannedes senest et par millioner år efter solsystemets dannelse. Den sidstnævnte af de kortlivede isotoper, ^{53}Mn , viser også at moderlegemet opdeltes i en kerne, en kappe og en skorpe hurtigt efter dannelsen, for mellem 4,564 og 4,557 milliarder år siden.



Meteoritter fra månen

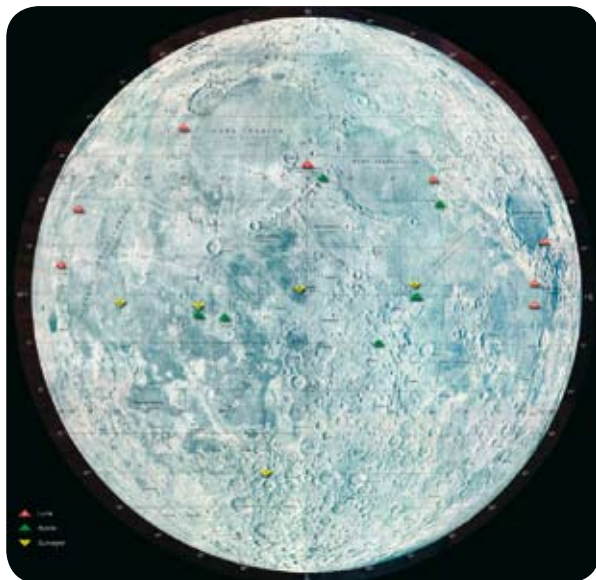
Et kendt moderlegeme

Udover meteoritterne fra Mars og Vesta er materialet fra Månen det eneste vi har fra solsystemet uden for vores egen Jord, hvor vi kender oprindelsesstedet. Materialet fra Månen består af månemeteoritterne, samt de prøver der blev hjembragt fra Månen af hhv. amerikanske og russiske rumfartøjer i tresserne og halvfjerdserne. I alt er der hjembragt lidt mindre end 400 kg materiale fra Månens forside. Månemeteoritterne kommer fra både Månens forside og bagside.

Af Christine Marvill

Figur 2. Et eksempel på en meteorit fra Månen, med tydeligt kantede klaster i forskellige størrelser. Her ses et af Geologisk Museums månestykker, meteoritten NWA 773.

©GM/O. Bang Berthelsen.



Figur 1. På kortet over Månen ses landingspladserne for hhv. Luna-, Apollo- og Surveyor-missionerne

©NASA

Månens bjergarter

Da Månen igennem tiden har været udsat for utallige meteornedslag og ikke har nogen beskyttende atmosfære ligesom Jorden, er den øvre del fuldstændigt opknust og dækket af et flere meter tykt lag af meget finkornet og porøst materiale – den såkaldte Måne-regolith. Alt det materiale der blev hjembragt fra Månen, stammer fra denne allerøverste del af Månens skorpe, så hvis vi vil have mere at vide om Månens dannelse og Månens primitive bjergarter, er vi nødt til at undersøge meteoritterne fra Månen. Disse meteoritter er nogle af de allermest sjældne meteoritter.

De meteoritter der kommer fra Månen består i grove træk af en opknust blanding (breccie) af de to forskellige hovedbjergartstyper:

1) Månens højlande, som primært består af det

lyse mineral anorthit, som er et let silikatmineral, og som er resterne af Månens ældgamle skorpe. Denne skorpe menes at være dannet ud fra et globalt magmaocean på Månen, hvor anorthitrig lava flød op til overfladen, fordi det var lettere end det underliggende jern- og titanrige kappemateriale.

2) Marebasalt fra de yngre nedslagskratere. Marebasalten har fået sit navn fordi man tidligere troede at det var store have man kunne se på Månen.

De to typer af bjergarter kan ses med det blotte øje, som hhv. lyse og mørke områder på Månens overflade, når der er fuldmåne.

Da der ikke er noget vand og nogen atmosfære på Månen, kan materiale ikke transporteres rundt på overfladen, og der findes derfor ikke andre bjergartstyper end de magmatiske/vulkanske.

Meteoritternes aldre

Som et udgangspunkt er der tre forskellige aldre man er interesseret i, når man undersøger meteoritter: 1) deres krystallisationsalder, 2) den tid det har taget meteoritterne at rejse fra deres moderlegeme og ned til Jorden og 3) længden af deres ophold på Jorden.

Månens krystallisation

For at bestemme krystallisationstidspunktet, bruges langlivede radioaktive isotoper og deres henfaldsprodukter, som ophobes i meteorittens indre over tid.

Der er stor forskel på månemeteoritternes dannelsesalder, men de er mellem ca. 4,4 mia. år og 2,7 mia. år gamle og derved ældre end de fleste bjergarter vi kender fra Jorden. Højlandene krystalliserede kort efter Månens dannelse, og er 4,4 mia. år gamle. Marebasalterne er de yngste af Månens bjergarter, med aldre på 4,23 til 2,70 mia. år. Langt de fleste af disse er dannet for mere end 3,9 mia. år siden, på et tidspunkt i solsystemets historie, hvor der var langt flere meteornedslag end i dag.

Meteoritternes færd til Jorden

For at bestemme hvor længe meteoritterne har været undervejs, fra de blev slået ud af Månen, til de landede på Jordens overflade, benytter man kosmisk stråling. Alle meteoritter, overflader på asteroider og måner uden atmosfære bliver udsat for kosmisk stråling fra verdensrummet. Ved at måle meteoritternes påvirkning af kosmisk stråling, kan vi bestemme hvor længe der er gået fra de blevet slået løs af moderlegemet, til de landede på Jorden. Det viser sig ved brug af denne metode at månemeteoritterne typisk har været mindre end 100.000 år undervejs, inden de landede på Jorden, og de fleste har været mellem 1.000 og 10.000 år undervejs. Det er altså stadig en langsommelig proces at få en månemeteorit fragtet ned til Jorden.

Meteoritternes ophold på Jorden

På grund af den kosmiske stråling blev der dannet radioaktive isotoper i meteoritterne på deres rejse til Jorden. Når meteoritten er faldet på Jorden henfalder disse isotoper efterhånden og mængden af dem kan derfor bruges til at bestemme hvor lang tid meteoritten har været på Jorden. I tilfældet med månemeteoritterne er den gennemsnitlige tid de har været på Jorden ca. 100.000 år, men der er aldre der går helt op til 140.000 år. At man ikke finder meteoritter på Jorden der har været her endnu længere tid, er et udtryk for at ældre meteoritter er blevet forvitret og derved er forsvundet, eller at vi muligvis ikke har ret meget is på Antarktis der er ældre end 100.000 år.



Mars meteoritter

Mars er genstand for en voldsom udforskning i disse år. Der er sendt en mindre armada af rumsonder mod vores naboplanet, der udforsker den både fra kredsløb højt over Mars' overflade og ved hjælp af sindrige landingsfartøjer, der bevæger sig rundt på selve planetens overflade. Der er dog en ting som alle disse missioner ikke har kunnet give os – et stykke af Mars til studie i et jordisk laboratorium. Selvom rumsonderne indeholder mange slags avancerede måleinstrumenter så kan de på ingen måde give resultater, der kan sammenlignes med dem der kan opnås i et laboratorium her på Jorden. Det er derfor svært at overvurdere betydningen af at naturen har forsynet os med gratis prøver af vores naboplanet – frit leveret i form af meteoritter.



Figur 1. Shergottitten Sayh al Uhaymir 005, som er en anden af Geologisk Museums Mars meteoritter. ©GM/O.B. Berthelsen.



Figur 2. Shergottitten Zagami, som er en af Geologisk Museums Mars meteoritter. ©GM/O.B. Berthelsen.

Af Christine Marvill

(3.9)

Hvordan kan vi vide at de er fra Mars?

Meteoritterne fra Mars er, udover meteoritterne fra Månen og asteroiden Vesta, de eneste meteoritter vi kender oprindelsesstedet for. Mars meteoritterne minder på mange måder om bjergarter man kender fra Jorden.

Da der aldrig er blevet bragt noget materiale tilbage fra Mars, er de vores eneste kilde til at studere Mars' udvikling her på Jorden. Der er to gode grunde til at vi er overbeviste om at disse meteoritter kommer fra Mars. Den ene er at man kan bestemme deres alder. Da der er tale om vulkanske bjergarter kan man bestemme det tidspunkt, hvor der har været vulkansk aktivitet. De yngste af Mars meteoritterne har aldre på helt ned til 170 millioner år. Det er ikke meget for meteoritter, som normalt er 4.400-4.567 millioner år gamle. Det viser at disse meteoritter må komme fra et stort legeme, som stadig var vulkansk aktivt for 170 millioner år siden – dvs. de må komme fra en planet. De eneste planeter der har været vulkansk aktive for nylig er Jorden, Venus og Mars. Da Venus og Jorden kan udelukkes af forskellige andre årsager, kan man alene ud fra alderen være temmelig sikker på, at de kommer fra Mars.

Derudover har man i nogle af de Mars meteoritter der er af vulkansk oprindelse, fundet gasblærer med samme sammensætning som Mars' atmosfære. Da Mars' atmosfære er enestående i solsystemet er det ikke muligt at finde andre steder end Mars, hvor meteoritterne kan komme fra.

SNC meteoritter

Meteoritterne fra Mars deles op i tre grupper: Shergottitter, nakhitter og chassignitter, som samlet også kaldes SNC meteoritter. Derudover er der fundet én meteorit, nemlig ALH84001, som falder udenfor de førnævnte grupper, og som vil blive behandlet særskilt.

Alle meteoritterne fra Mars er silikafattige, og rige på jern og magnesium. Der er altså ikke tale om udviklede bjergarter, som dem man finder på Jorden.

Shergottitter er de mest almindelige af Mars meteoritterne, og det er også den gruppe der har den største variation i både kemi og bjergartstyper. De har alle kemisk sammensætning som basalt, men gruppen udgøres både af vulkanske bjergarter (basalter) og kumulater fra dybere lag i Mars undergrund

(Iherzolitter). De basaltiske shergottitter består primært af mineralerne clinopyroxen og plagioklas, mens shergottit-kumulaterne primært består af olivin, clinopyroxen og chromit.



Figur 3. Billedet viser Mars meteoritten ALH84001, som er en del af Mars' urskorpe. ©NASA

ALH84001

ALH84001 er den eneste Marsmeteorit som er en del af Mars ældgamle skorpe (ca. 4,5 mia. år). Alle andre meteoritter fra Mars er stykker af bjergarter der er yngre end 1.300 mio. år.

Den blev fundet på Antarktis, og den har siden været centrum i en ophedet debat, da nogle forskere på et tidspunkt mente, at de havde fundet spor efter liv i den. Denne teori er de fleste dog gået væk fra siden. Men den er stadig meget interessant, hvis vi vil prøve at forstå processerne i Mars' tidligste historie. Hvorfor er der f.eks. ikke flere stykker af den helt gamle skorpe? Hvordan blev den del af skorpen bevaret, som ALH84001 stammer fra?

ALH84001 består af 96% af mineralet orthopyroxen, samt ganske lidt chromit og plagioklas, og den kaldes derfor for en orthopyroxenit.



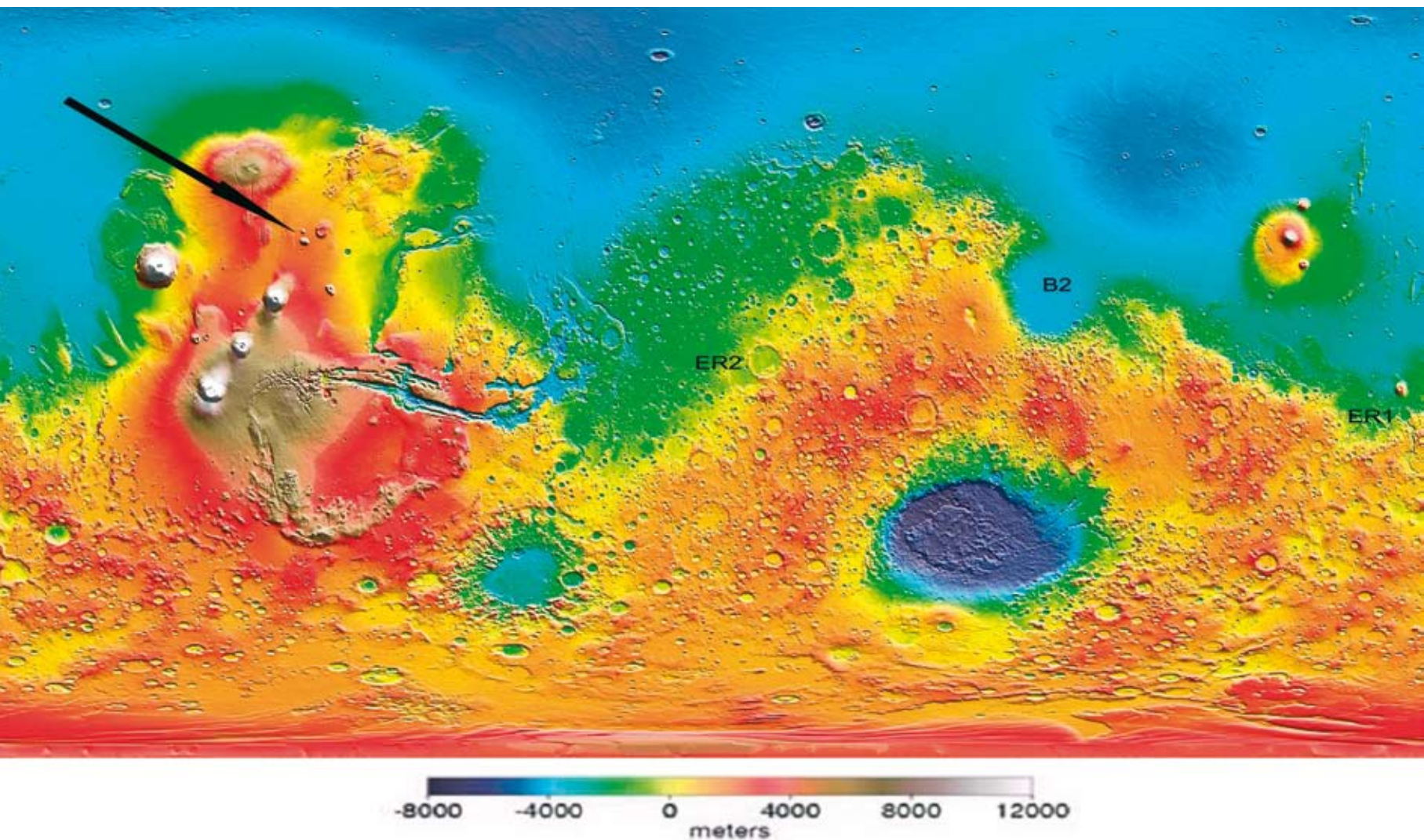
Figur 4. Geologisk Museums nahklit, Nahkla, som er den meteorit der har givet navn til denne gruppe.

©GM/O.B. Berthelsen.



Nahklitter er, ligesom en del af shergottitterne, kumulater, men de har en anden mineralogisk sammensætning, og består af ca. 80% augit (pyroxen), samt 5-10% olivin.

Chassignitter består af op til 90% jernrig olivin, og minder meget om jordiske kappebjergarter. Smelteinklusioner i olivin indeholder det vandholdige mineral amfibol, og det fortæller os at bjergarten dannedes under forhold, hvor relativt høje mængder ilt var til stede i Mars kappe. Denne type meteorit er den sjældneste af alle Mars meteoritterne, og indtil for nogle år siden, var der kun fundet et enkelt eksemplar på Jorden – Chassigny, som denne gruppe har deres navn efter.



Figur 5. Højdekort over Mars baseret på de såkaldte MOLA data (Mars Orbiter Laser Altimeter). De tre landingssteder for den Europæiske Beagle 2 (B2) der formentlig landede 2. juledag 2004 og NASAs to Exploration Rovers: Spirit (ER1) og Opportunity (ER2), der landede 3. og 24. januar 2005 er markeret. Pilen markerer de to vulkaner, der ses på billedet på næste side. ©MOLA Science Team.

Mars meteoriternes aldre

Som nævnt i dateringskapitlet, er der forskellige måder at aldersbestemme meteoritter på. Når vi vil se på alderen for mineralers størkning, bruger vi henfaldet af radioaktive grundstoffer i mineralet til at finde alderen.

Shergottitterne, som er de yngste bjergarter vi har fra Mars, har krystallisationsaldrer på ca. 170-180 mio. år. Derved kan vi sige at Mars var varm nok indvendig til at have vulkansk aktivitet på dette tidspunkt.

Nakhlitter og chassignitter har aldrer på ca. 1,3 mia. år. De er dannet dybere nede i Mars' undergrund, og viser sammen med de andre Mars meteoritter, at Mars - ligesom Jorden - har haft magmatisk aktivitet på flere forskellige tidspunkter i sin historie.

ALH84001 er, som tidligere nævnt, ca. 4,5 mia. år gammel.

På nær ALH84001 er alle Mars meteoritterne for unge til at kunne stamme fra en asteroide, da asteroiderne ikke er store nok til at kunne bevare den indre varme, som er nødvendig for at opsmelte magma så sent i solsystemets historie.

Hvordan endte de her?

Ved hjælp af virkningen af kosmisk stråling, som meteoritterne udsættes for, mens de er i rummet, er det muligt at fastslå hvor længe de har været undervejs, fra de blevet slået ud af deres moderlegeme, til de endte på Jorden. Disse aldrer viser at der mindst har været tre nedslagsbegivenheder på Mars, som har forsynet Jorden med Mars meteoritter.

Grunden til at der i det hele taget kan falde stumper af Mars ned på Jorden er at Mars,

ligesom Jorden, fra tid til anden bliver ramt af en asteroide. Det sker lidt oftere for Mars end for Jorden da den ligger lige på kanten af asteroidebæltet mellem Mars og Jupiter. Når en sådan asteroide rammer Mars dannes der et stort krater og der kan slynges små stumper af overfladen op gennem den tynde atmosfære og fri af tyngdefeltet. Stumperne vil så kredse rundt i solsystemet i flere millioner år. Man kan regne sig frem til at ca. en fjerdedel af dem vil falde på Jorden, hvor vi kan være så heldige at finde dem.



Hvis vi ved at meteoritten kommer fra et krater på Mars og vi har billeder af hele Mars' overflade med samtlige kraterer, kan vi så finde det krater den kommer fra? Man kan faktisk sandsynliggøre at flere af Mars meteoritterne kommer fra et konkret krater på Mars' nordlige halvkugle. Netop dette krater ligger i et område, hvor der har været vulkansk aktivitet for nylig. Det viser sig ved at der er meget få meteorkraterer i området. Det kan blandt andet skyldes at kratererne fra tidligere tiders meteornedslag er blevet dækket af lava, så det kun er de nyeste der stadig kan ses. Billedet viser et usædvanligt krater på Mars' nordlige halvkugle, der opfylder alle vores krav til alder og lokal geologi. Samtidig er krateret højt usædvanligt ved at være langstrakt. Langstrakte kraterer dannes når en asteroide rammer overfladen i en meget flad vinkel (dvs. den nærmest strejfer overfladen). Netop sådanne nedslag menes at være de eneste, der kan slå stumper af Mars' løs og sende dem helt fri af Mars tyngdefelt.

Planetdannelse i det tidlige solsystem

Mars meteoritterne er vigtige af flere forskellige årsager. Først og fremmest er det det eneste materiale vi har adgang til fra en anden planet end Jorden. Det giver os derfor en enestående chance for at afprøve vores teorier for planeten Jordens udvikling på en anden planet. Specielt én Mars meteorit er særlig interessant i den sammenhæng. Det er ALH84001 (Allan Hills 84 001). ALH84001 har en krystallisationsalder på 4.500 mio. år. Dvs. at den er over 500 millioner år ældre end de ældste kendte bjergarter fra Jorden. Lidt overraskende når man tænker på den omhu, der har været lagt for dagen for at finde gamle bjergarter her på Jorden. Man ville bestemt ikke have forventet at en helt tilfældig stump Mars, der kommer dumpende ned til os skulle slå de ældste kendte klipper på Jorden med over 500 millioner år! ALH84001 giver os derfor en helt enestående mulighed for at studere Mars' tidlige udvikling. Den tilsvarende fase af Jordens udvikling kan vi af gode grunde kun gisne om.

Figur 6. Det langstrakte meteorkrater midt i billedet kunne stamme fra det nedslag, der sendte en af Geologisk Museums Marsmeteoritter afsted på sin rejse til Jorden. Det ligger mellem vulkanerne Ceranius Tholus (sydligst) og Uranius Tholus. Ceranius Tholus er med 60 km i diameter en af Mars mindre vulkaner. Selve krateret måler ca. 18 km på den lange led. ©NASA/JPL/MSSS.

Hvordan genkender man en meteorit?

(3•10)

Hvis du har læst de foregående afsnit om forskellige typer meteoritter, så har du væsentligt forøget dine chancer for at genkende en meteorit, hvis du en dag skulle være så heldig at falde over en ude i naturen. Der falder ca. 3 meteoritter om året i Danmark – men alligevel går der omkring 100 år mellem hver gang der findes en friskfalden meteorit i Danmark. En væsentlig grund til at så mange meteoritter aldrig bliver fundet er, at de mennesker, der tilfældigvis ser dem i naturen ikke ved hvad det er de ser på – eller måske bare ikke lægger mærke til dem. Hvis flere mennesker vidste hvordan meteoritter ser ud, ville vi få bragt flere fund for dagen – og dermed lære nyt om vores solsystem.

Som vi har set i de foregående kapitler så kan meteoritter se ud på mange forskellige måder. Det er derfor ikke muligt at give en simpel anvisning på hvordan man kender dem. Samtidig er der stor forskel på hvordan friskfaldne meteoritter ser ud i forhold til nogen, der er faldet for længe siden.

Der er dog alligevel nogle generelle træk som man kan gå efter. De fleste meteoritter vil have nogle af nedenstående egenskaber:

- Sort smelteskorpe
- Afrundede former
- Tiltrækkes af magnet
- Høj vægtfylde
- Ingen bobler eller gasblærer

Der er dog også mange meteoritter, der mangler flere eller måske ligefrem alle de ovenstående egenskaber så man skal være forsigtig med at konkludere noget. Hvis man er i tvivl, bør man bringe fundet til Geologisk Museum eller et

andet Naturhistorisk Museum. På Geologisk Museums hjemmeside kan man finde en liste over de naturhistoriske museer.

Mange fund bliver bragt ind, fordi man har set en ildkugle forsvinde ned bag et træ eller lignende i nærheden. Hvis man så dagen efter finder en lidt usædvanlig sten bag træet kan det synes oplagt at tro at man har fundet en meteorit. Det er desværre aldrig tilfældet. Hvis man har set ildkuglen, så er man med stor sikkerhed ikke i nærheden af nedslagsstedet. Hvis du vil lære mere om ildkugler kan du læse afsnittet om meteoritfald.

Figur 1. Jernmeteoritten Sikhote Alin, der faldt i Sibirien d. 12. februar 1947. Meteoritten måler ca. 10 cm i bredden.
©G. Brovad, SNM.



Figur 2. Billedet viser den almindelige kondrit, Modoc, der faldt d. 2. september 1905 i Kansas, USA. ©G. Brovad, SNM.



Jernmeteoritter

De nemmeste meteoritter at kende er jernmeteoritterne, der med en vægtfylde på 8-9 g/cm³ er over dobbelt så tunge som tilsvarende almindelige sten. Friskfaldne jernmeteoritter har en karakteristisk nopret struktur med cm-store bløde fordybninger og knopper. Jernmeteoritter, der får lov at ligge længe på Jorden, vil til sidst blive totalt gennemtærede af rust og kan derfor være svære at kende.



Stenmeteoritter

En friskfaldet stenmeteorit er relativt nem at kende på grund af sin normalt sorte smelteskorpe. Mars- og månemeteoritter har dog ofte brunlig smelteskorpe. Smelteskorpen dannes når størstedelen af meteoritten brænder op under opbremsningen i Jordens atmosfære. Smelteskorpen er op til 1 mm tyk, skarpt afgrænset mod meteorittens indre og helt uden krystalkorn. Specielt det sidste kan ofte bruges til at afsløre en almindelig jordisk sten. Nogle jordiske sten reagerer med omgivelserne og danner et mørkt eller sort lag i overfladen. Det er dog sjældent skarpt afgrænset mod det indre af stenen og vil ofte indeholde fragmenter af forskellig art. Hvis man har fundet en sten med noget der ligner en smelteskorpe, er det derfor en god ide at kikke nærmere på skorpen under en lup eller et mikroskop.

De indre dele af meteoritten når ikke at blive opvarmet i forbindelse med den meget kortvarige opbremsning i atmosfæren. Hvis noget af smelteskorpen er slået af ved nedslaget kan man se at det indre af meteoritten er lys grå til næsten sort. Ofte ses små metalkorn og mm-

store runde kondruler, som beskrevet i afsnittet om kondritter. På grund af metalindholdet vil de fleste meteoritter kunne tiltrækkes af en magnet. Da jordiske sten meget sjældent er metalholdige, er en magnet en god ting at have ved hånden, når man skal undersøge om en sten kan være en meteorit. Man skal dog være klar over, at der også findes meteoritter uden metalindhold som f.eks. de særdeles interessante meteoritter fra Månen og Mars. Almindelige kondritter er, som navnet antyder, den mest almindelige type af meteoritter. De udgør ca. 85% af alle meteoritfald på Jorden. De har synlige metalkorn i deres indre og tiltrækkes derfor af en magnet. Med mindre de er helt friskfaldne, vil metalkornene være mere eller mindre rustne. Det indre kan i øvrigt variere i farve fra lyst gråt til næsten sort. Smelteskorpen er matsort og ofte krakeleret i forbindelse med afkølingen.

Sten der ofte forveksles med meteoritter

Slagger fra forbrændingsanlæg og forskellige industrielle smelteprocesser har ofte en sortbrændt overflade og kan indeholde metal. De forveksles derfor ofte med meteoritter.

Slagger kan imidlertid kendes fra meteoritter på grund af deres indhold af gasblærer og bobler og af og til også på grund af deres indhold af effekter af jordisk herkomst. Gasblærer er uhyre sjældne i meteoritter så sten med mange gasblærer er med stor sikkerhed ikke meteoritter. Lavastykker forveksles også tit med meteoritter. De kan imidlertid også skelnes fra meteoritter da de sædvanligvis indeholder gasbobler.

En anden genganger blandt sten der forveksles med meteoritter er svovlkiskonkretioner. Svovlkiskonkretioner forekommer almindeligt i kalk og kan veje adskillige kg. Massefylden er omkring 6 g/cm^3 hvilket får mange til at tro at der kan være tale om en jernmeteorit. Svovlkis er imidlertid aldeles umagnetisk og ved hjælp af en magnet kan man derfor let undersøge, om der kan være tale om en metalholdig meteorit eller en svovlkiskonkretion. Svovlkiskonkretioner har også en meget karakteristisk overfladestruktur, der nærmest minder lidt om et blomkålshoved.

Hvad gør man hvis man tror at man har fundet en meteorit?

Først og fremmest er det vigtigt at du får nogen til at se på fundet, hvis du tror at der måske kunne være tale om en meteorit.

Selvom der er meget langt mellem meteoritterne i de fund der bliver bragt ind til Geologisk Museum, så er vi altid glade for at man henvender sig, hvis der er den mindste grund til at tro at man har fundet en meteorit.

Man kan sende fundet til Geologisk Museum i København eller evt. til et af de andre naturhistoriske museer i Danmark.

Vedlæg information om fundstedet og tidspunktet samt navn, adresse og telefonnummer. Skriv hvorfor du tror at der er tale om en meteorit. Er det omstændigheder ved fundet, der gør at du mener at det må være noget der er kommet ned ovenfra, eller mener du kort og godt at stenen ligner en meteorit? Undlad så vidt muligt at skære i fundet eller gøre forsøg på at afrense det.

Vi vil så undersøge det indleverede materiale, og så vidt muligt finde ud af hvad det er man har fundet, også selv om det ikke er en meteorit. Hvis det viser sig at det er en meteorit man har fundet vil den automatisk blive erklæret for danekræ.

Det betyder at den skal afleveres til Staten. Finderen vil dog få udbetalt en findeløn hvis størrelse fastlægges af Statens Museumsnævn. Hvis der ikke er tale om danekræ, returnerer vi fundet med en forklaring om hvad det er.

Hvor finder man meteoritter?

Der ligger mange meteoritter i den danske natur, som bare venter på at blive fundet. Desværre er det meget svært at finde dem – selvom jeg altid selv går og kikker har jeg aldrig fundet nogen her i Danmark – og det er der heller ikke mange andre der har. De fire meteoritter, der er fundet i den sydlige del af Danmark er enten fundet fordi nogen har set dem falde (Mern og Aarhus) eller fordi de er dukket op når man har gravet i jorden (Jerslev og Felsted). Så selv om vi regner med at der falder ca. tre meteoritter om året i Danmark, så er der ikke mange chancer for at finde nogen af dem. Jeg håber dog stadig at du vil se godt efter når du færdes i naturen – hvis vi alle gjorde det, ville vi kunne finde mange meteoritter.

ArHenning Haack

Hvor kan man så finde dem?

Meteoritter falder næsten jævnt fordelt over hele kloden – men det er ikke alle steder det er lige let at finde dem. De meteoritter der falder i oceanerne ser vi næppe igen, og dem der falder i områder med tæt vegetation har heller ikke mange chancer for at blive fundet. Det hænder at der falder meteoritter i tæt befolkede områder, og der kan man nok regne med at stort set alt materiale vil blive fundet. Et eksempel på det sidste er Park Forest meteoritbygen, der ramte en forstad til Chicago d. 27. marts 2003. I dagene efter nedfaldet blev der fundet meteoritter på parkeringspladser, gader og stræder. Der var også adskillige fragmenter der var gået gennem tage og vinduer. Heldigvis var ingen dyr eller mennesker blevet ramt.

Det allerbedste sted at finde meteoritter er imidlertid så langt fra civilisationen som man kan komme – Antarktis. Her er der ingen vegetation til at skjule meteoritterne og naturen hjælper os ligefrem med at samle meteoritterne sammen.

Meteoritjagt på Antarktis

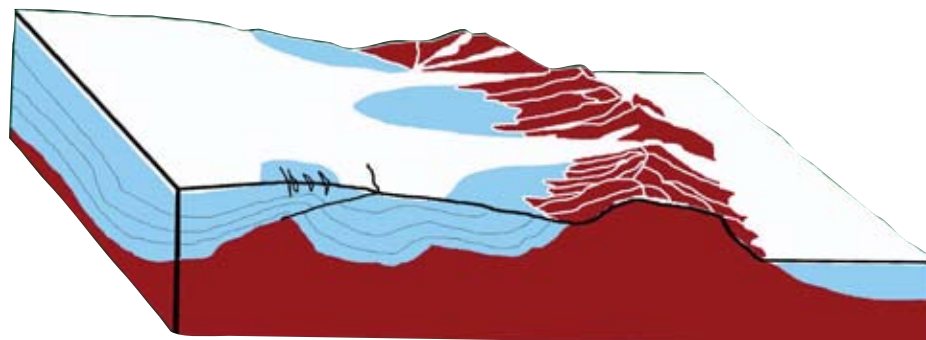
Antarktis har vist sig at være det bedste sted på kloden at finde meteoritter. I 1974 fandt en gruppe japanske glaciologer ved en tilfældighed en håndfuld meteoritter på isen i Antarktis. Stor var overraskelsen da man fik analyseret dem og fandt ud af at de kom fra fem forskellige meteoritfald. Det var altså ikke en enkelt byge af meteoritfragmenter man var stødt på. Der var ingen anden forklaring end at isen på en eller anden måde havde samlet meteoritterne sammen.

Siden den første opdagelse er der fundet omkring 30.000 meteoritter på Antarktis. Hver sæson sendes der en amerikansk ekspedition afsted med frivillige meteoritforskere for at finde meteoritter på Antarktis. De bringer typisk mellem 500-1.000 meteoritter tilbage, efter 5-6 ugers feltarbejde på isen.

Der er flere grunde til at der kan findes mange meteoritter på Antarktis. Først og fremmest er Antarktis et meget stort kontinent. Der falder derfor mange meteoritter på Antarktis. Når meteoritterne er faldet, bliver de dækket med sne og glider langsomt ud mod kysterne. På sin vej mod kysten skal meget af isen igennem De Transantarktiske Bjerge. Det meste af isen glider ind gennem bjergkæden i nogle af Jordens største gletschere, men noget af isen strander

på forsiden af bjergene. En kold og knasende tør, såkaldt katabatisk vind fra det centrale Antarktis, sørger så for at feje den strandede is ren for sne, så isen blotlægges.

Figur 1. Tværsnit af De Transantarktiske Bjerge. Isen kommer flydende fra venstre og blokeres af bjergene. Den is der strander på forsiden af bjergene fejes ren for sne af vinden og vil så langsomt fordampe, så dens indhold af meteoritter blotlægges. ©GM





Figur 2. En friskfunden meteorit på isen. ©GM

Isen har en flot blå farve og man kalder derfor isfelterne for blåisområder. Fordi luften er så tør og vinden blæser uophørligt, fordampes isen også. Selvom det aldrig er tøvejr så forsvinder der ca. 20 cm is om året. Da meteoritterne ikke fordampes, ligger de tilbage på overfladen af isen, efterhånden som den fordampes.

En anden stor fordel ved at søge efter meteoritter på Antarktis er at det er meget let at få øje på en sort meteorit på en blank isoverflade. Små meteoritter kan let ses på 50-100 m afstand, og det er derfor muligt at afsøge meget store områder fra en snescooter. Endelig er Antarktis også et godt sted at opbevare meteoritter – dem der findes i dag, har typisk ligget i isen i 100.000 år – og ligner stadig friskfaldne meteoritter.

Der har været en del frivillige danskere på Antarktis igennem årene. Selv var jeg dernede i 1999-2000 sæsonen. Hvis du kunne tænke dig at blive meteoritforsker, har du også en mulighed for at komme til klodens mest utilgængelige kontinent.

Meteoritter på Grønlands Indlandsis?

Når der findes så mange meteoritter på Antarktis, kunne man så forestille sig at der også var meteoritkoncentrationer på klodens næststørste iskappe – Indlandsisen? Ligesom på Antarktis har vi fundet blåisfelter i stor højde i det nordøstligste Grønland. I august 2003 afsøgte vi mange af de mest lovende blåisfelter, men fandt desværre ikke en eneste meteorit. Forklaringen er tilsyneladende at selvom det også er meget koldt

Figur 3. Her har vinden blæst næsten 100 forskellige meteoritter ind i et område med almindelige jordiske sten. Hvert flag markerer en meteorit. ©GM



og blæsende på Indlandsisen i Nordøstgrønland, så er der stille sommerdage med sol, hvor temperaturen sniger sig op over frysepunktet. Når solen skinner på mørke sten, såsom meteoritter, vil de synke ned i isen og dermed være skjult for vores søgende blikke. Samtidig nedbrydes meteoritterne også hurtigere når vejret veksler mellem tø og frost.

Meteoritjagt i ørkenområder

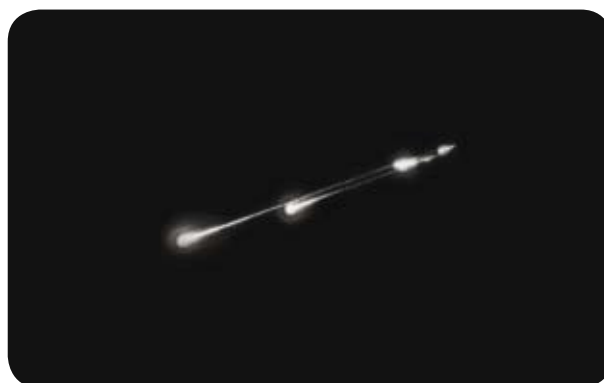
Det er ikke kun i de kolde ørkenområder, såsom på blåisen på Antarktis, man kan finde meteoritter. Varme ørkener har også vist sig at være gode steder at søge efter meteoritter. Ligesom på Antarktis er der ingen vegetation til at skjule meteoritterne, og samtidig kan de overleve relativt længe i det tørre klima. Det evigt bevægelige sand i ørkenområderne kan også spille en rolle. Tilsyneladende kan der ske det at meteoritterne dækkes med fygensand efter de er faldet. De kan så ligge i årtusinder, godt beskyttet under et lag sand. Hvis erosionsmønsteret så på et tidspunkt ændrer sig, så sandet begynder at fuge væk, vil meteoritter og andre større sten ligge tilbage i en såkaldt udblæsningsflade. Det er netop sådanne områder der afsøges af meteoritjægere med et godt øje for sten der skiller sig ud fra omgivelserne.

Figur 4. Meteoriteftersøgning i blåis i Nordøstgrønland. ©GM



Stjernes kud, ildkugler og meteoritfald

(3.12)



Figur 1. Billede af Peekskill ildkuglen lige efter meteoren brækkede i stykker i atmosfæren. Du kan se en videooptagelse af faldet og et stykke af meteoritten i udstillingen. ©S. Eichmiller.

De fleste af os har set stjernes kud mange gange. Selvom det ikke er et særligt sjældent fænomen, er det dog noget der får os til lige at standse op og glæde os over synet. Normalt ses stjernes kud som en lysende streg der tegnes hen over himlen, men er man heldig kan man se at der er et glødende hoved forrest, nogle gange en let glitrende hale og i sjældne tilfælde kan man også se hovedet brække i flere stykker, der så fortsætter hver for sig.

Stjernes kud opstår når en partikel trænger ind i den øvre atmosfære med meget høj hastighed. Typiske hastigheder for partiklerne når de trænger ind i atmosfæren er på omkring 15-20 km/s, men hastigheder på helt op til ca. 70 km/s kan forekomme. Til sammenligning kan man nævne at et normalt rutefly flyver 0,3 km/s. På grund af den ekstremt høje hastighed, kan man let forledes til at tro at ildkuglen passerer i meget lav højde. Det er ikke usædvanligt at øjenvidner fortæller om en ildkugle, der passerede dem i få hundrede meters højde. I virkeligheden foregår afbrændingen i omkring 100 km's højde.

Afbrændingen skyldes at partiklerne bevæger sig gennem atmosfæren med overlydshastighed. Ligesom rumkapsler, der vender tilbage til Jorden, fører overlydshastigheden til at forsiden af objektet bliver opvarmet til mange tusind grader. Rumkapslerne er beskyttet af et varmeskjold, der kan tåle opvarmningen, mens meteorer for det meste smelter eller fordamper. Hvis der er tale om et større legeme, udsendes der også en chokbølge som man med lidt held kan høre som et overlydsbrag.

Meteor, meteorider og meteoritter

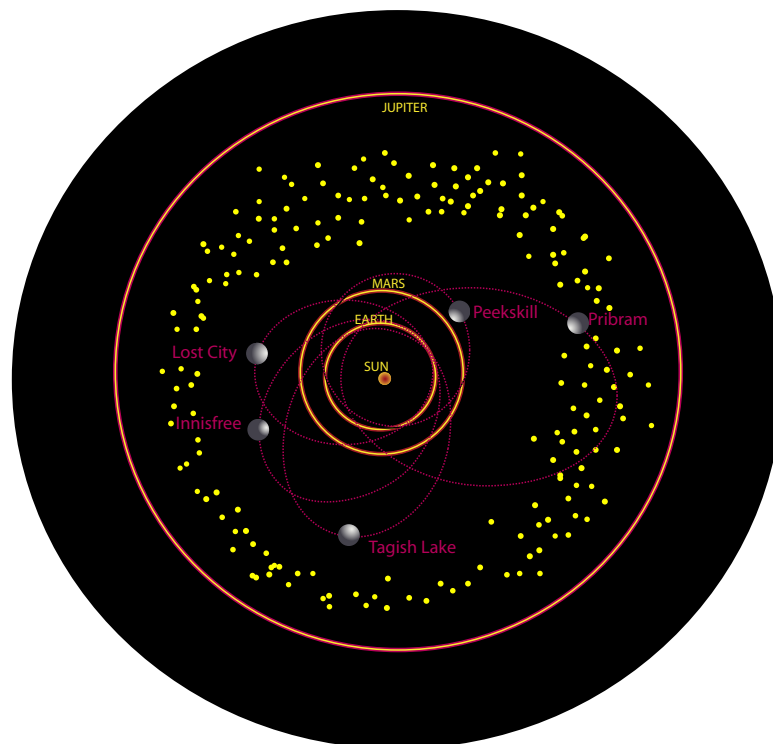
Af historiske årsager har man forskellige navne for meteoritter, alt efter om de svæver rundt som løsrevne stykker i vores solsystem, om de kommer ind i vores atmosfære eller om de rent faktisk lander på Jorden. En meteoride er en metal- eller klippestump, der er slået løs fra en asteroide eller planet. En meteoride er typisk af meterstørrelse inden den kommer ind i atmosfæren.

Hvis meteoriden kommer ind i atmosfæren og begynder at lyse, kalder man den en meteor, en ildkugle eller slet og ret et stjernes kud. Stjernes kud er de normale knap så kraftigt lysende streger, der opstår når småpartikler kommer ind i atmosfæren mens ildkugler og meteorer er stærkt lysende fænomener. I enkelte tilfælde kan de ses i fuldt dagslys. Endelig kan det, hvis ikke hastigheden er for høj, ske at noget af legemet falder til jorden og så skifter navn endnu engang – nu er der tale om en meteorit. Da jernmeteoritten Sikhote Alin faldt i Sibirien d. 12. februar 1947 kl. 10:38 berettes det, at ildkuglen lyste kraftigere end Solen. Det var også et stort meteoritfald hvor op mod tre tons jernmeteoritfragmenter blev opsamlet efter nedslaget. Du kan se fragmenter fra faldet i udstillingen. Overfladen af fragmenterne bærer tydeligt præg af den kraftige opvarmning.

Figur 2. Billede af en ildkugle der blev observeret over Oklahoma d. 3. januar 1970. Billedet er optaget af et automatisk kamera der var opstillet med netop det formål at registrere ildkugler. Kameraet stod åbent hele natten og stjernerne ses derfor som lange lysende cirkelslag omkring himlens nordpol. De huller der er i sporet af ildkuglen skyldes at kameraets lukker blev aktiveret med faste mellemrum. Det gør det muligt ikke bare at fastlægge ildkuglens bane, men også dens hastighed. Billedet førte, sammen med et par andre billeder optaget af kameraer andre steder, til fundet af Lost City meteoritten. ©Prairie Network, Oklahoma.



Figur 3. I alle de tilfælde hvor det er lykkedes at bestemme banen omkring Solen for en meteorit inden den ramte Jorden, kan man se at banen går samme vej omkring Solen som Jorden og at den passerer gennem asteroidebæltet. Det passer fint med vores formodning om at langt de fleste meteoritter kommer fra asteroiderne – og at alle meteoritter kommer fra vores eget solsystem. Figuren viser bl.a. banerne for Peekskill og Lost City, der er omtalt her i afsnittet. ©GM



Når man har set ildkuglen, hvordan finder man så meteoritten?

Det er desværre yderst sjældent at en ildkugleobservation fører til fundet af en meteorit. I princippet vil man kunne bruge øjenvidneberetninger til at fastlægge ildkuglens bane og så regne sig frem til nedfaldsstedet. I praksis er det desværre sådan at øjenvidneberetninger sjældent er særlig nøjagtige. Specielt ildkuglens hastighed er næsten umulig at få en god idé om. Et andet problem er at ildkuglen slukkes i 20-40 km's højde hvorefter meteoren fortsætter uden at man kan se den. Peekskill meteoritten, hvis fald kan ses i udstillingen, fortsatte således omkring 150 km efter den var slukket. En lille usikkerhed i fastlæggelsen af den lysende del af banen kan derfor føre til stor usikkerhed i nedfaldsstedet.

Hvis man ser en ildkugle, er det derfor meget vigtigt at man indprenter sig præcis hvilken bane over himlen den fulgte. Hvis man ved hvor man stod da man så den og kan huske hvilket træ

den forsvandt bag, eller måske ligefrem hvilket stjernebillede den passerede igennem, så vil det bagefter være muligt at fastlægge banen med stor præcision. Sådanne observationer er meget værdifulde for os, når vi forsøger at finde ud af hvad der er sket. Hvis man har set en ildkugle, vil vi meget gerne have indtastet observationen til vores hjemmeside på web-adressen:

www.ildkugle.dk

Man har forsøgt at sætte kameraer op, der konstant overvåger nattehimmelen. Kameraovervågning har i fire tilfælde ført til, at man ikke bare har fundet en meteorit, men også været i stand til at regne ud hvilken bane meteoriden havde om Solen inden den ramte Jorden. Specielt det sidste er interessant, fordi vi meget gerne vil finde frem til de asteroider, som vores meteoritter kommer fra.



Appendix



Datering

Når man arbejder med meteoritter, planeter, geologisk materiale fra Jorden, plantemateriale fra Jorden samt arkæologiske genstande er det ofte nødvendigt at kunne tidsbestemme det materiale man står med for at kunne udrede dets historie. Denne disciplin kaldes datering.

Når man taler om datering, kan man dele det op i relativ og absolut datering.

Relativ datering

Relativ datering er når man tidsbestemmer et objekt relativt i forhold til et andet objekt. F.eks. kan vi sige at Jupiter er ældre end asteroidebæltet, da Jupiter voksede så hurtigt at den, med sin tyngdekraft ødelagde alle asteroidebæltets forsøg på at samle sig til en planet. Vi kan dog ikke sige præcis hvor lang tid før asteroidebæltets dannelse Jupiter blev skabt.

Absolut datering

Ved absolut datering benytter vi os af at der er adskillige radioaktive elementer som forekommer naturligt – på Jorden såvel som i resten af solsystemet. Fordi de fleste af de radioaktive elementer har en veldefineret halveringstid, kan vi bruge indholdet af dem samt indholdet af deres datterisotoper til at bestemme alderen på det materiale de findes i.

Blandt radioaktive isotoper skelner man mellem de langlivede og de kortlivede isotoper. De langlivede radioaktive isotoper er de af isotoperne der stadig ikke er henfaldet helt, og som er dannet ved solsystemets begyndelse. Resten af de radioaktive isotoper, som ikke længere er tilstede, men kun kan ses i kraft af indholdet af deres datterelementer, kaldes de kortlivede radioaktive elementer. I dag findes der dog enkelte af de kortlivede isotoper, fordi menneskene har skabt dem i bl.a. atomkræftværker og atombomber, og fordi der sker en kontinuerlig produktion af dem i forbindelse med henfaldet af de langlivede radioaktive elementer uran og thorium.

Datering af meteoritter

Når man arbejder med at datere meteoritter, er der forskellige aldre der interesserer os.

- 1) Vi vil gerne datere de enkelte bestanddele i meteoritterne (f.eks calcium-aluminium-inklusioner).
- 2) Vi ønsker at vide, hvornår meteorittens moderlegeme dannedes i solsystemets historie.

3) Vi vil gerne vide noget om, hvornår i moderlegemets historie, den bjergart blev dannet, som vi nu står med et meteorit-fragment af.

4) Vi vil også gerne vide, hvor længe meteoritten har været undervejs, fra den blev slået løs af moderlegemet, til den landede på Jorden.

5) Og så vil vi også gerne vide, hvor længe meteoritten har opholdt sig her på Jorden.

De to første spørgsmål prøver vi at besvare ved hjælp af langlivede radioaktive elementer samt ved at bestemme indholdet af de kortlivede radioaktive elementer, der dannedes ved solsystemets begyndelse.

Ved at måle meteoritternes påvirkning af kosmisk stråling, kan vi bestemme hvor længe der er gået fra de blev slået løs af moderlegemet, til de landede på Jorden.

Og ved hjælp af f.eks. ^{14}C -datering samt henfaldet af de ustabile isotoper der dannedes ved kosmisk stråling i verdensrummet, kan vi bestemme hvor længe meteoritten har opholdt sig på Jorden.

Kortlivede radioaktive isotoper

Der var adskillige kortlivede radioaktive elementer til stede ved solsystemets dannelse og i de første millioner år af solsystemets historie, som ikke findes mere. Vi ser kun sporene efter dem, i form af deres datterelementer. Vi har alligevel et godt kendskab til deres halveringstider, og derfor kan vi bruge dem til at skaffe os viden om processer som foregik tidligt i solsystemets historie.

De kortlivede radioaktive isotoper der bruges når vi daterer meteoritternes oprindelse er:

Radioaktivt element	Datter element	Halveringstid ($T_{1/2}$)
^{244}Pu	X	82 mio. år
^{129}I	^{129}Xe	16 mio. år
^{247}Cm	^{235}U	15,6 mio. år
^{107}Pd	^{107}Ag	6,5 mio. år
^{53}Mn	^{53}Cr	3,7 mio. år
^{60}Fe	^{60}Ni	1,5 mio. år
^{26}Al	^{26}Mg	0,7 mia. år
^{41}Ca	^{41}K	0,15 mio. år

Hvor $T_{1/2}$ er halveringstiden og X er en række af henfaldsprodukter, der dannes ved henfaldet af ^{244}Pu .

Af de kortlivede systemer, er systemet ^{26}Al » ^{26}Mg af stor interesse, da aluminium er et af de almindeligste grundstoffer i solsystemets bjergarter. Med en halveringstid på kun 0,72 millioner år har den frigivet en enorm mængde energi ved sit henfald, og denne energi, i form af varme, formodes at være hovedårsagen til at nogle asteroider i det tidligste solsystem smeltede op indvendigt. Den opsmeltning dannede en indre lagdeling i asteroiderne, i form af kerne, kappe og skorpe, som vi også kender fra vores egen Jord.

Langlivede radioaktive isotoper

Når man arbejder med materiale fra det tidligste solsystem, har vi brug for radioaktive elementer med en meget lang halveringstid. Nedenfor ses en række af de langlivede isotoper, der bruges i dateringen af meteoritter:

Radioaktivt element	Datter element	Halveringstid ($T_{1/2}$)
^{147}Sm	^{143}Nd	106 mia. år
^{87}Rb	^{87}Sr	48,8 mia. år
^{176}Lu	^{176}Hf	37 mia. år
^{40}K	^{40}Ar	11,93 mia. år
^{132}Th	^{208}Pb	14,01 mia. år
^{238}U	^{206}Pb	4,5 mia. år
^{235}U	^{207}Pb	0,7 mia. år

I tilfældet med de langlivede radioaktive isotoper er det muligt direkte at måle indholdet af både det radioaktive element og dets datterelement og derved få en præcis alder for, hvornår det radioaktive element blev "låst fast" på sin plads, da materialet det befinder sig i kølede af fra smeltet til fast bjergart. Her udnytter man at meteoritterne består af mineraler med meget forskelligt indhold af det radioaktive element. Sådanne mineraler vil, med tiden, opbygge et overskud af datterelementet. Dette overskud kan bruges til at bestemme alderen af meteoritten med meget stor præcision.

Isotoper

Alle grundstoffer findes i flere forskellige udgaver – såkaldte isotoper – hvor nogle er stabile og andre er ustabile (radioaktive). Generelt kan man sige at isotoperne af et givent grundstof bliver mere og mere ustabile, jo længere væk det ustabile isotop befinder sig fra de stabile isotoper af grundstoffet, (fig. 1).

Forskellene i grundstoffets isotoper er meget små, og som oftest vil isotoperne af samme grundstof opføre sig ens, og indgå i de samme forbindelser. Derved reflekterer forholdet mellem de forskellige isotoper af samme grundstof det forhold, der var til stede mellem dem ved forbindelsens dannelse.

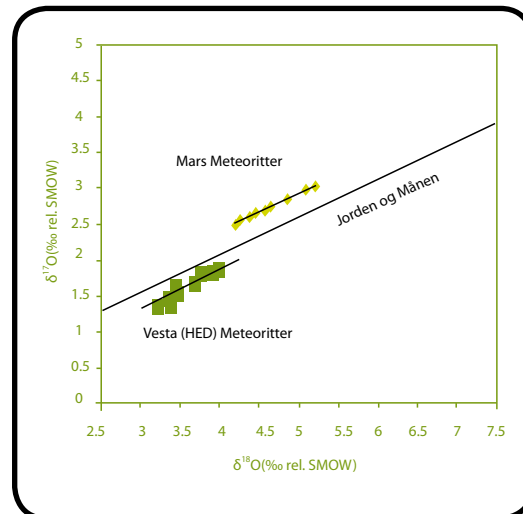
Et eksempel på at man har forskellige isotoper af det samme element, er ilt. Ilt findes både som ^{16}O , ^{17}O og ^{18}O , som alle er stabile isotoper. Lige sådan forholder det sig med kulstof, som både findes som de stabile isotoper ^{12}C og ^{13}C , og som det radioaktive ^{14}C .

Vores viden om de forskellige grundstoffers isotoper er et meget effektivt værktøj når vi skal undersøge materiale fra Jorden, såvel som fra resten af solsystemet. De kan bruges både til datering, i de tilfælde hvor vi taler om en radioaktiv isotop, og til at sige noget om de processer der finder sted og har fundet sted tidligere i solsystemets historie.

Et godt eksempel på hvordan isotoper bruges til bestemmelse af materiale fra solsystemet er ilt. Det viser sig, at tilstedeværelsen af de tre isotoper af ilt har været meget forskellig i det tidlige solsystem, alt efter hvor hen i solsystemet man befandt sig. Vi ved ikke præcis hvad der har forårsaget forskellene i sammensætningen af ilt, men det skyldes måske at ilt både findes i luftarter, i vandmolekyler og i fast stof, og at luftarter, vandmolekyler og fast stof fra Solen, har bevæget sig ud gennem solsystemet via forskellige mekanismer.

De forskellige sammensætninger i iltens isotoper kan bruges til at koble meteoritter sammen i forskellige grupper. Som et eksempel har Mars-meteoritter en hel særlig sammensætning af dens ilt, som vi kan bruge til at bestemme deres oprindelse. Vi kender nemlig sammensætningen af Mars' ilt fra de forskellige Mars-ekspeditioner.

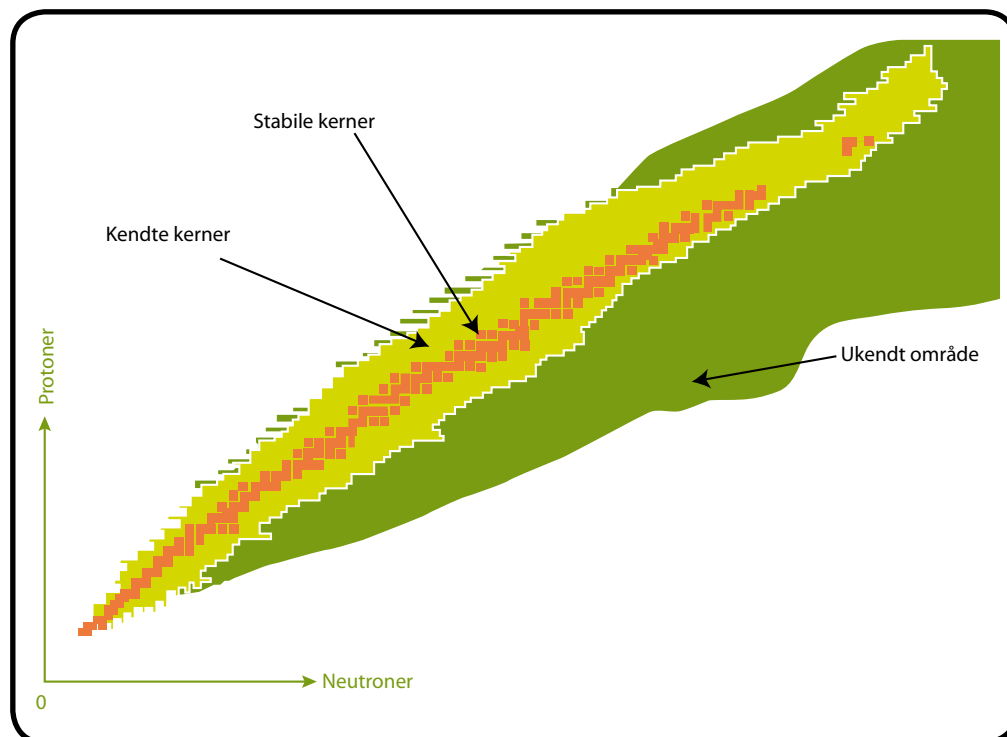
På samme måde kan det ses at Jorden og Månen er dannet i det samme område, i forhold til Solen, da deres indhold af ilt-isotoper ligger på samme linje. Vores måne er altså ikke en indfanget måne, som det er tilfældet for visse andre planeters måner, men er dannet sammen med Jorden.



Figur 2. Ilt-isotoper i forskelligt materiale fra Solsystemet. Det ses tydeligt at der er stor forskel på de forskellige materials sammensætning. ©GM

Af Christine Marvill

(A.2)



Figur1. Kernekort. De orange felter viser de stabile isotoper, mens det lysegrønne område er kendte ustabile isotoper. ©GM

Ordliste

Akondritter	Ikke-kondritiske meteoritter – dvs. meteoritter hvis moderlegeme har været opsmeltet siden solsystemets dannelse.	Jökullaup/jökelløb	Smeltevandsløb som dannes i forbindelse med afsmeltning af gletschere.
Aminosyrer	Byggesten i bl.a. protein.	Kondritter	Primitive meteoritter, der ikke har været opsmeltet siden solsystemets begyndelse.
Angrit	Sjældnen akondritisk meteorittype.	Kondruler	Små runde smeltesdråber der er krystalliseret. De udgør en stor del af de fleste kondritter.
Anorthosit	Hel lys bjergart der primært består af mineralet feldspat.	Kortlivet isotop	De radioaktive isotoper deles op i kortlevede og langlivede radioaktive isotoper, alt efter hvor lang deres halveringstid er. De kortlevede isotoper er dem der er henfaldet fuldstændigt i dag.
Asteroide	Lille planetlegeme der befinder sig i asteroidebæltet.	Kosmisk stråling	Meget energirige partikler, der strømmer gennem solsystemet. Kosmisk stråling består hovedsageligt af positive kernepartikler (protoner - 85%), heliumkerner (14%) og elektroner (1%). Hertil kommer små mængder af tungere atomkerner.
Asteroidebæltet	Område der befinder sig mellem Mars og Jupiters baner, hvor adskillige millioner asteroider er i kredsløb om Solen.	Kuiperbæltet	Kometbælte af frosne is- og stenlegemer der befinder sig i kredsløb om Solen, længere ude end Neptun.
Basalt	Vulkansk bjergart, som findes på Jorden såvel som på andre planeter og asteroider.	Langlivet isotop	Radioaktiv isotop der stadig eksisterer i solsystemet i dag.
Bipolære jetstrømme	Unge stjerner udsender jetstrømme fra deres poler. I jetstrømmene udsendes gas med hastigheder på op til flere hundrede km/s.	Lithosfære	Øverste stive del af klippeplaneter, som omfatter skorpen og den øverste del af kappen.
CAI	Calcium-aluminium-rige inklusioner.	Magmatisk	Betegnelsen for bl.a. meteoritter som viser tegn på at have krystalliseret ud fra en smelte.
Chassignit	Olivin-rig type af Mars-meteoritter.	Matrix	Den finkornede "cement" der omslutter og sammenbinder de større bestanddele i bl.a. kondritterne.
Chromit	Jern- og chrom-rigt oxid.	Meteoritter	Stykker af asteroider eller planeter, der er blevet slået løs fra deres moderlegeme, og er endt på Jorden.
Datterisotop	Det grundstof der opstår, når et radioaktivt grundstof henfalder til et mere stabilt grundstof.	Moderlegemer	Asteroide- eller planetlegemer, som er ophavssted til de meteoritter vi har på Jorden.
Differentieret asteroide	Asteroide som blev opsmeltet og opdelt i en kerne, kappe og skorpe.	Nakhlit	Meteorittype fra Mars.
Differentieret meteorit	Meteorit fra en differentieret asteroide.	Nebula	Gassky hvorfra der dannes nye stjerner.
Diogenitter	Grovkornede meteoritter fra den øvre kappe i asteroiden Vesta.	Nukleotid baser	Et nukleotid er byggestenen i DNA og RNA. DNA strengen er bygget op af fire forskellige nukleotid baser (Adenin, Guanin, Cytosin og Thymin). Livets genetiske kode er bestemt ved rækkefølgen af nukleotid baser i DNA strengen.
Enstatit	Magnesiumrigt silikatmineral.	Oktahedrit	Jernmeteorit med hexagonal krystalopbygning.
Eucritter	Basaltiske meteoritter fra Vesta.	Olivin	Jern- og magnesiumrigt silikatmineral.
Feldspat	Aluminiumrig gruppe af silikatminerale med varierende indhold af calcium, natrium og kalium.	Pallasit	Type af meteorit fra differentieret asteroide. Pallasitten indeholder både jern fra asteroidens kerne og olivin fra kappen, og menes at stamme fra kappe-kerne grænsen.
Fusion	Proces hvor lettere grundstoffer smelter sammen til tungere grundstoffer under energifrigivelse.	Plagioklas	Calcium- og natrium-rigt silikatmineral.
Halveringstid	Den tid det tager for en veldefineret mængde radioaktivt materiale at henfalde, så der kun er halvdelen af den oprindelige mængde tilbage.	Planetesimaler	Små planetlegemer.
HED meteoritter	Suite af meteoritter fra asteroiden Vesta, der omfatter howarditter, eucritter og diogenitter.	Protoplanetarisk skive	Den skiveformede struktur der dannes rundt om den begyndende sol, hvorfra planeterne voksede.
Hot-spot vulkanisme	Vulkanisme der kendes både fra Jorden og fra andre planeter og måner, hvor varmt materiale bevæger sig opad i planetlegemets indre, og forårsager enorme lava-forekomster.	Pyroxen	Mineralgruppe af primært jern- og magnesiumrige silikater.
Howarditter	Meteoritter fra asteroiden Vesta, der består af opkønst materiale.	Radioaktivt element	Se radioaktiv isotop.
Hvid dværg	En meget lille, ekstrem tæt stjerne.		
Interstellar	Refererer til området inde i galakserne, mellem stjernerne.		
Isotop	Udgave af grundstof. De fleste grundstoffer findes i flere forskellige udgaver – dvs. isotoper.		

Radioaktiv isotop	Ustabilt isotop af grundstof, der henfalder til et stabilt grundstof, ved udsendelse af radioaktiv stråling.
Resonansområder	Områder i asteroidebæltet hvor asteroidernes baner om Solen er ustabile fordi Jupiters tyngdekraft hiver i dem.
Runaway growth	I det tidlige solsystem opbyggedes stadigt større legemer ved at tiltrække støv og mindre legemer i deres nærhed. Jo større de blev jo mere kunne de tiltrække materiale fra omgivelserne. Denne proces kaldes "runaway growth".
Rød kæmpestjerne	En stor stjerne med en masse på mindre end 8 gange Solens i dens slutfase.
Shergottit	Den mest almindelige meteorittype fra Mars.
Solsystem	System af en eller flere stjerner, med planeter i kredsløb om sig. I vores solsystem er det vores sol der er stjernen, mens planeterne bevæger sig i kredsløb om Solen.
Supernova	Når meget tunge stjerner dør, ender de med en gigantisk eksplosion – en såkaldt supernova.
T-Tauri stadium	T-Tauri stjerner er helt unge stjerner med masser der minder om Solens, og som stadig undergår gravitationsbetings sammentrækning. Stadiet varer ca. 10 mio. år, og repræsenterer mellemløbet mellem en protostjerne og en mindre stjerne som Solen i dens hovedfase.
Udifferentieret asteroide	Ikke-opsmeltet asteroide.
Udifferentieret meteorit	Meteorit fra udifferentieret asteroide.
Vesta	Den tredjestørste asteroide i asteroidebæltet.
Vestoiderne	Mindre gruppe af asteroider, der befinder sig i relativ nærhed af, og menes beslægtet med, Vesta. Der er formentlig tale om km-store fragmenter af Vestas overflade, der er slået løs ved et asteroidenedslag.
Widmanstätten struktur	Afkølingsstruktur i jernmeteoritter med lameller af forskellig kemisk sammensætning, der kan fortælle os noget om deres afkølingshastigheder.
Zirkon	Zirkonium silikatmineral.

Præsentation af katalogets forfattere



Anja C. Andersen er Ph.D. i astrofysik med speciale i stjernestøv. Hun arbejder som lektor på Dark Cosmology Centre under Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet. Ved siden af sin forskning er hun en meget aktiv formidler af astronomi.



Philip Ralhan Bidstrup er Ph.D.-studerende ved Geologisk Museum med speciale i asteroider. Han er i sit studie involveret i rummissioner med det formål at opdage og undersøge asteroider nær Jorden og i asteroidebæltet.



Martin Bizarro er Ph.D. i Geokemi. Han er adjunkt ved Københavns Universitet, og leder af Axiom Laboratoriet, en forskningsgruppe for kosmokemi på Geologisk Institut. Hans forskning er centreret omkring brugen af isotopsystemer i kronologiske studier af det tidlige solsystems udvikling.



Vagn F. Buchwald er Dr. Scient med speciale i metallurgi. Han har for nyligt udgivet "Iron and Steel in ancient times". Vagn Buchwald har studeret og beskrevet mere end 500 jernmeteoritter. Han var tidligere docent ved Danmarks Tekniske Universitet og er nu emeritus ved Geologisk Museum.



Henning Haack er Ph.D. i Geofysik med speciale i meteoritter og planetfysik. Han er kurator for Geologisk Museums meteoritsamling. Henning Haack forsker, underviser og formidler bredt om Solsystemet og dets oprindelse.



Christine S. Hvidberg er Ph.D. i Geofysik med speciale i glaciologi. Hun er lektor i planetfysik ved Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet. Hun forsker i iskapper og klima, især med fokus på iskapperne på Mars og Grønlands Indlandsis.



Uffe Gråe Jørgensen er lektor i astronomi på Niels Bohr Institutet (Cand.Scient i astronomi og Ph.D. i fysik). Han har de senere år primært arbejdet med exoplaneter, men forsker også i stjernernes struktur og udvikling, og aspekter af solsystemets dannelse.



Christine Marvil er Cand. Scient. i geologi med speciale i geokemi og kosmokemi. Hun har endvidere igennem mange år arbejdet med formidling af geologi og arbejder p.t. som udstillingsmedarbejder på Geologisk Museum, SNM.



Minik T. Rosing er professor i Geologi på Geologisk Museum, Københavns Universitet. Han forsker i dannelsen af kontinenterne på Jorden, og livets tidligste udvikling. Forskningen er baseret på feltstudier af de ældste bjergarter på Jorden som findes i Vestgrønland.

