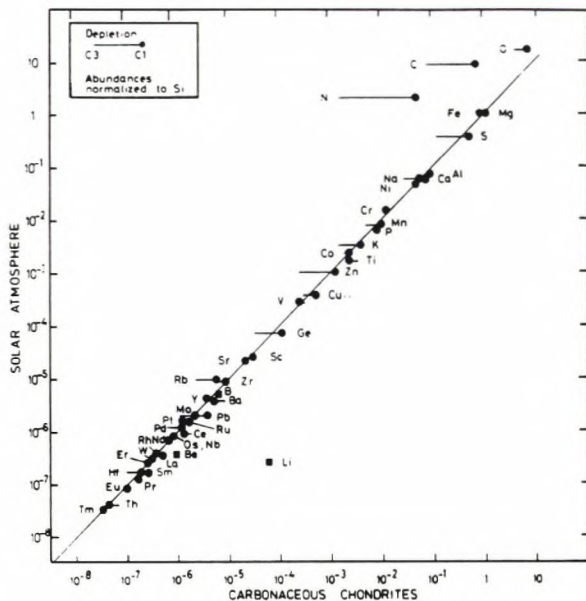


Meteoritter og stjerneudvikling

Anja C. Andersen og Uffe Gråe Jørgensen

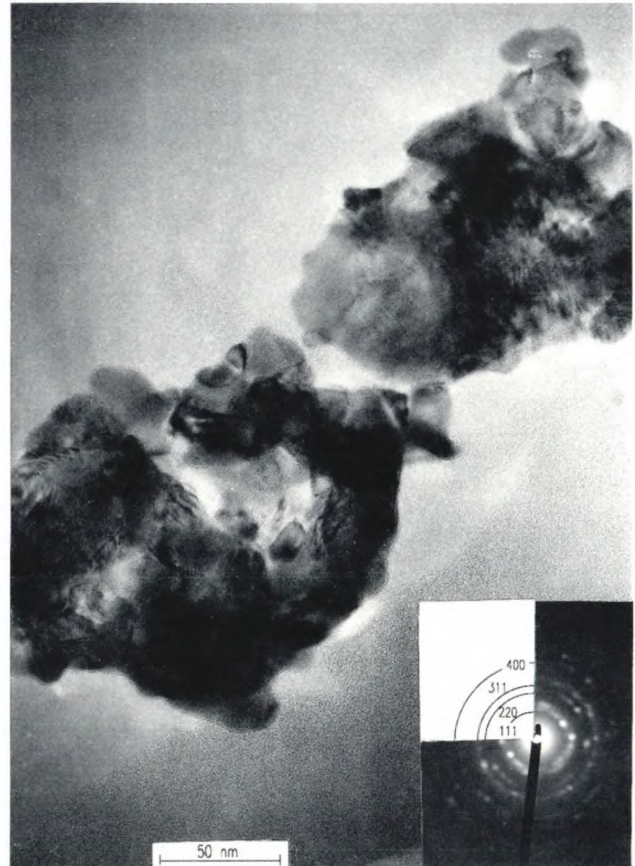


Figur 1. Oversigt over grundstoffernes hyppighed i solens atmosfære jævnført med kulchondritterne, akserne viser antallet af atomer pr. 1 million siliciumatomer. Man ser fx, at der for hver million siliciumatomer er 100 germaniumatomer, både i solatmfæren og i kulchondritterne (også kaldet C1-chondritter). Den manglende litium i solen i forhold til chondritterne skyldes at litium er blevet destrueret som en følge af de høje temperaturer i solen, mens grundstoffet kvælstof findes i mindre mængde i meteoritterne som følge af, at det er på gasform, og derfor ikke så villigt lader sig fange i sten. (Fra Cowley 1995).

Indledning

Hvilket barn har ikke drømt om at putte et rigtigt stykke af nattens funkende stjerner ned i lommen og gå rundt og knuge hånden omkring det for rigtig at føle hvad en stjerne er? — Og hvor mange af os har ikke oplevet det som en slags antiklimaks omsider at forstå hvad et lysår er og hvor umuligt det er at nå så langt bort i rummet.

Men idag er det faktisk lykkedes at finde stjernestøv på Jorden. En sjælden type af meteoritter indeholder mindst 0,1% stof som er dannet før solsystemet, kaldes derfor præsolart stof. De mindste af disse korn er kun få Ångström store, og nærmest at betragte som store molekyleklynger. De største korn er af mikrometerstørrelse. Dem skærer man idag rutinemæssigt i skiver for at undersøge deres struktur, hvilken isotopsammensætning de har, og hvilken isotopsammensætning forureninger inde i krystalstrukturen har. Ved hjælp af sådanne analyser har man fået adgang til vigtig ny viden om nanostruktur faststoffysik, kernefysik, molekyl- og klyngefysik, og så naturligvis astrofysik, specielt vdr. solsystemets dannelse og stjernernes struktur og udvikling.

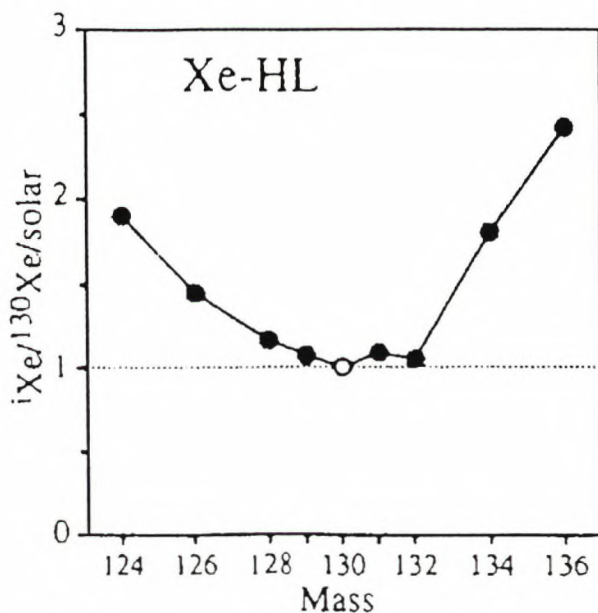


Figur 2. Et transmission elektron mikroskopbillede af nanodiamanter fra Allende meteoritten, hver klump på billedet indeholder ca. 1000 diamanter og hver diamanter består af ca. 1000 kulstof atomer.

Vores egen forskning på dette område har koncentreret sig om at forstå hvilke typer af stjernestøv kornene kommer fra. I samarbejde med Marie-Louise Andersen på NBI har vi udvundet præsolare korn fra en bestemt meteorit, i samarbejde med Kristian Glejbøl og Jakob Bohr på DTU har vi analyseret kornene i DTUs elektronmikroskop og i samarbejde med Flemming Nicolaisen og Preben Graae Sørensen på Kemisk Institut, HØ har vi målt absorptionskoefficienten af de præsolare korn. På Astronomisk Observatorium, KU, arbejder vi med at indkorporere de målte data i vores modeller for stjerneatmosfærer og med at simulere hvordan spektret fra forskellige stjernetyper vil se ud hvis det er dér støvkornene er dannet. I et internationalt samarbejdsprojekt forventer vi at få satellitobservationer som ved sammenligning med vores simuleringer endelig vil kunne stedfæste hvorfra kornene kommer — og dermed give indblik i hvor det stof som solsystemet blev dannet af kom fra.

Kulstofchondritter – klumper af det oprindelige sol-systemsstof

Da solsystemet blev dannet foregik det ved at en stor interstellar gas- og støvsky trak sig sammen. Sammentrækningsfasen varede lidt mindre end 100 millioner år, og i den periode fladede protosolskyen sig ud i en diskform. I skivens plan samlede de faste stoffer sig – støvpartikler og iskrystaller. De faste partikler klumpede sig relativt hurtigt sammen. Klumper af typisk nogle få hundrede km størrelse kalder vi protoplaneter. En kraftig varmeudvikling, formodentlig fra henfald af radioaktivt aluminium 26, fik protoplaneterne til at smelte. I smelten sank de tunge stoffer som jern og nikkel ind mod centeret af planeten, og lettere stoffer som silikater lagde sig som slagge på overfladen. Senere sammenstød blandt disse lagdelte protoplaneter slog dem helt eller delvist i stykker. Det er disse stykker vi finder som de mest almindelige meteoritter – jernmeteoritter, stenmeteoritter og sten-jernmeteoritter.



Figur 3. Hyppigheden af xenon gassen som den er blevet målt i nanodiamanterne fra Allendemeteoritten. Den relative hyppighed er blevet normaliseret til hyppigheden i solens atmosfære, og sat til 1 for ^{130}Xe . $^{124}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ og $^{136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ forholdet i diamanterne ser ud til at være markant højere end i solen. Det er denne forskellighed der indikerer, at diamanterne ikke er dannet i solsystemet men må være "stjernestøv" der har overlevet solsystemets dannelse.

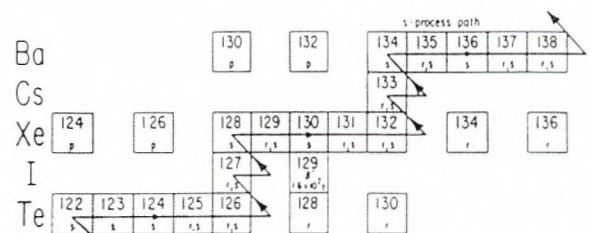
Nogle klumper af det oprindelige solsystemsmateriale voksede sig imidlertid aldrig så store at de blev til egentlige protoplaneter. Deres overflade var stor nok i forhold til deres volumen til at de kunne komme af med varmen uden at smelte. Herinden finder vi derfor de oprindelige støvkorn fra skyen der samlede sig til solsystemet.

Kulstofchondritter består af små glasagtige kugler indlejret i en matrix af finkornet støv

Den type af meteoritter som ikke har været del af en pro-

toplanet kaldes *kulstofchondritter*. Kulstof fordi de har et større indhold af kulstof end de fleste andre meteoritter, og *chondritter* fordi de indeholder *chondruler*. Chondruler (se figur 6 side 19) er små glasagtige kugler der er dannet i skyen under intense energiudladninger. Fx lynudladninger i solsystemsskyen (men mange andre mekanismer er mulige, og deres oprindelse er stadig et emne for heftig debat). Folk der sælger meteoritter og skal forsøge at interessere mulige købere, kalder chondrulerne for mikropianeter. Vel en fascinerende tanke med milliarder af planeter i solsystemet, hvoraf man kan købe en håndfuld at have i lommen. Men ud over at være runde og at have været smeltet har de intet med planeter at gøre.

I kulstofchondritterne er chondrulerne indlejret i en matrix af hårdt sammenpresset støv. Det er dette støv der menes at være oprindeligt materiale fra solsystemets dannelse. Jo mere støvmatrix der er i forhold til chondrulerne, desto mere af det oprindelige solsystemsmateriale er der altså i meteoritten, og desto mere *primitiv* siges meteoritten at være. Det er i den forstand vi taler om primitive meteoritter. Indtil 1969 var den samlede mængde af primitivt meteoritstof i verdens museer nogle få kg. Selvsagt var det vanskeligt at komme til at lave videnskabelige undersøgelser af disse sten. Den vigtigste opdagelse fra den tid er et eksperiment der viste at hvis man opvarmer matrixmaterialet vil det ved en bestemt temperatur frigive ædelgasser med en isotopsammensætning markant forskellig fra det øvrige solsystems. Det var på det tidspunkt man begyndte at få mistanke om at noget af stoffet i primitive meteoritter er præsolart – altså fra før solsystemet blev til.



Figur 4. Et udsnit af kernekortet der viser s-proces elementers dannelsesvej i området omkring Xe.

I 1969 faldt der som manna fra himlen to kæmpemæssige stykker kulstofchondrit. Det ene var nær byen Allende i Mexico (og meteoritten kaldes derfor Allende, se figur 7 side 19), det andet nær Murchison i Australien. Murchison der er den mest primitive af de to, er på 82 kg, og Allende blev anslået til at have været omkring 4 tons, men "kun" to tons er indsamlet (den eksploderede i luften og spredtes over et stort område; mindre nye stykker findes derfor stadig nu og da).

Den 21. juli 1969 satte det første menneske sin fod på Månen. En række laboratorier verden over var af den grund blevet top moderniseret til at modtage og analysere de første månensten. Det var et lille mirakel at Allende og Murchison faldt netop på det tidspunkt. De støvfrie laboratorier og alt det udstyr der var beregnet til at sikre at



Dedicated XPS Quality-Analysis System New ESCA-Q System



- ◇ 200mm stainless steel analysis chamber
- ◇ 3 sample magnetic transfer mechanism
- ◇ Isolated fast entry airlock
- ◇ Bakeout facility (120 C°)
- ◇ Integrated electronics within system bench
- ◇ Analyser, X-ray and ion gun on sealed ports
- ◇ 250l/s turbo pump with rotary backing
- ◇ Base Pressure (5×10^{-9} mB)

A complete XPS analysis system designed for surface quality control applications, analysing contamination and elemental constituents on surfaces of metals, semiconductors, catalysts and polymers. This integrated system also provides an ideal student training facility.

For further information, please contact Kennet Joelsson, Fisons Instruments Nordic AB, tel. +46-(0)8-6292400, fax +46-(0)8-627 52 20.
E-mail: kennet.joelsson@fisons-instruments.se

månestenene ikke blev forurenede med jordisk materiale, var som skabt for analysen af primitive meteoritter. Det er af den anledning man med fuldstændig sikkerhed ved at de 74 forskellige aminosyrer, og de nukleotid baser, man identificerede i Murchison meteoritten ikke er en jordisk forurening. Fra vores synspunkt kan man lidt ironisk sige at analysen af Murchison nok blev Apollo projektets største videnskabelige landvinding.

Det ældste stof

Hvis man piller chondrulerne ud af en kulstofchondrit, og varmer på resten, vil man se at isotopsammensætningen af den ædelgas der frigives, ændrer sig med temperaturen. Grunden til at det lige er ædelgasser man studerer skyldes at de er både flygtige og ureaktive, hvilket gør dem nemmere at separere, studere og at karakterisere end andre grundstoffer. Der er tale om meget små stofmængder og nogle af de konklusioner man drager stammer fra statistik foretaget på få tusinde atomer. Under sådanne forhold - og med dagens teknik - vil materiale der kan reagere kemisk, øjeblikkelig forsvinde i måleapparatet.

Ved de fleste temperaturer er isotopsammensætningen den samme som den normale sammensætning i solsystemet se figur 1. Når temperaturen bliver høj nok ser man pludselig et spring i isotopsammensætningen til ikke-solar

sammensætning. Man konkluderer derfor at matrixen indeholder nogle faste partikler som har en sådanne struktur af de vil frigive eventuelle ædelgasinklusioner ved den pågældende temperatur, og at disse faste stoffer på grund af isotopsammensætningen af det frigivne ædelgas, ikke kan være dannet i solsystemet. Da de er blandet op i en meteorit som aldrig har været omstruktureret siden solsystemets dannelse, må de ikkesolare partikler være dannet før solsystemet, og være blandet op med solsystemsskyen under dannelsesfasen eller (mere sandsynligt) i den interstellare sky der senere skulle falde sammen og blive til solsystemsskyen. Man kalder derfor materialet præsolart. Det er dannet udenfor solsystemet, før solsystemet eksisterede.

Ved at opløse matrixmaterialet i syrer og baser, udtage bundfaldet eller overvæsken, størrelsesseparere støvkornene og gennemføre andre, lignende, kemiske og fysiske udvælgelsesprocesser på materialet, har man isoleret stadig mere rene prøver af det præsolare materiale. Altså bedre og bedre fået fraseret den præsolare komponent af matrixen fra den solare komponent, således at ædelgasindholdet i den separerede komponent var stadig mere markant ikkesolart i sin isotopsammensætning. Igen 1970'erne og 1980'erne fik man derved til stadighed indkredset det præsolare materiale mere og mere, uden

dog nogen sinde at være istand til præcist at sige hvad de faste præsolare støvkorn var for et materiale.

Efter omtrent 20 års søgen, lykkedes det i 1987 endelig for en forskergruppe i Chicago at isolere den støvtype som indeholdt de karakteristiske ædelgasser. Det viste sig at være bitte små diamanter (≈ 2 nm store).

Gruppen i Chicago udtalte sig efter opdagelsen, til et populærvidenskabeligt tidsskrift, at det havde været som at lede efter en nål i en høstak: I 20 år havde de majsommeligt "sorteret stråene", uden at vide at alt hvad de havde behøvet var "at brænde høstakken af og samle nålen op i asken". Diamanter kan tåle så hård en kemisk behandling at alt man behøver er at give meteoritten den hårdest mulige behandling man kan tænke på. Det sidste der vil være tilbage er diamanterne. Efter et par fejlslagne forsøg, har vi nu selv stået med et reagensglas der ser tomt ud, men rummer en så tilpas stor mængde af diamanter at vi kan måle den absorptionskoefficient vi behøver til vores stjerneatmosfæremodeller. Vi har også overbevist os om at reagensglasset ikke var tomt, ved at kigge på dets indhold i DTUs elektronmikroskop. Vi har set både diamanterne og det karakteristiske mønster de spreder elektroner ud i, se figur 2. Dog vil vi ikke skrive under på at det er helt så nemt som at sætte ild til en høstak.

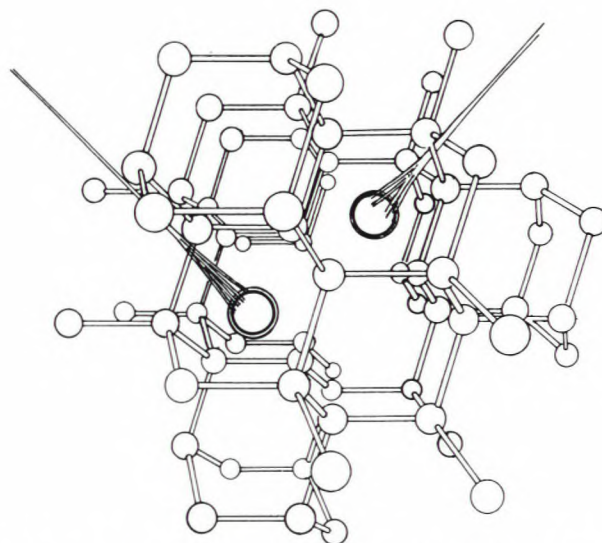
Hvor kommer diamanterne fra ?

Den første isotopmåling der blev udført på de ekstraherede diamanter var deres egen isotop sammensætning, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ forholdet, og derudover målte man også på urenhederne. Resultaterne gav det hidtil største problem for forståelsen af hvilke stjerner der leverede det materiale solsystemet (planeterne) er lavet af. Den xenon ædelgas der udgasser fra diamanterne når man varmer dem op, rummer mange neutronrige r-proces isotoper og mange neutronfattige p-proces isotoper (se boks og figur 3). Diamanterne selv har derimod et $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ forhold på ca. 90 ligesom solen og solsystemet. Hvorfor er det nu mærkeligt?

Det solare $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ forhold kan let forstås hvis det antages at universets kulstof kommer fra kulstofrige røde kæmpestjerner (dvs. kulstofstjerner), og at diamanterne også er dannet i kulstofstjerner. De kulstofstjerner som vides at blæse store mængder af stof ud i det interstellare rum, har netop $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \approx 90$. Det giver derfor et konsistent billede at forestille sig at de mest almindelige præsolare partikler i solsystemsskyen stammer fra kulstofstjerner, og at solsystemets (og universets) kulstof i almindelighed også kommer fra denne kilde. Til gengæld dannes der ikke r- eller p-proces xenon i kulstofstjerner, men s-proces xenon. Det er derfor en gåde hvorfor der tilsyneladende sidder r- og p-proces xenon inde i diamanterne.

r-proces xenon dannes i supernovaer af type II (store stjerner der eksploderer når deres indre jernkerne overskrider ca. 1,3 solmasser). Støv dannes derimod normalt i de ydre lag af kolde stjerner (fx røde kæmpestjerner) hvor der er temperaturer under ca. 1500 K, og tætheder store

nok til at molekyler kan støde sammen og forme klynger og små støvkorn. Imidlertid kan rene kulstofpartikler som diamanter ikke dannes i atmosfæren af de stjerner der bliver til en supernovaer fordi sådanne stjerner er iltrige. Diamanterne kan altså ikke have været til stede i stjernen før den eksploderede som en supernova. Det er et åbent spørgsmål om støvkorn kan dannes i selve supernovaen fordi den er så varm som den er, og lever så kort. Imidlertid kan man forestille sig at støvkornene dannes mange år efter eksplosionen når de indre kulstofrige lag er hvirvlet tilpas langt ud i det interstellare rum og er kølet tilpas meget af. I standard modeller for supernovaer er kulstoffet i disse lag imidlertid rent ^{12}C , og de indeholder store mængder ^{129}I der vil sætte sig i diamantkrystallerne i langt større mængder end xenon, og når ^{129}I efter nogle millioner år er henfaldet til ^{129}Xe ville diamanternes xenon gas derfor have et enormt overskud af ^{129}Xe i forhold til de andre isotoper, hvilket de ikke har, se figur 3 og 4.

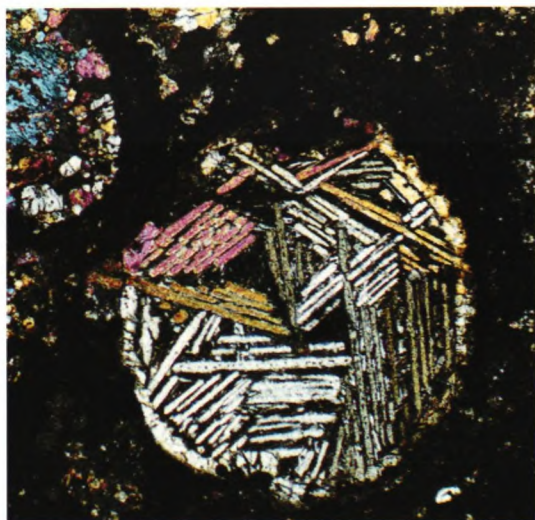


Figur 5. Under supernovaeksplosionen vil xenonatomer blive skudt in i diamanstrukturen og sidde fanget der, indtil diaman-ten bliver varmet op til 800 °C eller mere.

Desværre kan man endnu ikke måle på diamanterne enkeltvis. Dertil er de for små. Man må nøjes med middelværdier over typisk 10^9 - 10^{11} diamanter fra et ekstrakt. En typisk præsolar diamanter indeholder kun omkring 1000 kulstofatomer – det betyder også at omkring halvdelen sidder på overfladen og derfor betegnes de præsolare diamanter ofte med den lidt selvmodsigende beskrivelse *amorfe diamanter*. Indholdet af xenon forurening er så relativt lille at man kun finder ca 1 xenonatom pr 10^7 diamanter. Specielt er p-proces isotoperne ganske sjældne i forhold til de andre isotoper. Man finder typisk en p-proces xenon atom pr 10^9 diamanter. Man behøver selvsagt et stort antal diamanter for at tale om et overskud af bestemte isotoper i forhold til solsystemets sammensætning, og man kan let forestille sig, at det vi måler er et sammensurium af partikler dannet i mange forskellige stjernetyper.

Vi er af den anskuelse at den overvejende del af dia-

manterne er dannet i kulstofrige røde kæmpestjerner, med det samme $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ forhold som solsystemet. r-proces xenonen kan så forklares som hidrørende fra en lille procentdel af diamanterne. Disse kan være rene ^{12}C krystaller som forudsagt af standard supernovateorierne, og have en meget høj koncentration af xenon, specielt r-proces xenon. Overskudet af p-proces xenon kan forklares som at nogle kulstofstjerner har været medlemmer af dobbeltsjernesystemer, og doneret den masse der fik den anden komponent – en hvide dværg i systemet – til at eksplodere som en supernova af type I, se figur 5.

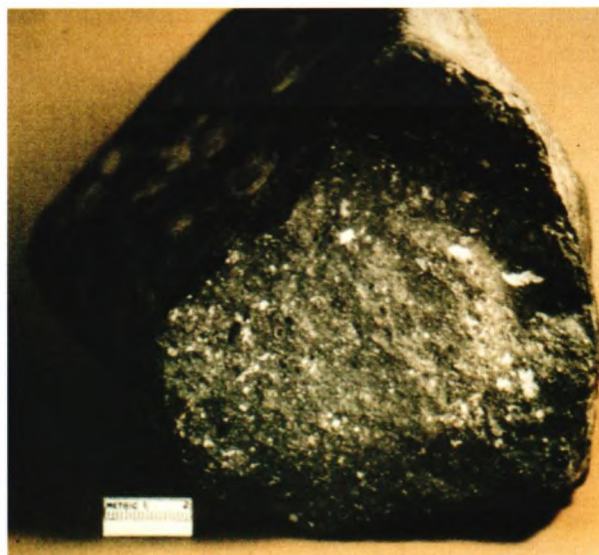


Figur 6. Chondrer i kulchondriten Allende, sidelængde 1mm (Fra Buchwald 1992). Diamanterne skjuler sig i den sorte matrix der fylder mellemrummet mellem chondrene.

For at teste disse teorier har vi målt absorptionskoefficienten af diamanterne og inkluderet dem i meget simplificerede modeller for de områder i kulstofstjerner hvor vi tror at de dannes. Vi arbejder på at udbygge vores stjerneatmosfæremodeller således at de kan inkludere egentlig støvdannelse og vind. Sådanne modeller er meget komplicerede, fordi det er svært at håndtere både de millioner af molekylære absorptionslinier og den hydrodynamiske bevægelse samtidig. Det vi prøver at finde er nogle klare skel mellem modeller af kulstof stjerner med støv i form af diamanter i atmosfæren og kulstof stjerner uden diamanter i atmosfæren, se figur 8.

Hvis det viser sig at vi kan se diamanter i kulstofstjerneatmosfærer, vil det formentlig betyde at solsystemets (og dermed Mælkevejens og universets) kulstof kommer fra kulstofrige røde kæmpestjerner. Eftersom kulstofstjernernes struktur er velkendt fra computermodeller og observationer, vil det samtidig betyde at vi for første gang har en beskrivelse af de forhold i naturen hvorunder nanodiamanter kan kondensere ud af gasfasen under lavt tryk. I laboratoriet har man ved lavt tryk kun kunnet få diamanter til at udfælde af gasfasen som film på et substrat (fx en platinplade). Man har ikke i laboratoriet fået diamanter til at falde ud som små frie korn. Der findes heller ingen teoretisk beskrivelse af forløbet fra gasfase til molekylklynger og videre til mikroskopiske korn.

Hvis det på den anden side viser sig at diamantspektret kan identificeres i spektret af gamle supernovarester, og ikke i røde kæmpestjerner, må man konkludere at universets kulstof er skabt i supernovae-eksplosioner. I så fald fortæller diamanterne, deres isotopsammensætning og deres ædelgasinklusioner, at vores modeller for supernovaer må revideres på flere punkter. Bl.a. så de ikke, som dagens standard supernovamodeller, producerer ^{129}I (og en række andre stoffer som produceres sammen med det); at de ikke har rene ^{12}C skaller som hidtil antaget; og at de køler så tilpas meget mens stoffet stadig er tæt nok til at i alt fald noget af supernovagassen kan danne faste partikler.



Figur 7. Et stort stykke af Allendemeteoritten med en 2cm skala. Den ene ende af meteoritten er brækket af, så at man kan se det uforandrede meteoritmateriale. Resten af meteoritten er dækket af en brændt skal, der skyldes opvarmning under turen ned gennem Jordens atmosfære samt lidt mexicansk ler fra nedslaget.

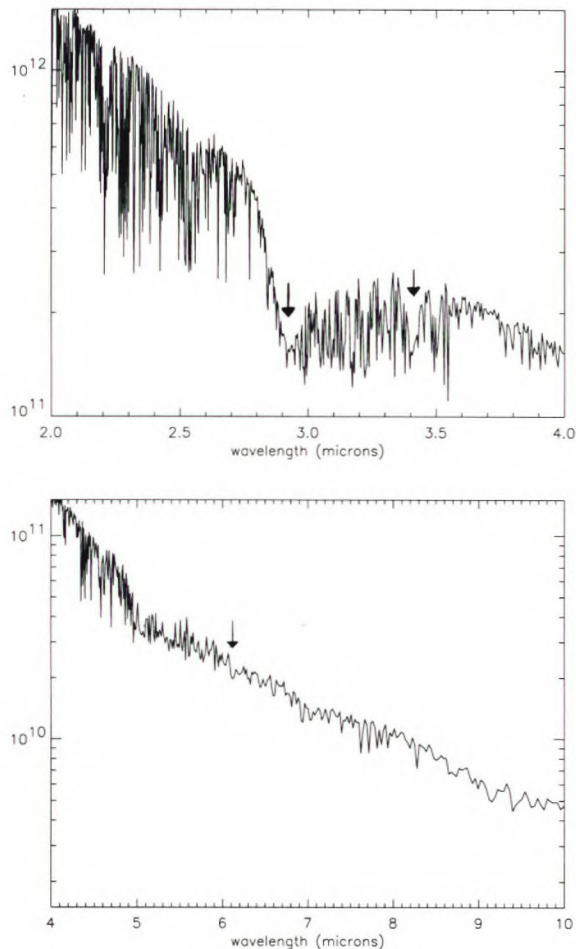
De andre præsolare støvkorn

Diamanterne udgør ca. 99% af det præsolare materiale man finder i meteoritterne. Den resterende del udgøres primært af kaborundum korn (SiC) og små mængder grafit, korund (Al_2O_3), spinel (MgAl_2O_4) og siliciumnitrid (Si_3N_4). Desuden har det vist sig at når man skærer SiC og grafit kornene i stykker kan der findes mindre TiC korn og andre karbider inde i dem.

SiC kornene er ganske velforståede bl.a. fordi man kan foretage målinger på enkelte korn. SiC kornene har nemlig en størrelse på mellem $0,05\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ og målinger på enkelte korn kan udføres for korn $> 1\text{ }\mu\text{m}$. Dette har ført til at man har kunne identificere flere forskellige stjerne typer som oprindelse sted for SiC -korn. Største delen af SiC -kornene har en isotop sammensætning der passer med den man finder for senfase kulstofrige røde kæmpe stjerner. En mindre del af SiC -kornene stammer formentlig fra noget yngre kulstof stjerner og en anden mindre gruppe af SiC -korn stammer formentlig fra supernovaer af type II.

Grafit kornene har en størrelse på mellem $0,8\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$ og man har endnu for få målinger pga. deres sjældenhed, til at kunne identificere deres oprindelse med særlig vægt. Meget tyder dog på at de stammer fra en supernova af type II.

For de resterende korn (corundum, spinel og siliciumnitrid) har man endnu kun et meget tåget billede af deres oprindelse, da mængden af materiale er så lille.



Figur 8. Forventet spektrum af spektret af en kulstofstjerne hvis den indeholder diamanter i atmosfæren. De viste spektre dækker en del af det infrarøde område, nemlig fra $2\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$ i den øverste ramme, og fra $4\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ i den nederste ramme. De tre karakteristiske træk, der stammer fra diamant, er vist med pile. Udover diamant inkluderer spektrene også de seks mest dominerende kulstof molekyler, nemlig CO , C_2 , CN , C_2H_2 , C_3 og HCN .

Hvor kommer grundstofferne fra ?

Stjernerne får deres energi til at lyse fra atomkernesammensmeltning, fusion. Når 4 brintkerner smelter sammen til en heliumatomkerne, bliver 0,7% af massen omdannet til energi efter formelen $E = mc^2$. Da universet blev skabt for mellem 10 og 20 milliarder år siden var der kun brint og helium. Alle de andre grundstoffer vi omgiver os med er skabt i stjernernes indre. Der kan udvindes energi ved at fusionere atomkerner op til og med jern. En stjerne hvor fusionen er forløbet til ende vil derfor i

princippet være en kompakt varm klump af jernplasma. I praksis kræver de successive kernesammensmeltninger i stjernerne til tungere og tungere grundstoffer imidlertid højere og højere temperatur og tæthed. De fleste stjerner opnår aldrig så høj temperatur som kræves til dannelse af grundstoffer tungere end ilt, og de dør som en kompakt klump af ilt og kulstof, en såkaldt hvid dværg. Stjerner der er tungere end 5 til 8 gange solens masse, opnår at forbrænde atomerne i de centrale områder hele vejen igennem til jern. Under tyngden af det overliggende stof imploderer stjernens kerne af jerdamp til sidst, og danner en supernova.

Stoffer tungere end jern kræver energi for at blive skabt. Eftersom det elektriske potentiale mellem protoner er enormt, ville det kræve enorme energier at lave grundstoffer tungere end jern ved at sammensmelte atomer direkte med protoner. Den eneste realistiske proces er indfangning af neutroner i kernen. Man kender kun to steder i naturen hvor der eksisterer frie neutroner der vil kunne indfanges i atomerne og derved danne grundstoffer tungere end jern. Det ene er i eksplosionsøjeblikket i en supernova, det andet er i den heliumforbrændende skal i en rød kæmpestjerne.

Supernovaeksplosionen er meget kort og voldsom. Det der kan ses på himlen som en supernova, er en skal af varm gas fra stjernens ydre lag, som blæses ud i rummet og i nogle uger lyser kraftigt op mens gassen endnu er en relativt kompakt og varm sky. Selve den energiskabende eksplosion varer imidlertid kun omkring ét sekund. I den periode skabes der en enorm fluks af neutroner fra kernereaktionerne. Disse neutroner vil danne isotoper af tunge grundstoffer der er meget neutronrige og radioaktive. Typisk vil ingen af de skabte isotoper nå at henfalde til stabile isotoper, inden eksplosionen (neutronfluksen) er forbi. Man kalder isotoper af atomerne der er dannet på denne måde for r-proces isotoper ("r" fra det engelske ord rapid = hurtigt, som hentyder til at neutronindfangningen er hurtigere end henfaldet).

Helium omdannelsen til kulstof i de røde kæmpestjerner skalforbrænding er også eksplosiv, men meget langsommere og mindre voldsom end i supernovaeksplosionen, og den gentages flere gange i løbet af stjernens liv. Neutronfluxen er så tilpas lille at man med god tilnærmelse kan sige at ethvert atom der omdannes til en tungere isotop ved neutronindfangning i He-skallen, når at henfalde til et stabilt atom ét atomnummer højere inden det rammes af en ny neutron. Neutronindfangningen kaldes derfor langsom, eller slow, og de isotoper der dannes kaldes derfor for s-proces isotoper. Ca 2/3 af grundstofferne (isotoperne) tungere end jern er s-proces isotoper. Mange isotoper er en blanding af en vis procentdel dannet ved s-processen og en vis procentdel dannet ved r-processen. Det gør forståelsen af grundstoffernes dannelse lettere, at der i naturen kun eksisterer de to ekstreme neutronkilder, enten den hvor produktionen af neutroner er enormt stor eller meget lille, ingen indimellem. Alle isotoper på den såkaldte β -stabilitets linie og til højre herfor kan forklares som dannet ved en af de to processer.

Imidlertid er der nogen isotoper som hverken kan dannes i s-processen eller i r-processen. Det er de isotoper som har et underskud af neutroner; liggende til venstre for β -stabilitets linien. Det er ikke velkendt hvordan disse isotoper dannes, men den mest sandsynlige forklaring er, at de dannes under eksplosionen af en supernova af type I – dvs. en hvid dværg der tilføres masse fra en anden stjerne der kredser omkring den indtil den når en kritisk masse som får den til at eksplodere under sin egen vægt.



Anja C. Andersen er ph.d. studerende ved Niels Bohr institutet og interesserer sig for solsystemets dannelse og Mælkevejens kemiske udvikling.

Referencer:

- 1) C.R.Cowley, *An Introduction to Cosmochemistry*, Cambridge University Press, 1995
- 2) V.F. Buchwald, *Meteoritter – nøglen til Jordens fortid*, Gyldendal 1992.



Uffe Gråe Jørgensen er lektor ved Astronomisk Observatorium ved Niels Bohr institutet. Han konstruerer modeller af stjerners atmosfærer med henblik på at kunne forudsige spektret af det lys de udsender. Han arbejder desuden med stjerners udvikling, universets alder og solsystemets dannelse.

Stenene på Isen

Anders Meibom, Odense Universitet.

Den 7. august sprang en bombe i de naturvidenskabelige rækker: ALH84001, en meteorit fra Mars, fundet i 1984 ved Allan Hills på Antarktis, indeholder spor efter tidlig biologisk aktivitet på den røde planet! I sandhed en fantastisk opdagelse - hvis den holder.

Nyheden blev bragt på CNN, i bedste 'information highway'-stil, til en hel verden af på en gang fascinerede og reserverede videnskabsfolk. Lad det være slået fast med det samme: der er god grund til skepsis. Der findes andre ikkebiologiske processer, som kan være ansvarlige for de polycykliske aromatiske kulbrinter (PAH'er), jernoxider og jernsulfider som forskerholdet fra Johnson Space Center og Stanford University fremsatte som tegn på biologisk aktivitet på den unge Mars. For nuværende kan det endegyldige bevis ikke leveres - men marsfeberen raser. (Se Morten Bo Madsen og Anja C. Andersens artikel her i bladet.)

Under alle omstændigheder blev ALH84001 på 20 minutter verdens mest kendte og fascinerende sten. Dette er imidlertid ikke en beskrivelse af stenen fra Allan Hills, men historien om hvordan det blev muligt at finde den

plus mere end 15.000 andre meteoritter på Antarktis's gølge ismasser. Det er historien om en god ide og en stor portion stædighed. Denne kombination kom til at danne grundlaget for et af de væsentligste bidrag til meteoritforskningen og til forståelsen af solsystemet som helhed, siden Apolloprogrammet. Historien begynder i 1969 - the Eagle has landed.

Den mystiske, blå is Der findes på Antarktis, specielt koncentreret i den Transantarktiske bjergkæde og i Yamato Mountainsregionen, mange områder med blålig is (figur 1 og 2). Disse isflader, ofte mange kvadratkilometer i udstrækning, er blevet vindslebet fri for det lag af sne, der ellers dækker det meste af kontinentets ismasser.

Den blå is er ujævn, glat og besværlig at færdes på. Desuden er isen gennemskåret af dybe gletscherspalter. Derfor var det tidnød, som i 1969 fik en japansk ekspedition af geologer til at krydse flere felter med blå is ved Yamato Mountains i et forsøg på at nå frem til kysten og til det skib, der skulle bringe dem tilbage til civilisationen inden vinteren satte ind. På et af disse isfelter fandt de, inden for en ganske lille radius på nogle hundrede meter, ialt ni meteoritter. De lå alene på isen - ingen 'jordiske'