

Solsystemets tidlige udvikling studeret med Mg og Pb isotoper i meteoritter

Martin Bizzarro og David Ulfbeck, Axiom Laboratoriet, Geologisk Institut, Københavns Universitet

De første isotopstudier af meteoritternes (og Solsystemets) alder fandt sted allerede i 1950'erne, men særligt indenfor det seneste årti har udviklingen taget fart i takt med udviklingen af nyt apparatur og nye analytiske metoder. I det følgende præsenterer vi nogle af de seneste resultater fra udforskningen af Solsystemets tidligste historie gennem isotopstudier af materiale fra meteoritter.

Indledning

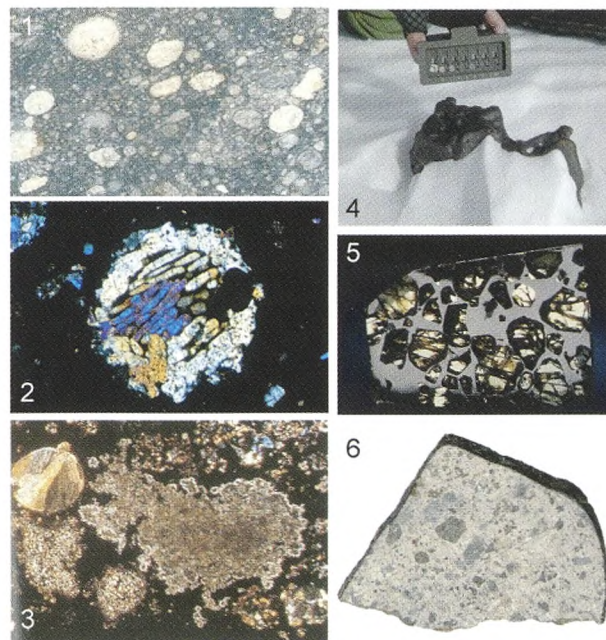
Radioaktive henfaldssystemer fungerer som kronometre der kan bruges til at teste modeller for Solsystemets dannelse [1]. De kronologiske studier udføres på materiale fra meteoritter som repræsenterer rester af det materiale de tidligste planeter eller asteroider dannedes af.

Boks 1: Meteoritter

Meteoritter inddeles overordnet i to grupper: kondritter og ikke-kondritter. Kondritter er komplekse legemer sammensat af flere komponenter med forskellig alder og oprindelse. Den hyppigst forekommende bestanddel i kondritter er kondruler, små (0,01-10 mm) legemer af silikatminerale der krystalliserede fra dråber af "smelte" i løbet af få timer tidligt i Solsystemets historie. Endvidere findes Calcium Aluminium rige Inklusioner (CAI), fra mm til cm store uregelmæssige aggregater af Ca- og Al-rige mineraler. CAI betragtes som de tidligst dannede komponenter i vores solsystem, og menes ligesom kondruler at være krystalliseret ud fra en smelte. Herudover indeholder kondritter Fe-Ni legeringer og silikatminerale sat i en finkornet matrix. Kondritter er karakteriseret ved ikke at besidde tegn på opsmeltning. I modsætning hertil viser ikke-kondritter tegn på at de engang var opsmeltede, omend i meget variabelt omfang. En kategori af ikke-kondritter er de *differentierede meteoritter* omtalt i denne artikel. Disse omfatter tre hovedgrupper:

- jernmeteoritter (kernen)
- sten-jern meteoritter (kerne/kappe)
- akondritter (skorpe),

hvor hver gruppe antages at repræsentere fragmenter (angivet i parentes) af differentierede asteroider. Angritter, Eucrit og Diogeniter repræsenterer forskellige fragmenter af skorpen på sådanne differentierede meteoritter. I billedserien (figur 1) er vist eksempler på Kondrit-meteoritter.



Figur 1. Eksempler på Kondrit-meteoritter (1), kondruler (2), CAI (3), jern meteoritter bestående af en Fe-Ni legering (4), sten-jern meteoritter som den viste Pallasit med olivin krystaller omgivet af Fe-Ni legering (5) samt en Eucrit (6).

Radioaktive henfaldssystemer med lange halverings-tider såsom U-Pb ($T_{1/2} = 7,04 \times 10^8$ år (^{235}U), $4,45 \times 10^9$ år (^{238}U)), ^{40}K ^{40}Ar ($T_{1/2} = 1,27 \times 10^9$ år), ^{87}Rb ^{87}Sr ($T_{1/2} = 4,88 \times 10^{10}$ år), ^{147}Sm ^{143}Nd ($T_{1/2} = 1,06 \times 10^{11}$ år) og mange andre, har i vid udstrækning været brugt til at aldersbestemme begivenheder i den tidlige jords udvikling og til at datere meteoritter. Disse henfaldssystemer omtales også som absolutte kronometre fordi de måler tiden fra en given proces fandt sted indtil idag. De analytiske usikkerheder sætter dog en begrænsning for hvor godt begivenheder kan adskilles i tid ved brug af absolutte kronometre. Det har affødt en interesse i brugen af "fossile", eller relative, kronometre, baseret på meget kortlivede henfaldssystemer såsom ^{26}Al ^{26}Mg ($T_{1/2} = 0,73 \times 10^6$ år), ^{60}Fe ^{60}Ni ($1,5 \times 10^6$ år) eller ^{53}Mn ^{53}Cr ($T_{1/2} = 3,7 \times 10^6$ år). I modsætning til de absolutte kronometre er disse henfaldssystemer karakteriseret ved at alle

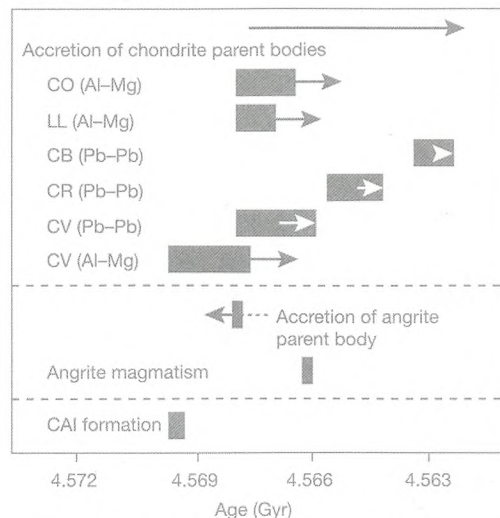
de radioaktive kerner forlængst er henfaldet, og man forlader sig dermed på at identificere komponenter (meteoritter eller mineraler heri) som stadig bevarer et overskud af datterkernen relativt til den gennemsnitlige sammensætning af Solsystemet. Under antagelse af, at moderkernerne var homogent fordelt i det tidlige solsystem, og at forholdet mellem moder- og datterkerner samt den initiale isotopsammensætning for datterelementet er kendt kan man på baggrund af overskuddet i antallet af datterkerner beregne over hvor lang tid moderkernen er henfaldet. Analytisk kan overskuddet af datterkerner bestemmes med stor præcision, og usikkerheden på tidsbestemmelserne er derfor lille (< 50.000 år). Fordi moderkernerne ikke længere findes har man ved kun at studere kortlivede henfaldssystemer ingen mulighed for at bestemme hvor længe siden disse processer fandt sted. Hvis man imidlertid kan kombinere absolutte og relative kronometre, dvs. analysere både kort- og langlivede henfaldssystemer i det samme materiale, kan man knytte aldersbestemmelserne fra de relative kronometre til en absolut alder og derved med høj præcision adskille processer der fandt sted i de første millioner år af vort solsystems historie.

Et sådant studie blev fornylig gennemført på en sjælden klasse af meteoritter kaldet Angritter [2]. Disse meteoritter repræsenterer fragmenter af den basaltiske skorpe fra asteroider der i forbindelse med opsmeltning af deres indre gennemgik kemisk udskillelse (differentiering) af en tung jernrig kerne omgivet af en lettere silikat-rig kappe og skorpe. Prøverne blev analyseret for deres Pb og Mg isotop sammensætninger ved hjælp af et plasma-kilde massespektrometer i Axiom laboratoriet på Geologisk Institut i København. Instrumentet, der er den eneste af sin art i Danmark, er udstyret med ni detektorer så de relative mængdeforhold for op til ni isotoper af det samme element kan bestemmes med høj præcision. Resultaterne af studiet kan sammenfattes i tre hovedpunkter:

1. Skorpen på de differentierede asteroider som Angritterne stammer fra dannedes for $4,5662 \pm 0,0001 \times 10^9$ år siden.
2. Dette fandt sted på et tidspunkt hvor ^{26}Al (og højst sandsynligt også andre kortlivede radioaktive isotoper) stadig eksisterede i tilstrækkelig mængde til at levere varme så opsmeltning af asteroidens indre og differentiering kunne finde sted.
3. Den relative $^{26}\text{Al} / ^{26}\text{Mg}$ datering af prøverne viser at tidsforskellen mellem dannelsen af Angritterne og de ældste kendte komponenter i vores solsystem, de Calcium-Aluminium rige Inklusioner (CAI) er mellem $3,3$ til $3,8 \times 10^6$ år.

Kombineret med den præcise absolutte alder for Angritterne kan man udlede et revideret bud på Solsystemets minimumsalder. Resultatet er en alder på $4,5695 \pm 0,0002 \times 10^9$ år som angiver at Solsystemet er ca. 2 millioner år ældre end tidligere beregnet.

Alderen på Angritterne relativt til CAI og primitive komponenter (kondruler) fra udifferentierede asteroider er illustreret i figur 2.

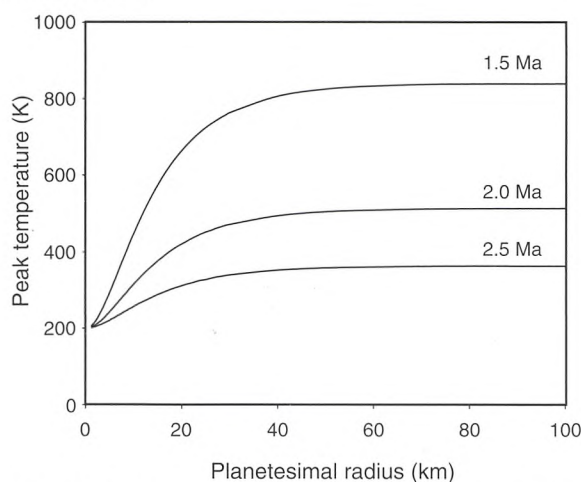


Figur 2. Tidspunktet for Angritternes dannelse sammenlignet med aldre for forskellige klasser af udifferentierede kondrit meteoritter. De mørke rektangler viser aldre (inklusive usikkerheder) på Kondritter (daterings metode angivet til venstre i diagrammet) Markeret med et gråt rektangel er alderne på kondruler i kondritter. I lighed med sedimentære bjergarter på Jorden kan kondrit asteroiderne højst være så gamle som de yngste bestanddele de indeholder. Kondrulerne sætter derfor grænser for kondrit meteoritternes maksimale aldre, markeret med pilene der udgår fra de grå rektangler. Angritterne dannedes $4,5662 \pm 0,0001 \times 10^9$ år før nu, og asteroiden som Angritterne stammer fra dannedes mindst 2 millioner år tidligere og før de udifferentierede kondritter. Alderforskellen mellem Angritterne og CAI er $3,3$ til $3,8 \times 10^6$ år.

Tidspunktet $4,5662 \pm 0,0001 \times 10^9$ år før nu er den ældste og mest præcist bestemte alder for nogen bjergart i Solsystemet og den fastlægger tidspunktet for den magmatiske proces der dannede den basaltiske skorpe på asteroiden Angritterne stammer fra. Dannelsen af selve asteroiden må derfor være foregået før og kan anslås ved at beregne hvor længe det mindst vil tage at opvarme en asteroide til smeltepunktet, hvis den eneste varmekilde er det radioaktive henfald af ^{26}Al . Den opnåede alder, $4,5680 \times 10^9$ år (figur 2) udgør således en minimumsalder for opbygningen af asteroiden, og viser at denne højst sandsynligt dannedes før de udifferentierede kondrit asteroider blev dannet (figur 2). Det vil sige at kondrit asteroiderne (ikke kondrulerne selv) der traditionelt regnes blandt de først dannede asteroider i Solsystemet faktisk er yngre end asteroiden hvorfra Angritterne stammer. Alderen begrænser endvidere tidsrummet for dannelsen af km-store asteroide legemer ud fra millimeter skala partikler til nogle få millioner år. Det er en direkte konsekvens af den lille forskel i alder mellem CAI, Angritterne og asteroiden de stammer fra.

Dermed kan man også forklare hvordan opsmeltning af legemer hvis tyngdekraft ikke er tilstrækkelig til at generere tryk og temperaturer over materialets smeltepunkt kunne lade sig gøre i det tidlige solsystems

historie. I de første millioner år af Solsystemets historie fandtes de kortlivede radioaktive isotoper af Al og efter al sandsynlighed også Fe i så tilpas store mængder at varmen til opsmeltning af asteroiderne kunne leveres udelukkende fra de radioaktive henfald. Det er dog en forudsætning at opbygningen af asteroiderne fandt sted indenfor 1-2 millioner år, ellers ville henfaldene af ^{26}Al (og ^{60}Fe) ikke levere tilstrækkelig energi til at varme asteroiderne op til smeltepunktet. Figur 3 viser modelberegninger for den maksimalt opnåede temperatur i en asteroide som funktion af radius og dannelses-tidspunkt forudsat at den eneste kilde til opvarmning er de radioaktive henfald af ^{26}Al og ^{60}Fe . Af figuren fremgår det at legemer der dannedes mere end 1,5 til 2 millioner år efter CAI ikke vil opnå en temperatur der er tilstrækkelig til at smelte en signifikant del (50 %) af asteroiden. Asteroider der dannedes senere end 2 millioner år efter CAI kan derfor ikke forventes at være differentierede.



Figur 3. Maksimal temperaturer opnået i asteroider som funktion af asteroide radius og dannelses tidspunkt. Eneste varmekilde er de radioaktive henfald af ^{26}Al og ^{60}Fe . Legemer der dannedes efter 2 millioner år vil indeholde for lidt ^{26}Al og ^{60}Fe til at generere smelter og vil derfor ikke gennemgå kemisk differentiation.

I supplement til analyserne af Angritterne er det sidenhen lykkedes at finde et lignende mønster i Mg-isotopsammensætninger for andre, mere almindeligt forekommende typer af meteoritter der alle repræsenterer fragmenter af differentierede asteroider [3]. Dermed virker det klart at de differentierede asteroider dannedes før de udifferentierede (kondritiske) asteroider. Dette stemmer overens med andre Mg isotop undersøgelser der viser at kondrulerne i kondritmeteoritter dannedes over et tidsrum der strækker sig fra dannelsen af CAI indtil mindst 2 millioner år derefter [4], og da den maksimale alder af kondritter (ligesom for jordiske sedimenter) er bestemt af alderen på den yngste komponent, er det sandsynligt at kondritasteroiderne først begyndte at dannes ca. 2 millioner år efter CAI. Kondritasteroiderne kan altså først være dannet efter at ^{26}Al og ^{60}Fe aktiviteterne var blevet utilstrækkelige til at levere energi til opsmeltning af selv store

asteroider. Dette udelukker dog ikke at de differentierede asteroider oprindeligt dannedes ud fra materiale der lignede det vi idag finder i de kondritiske meteoritter, men i så fald må alle spor heraf være blevet udslettet under opsmeltning- og differentieringsprocesserne som asteroiderne sidenhen gennemgik.

I den nærmeste fremtid vil de beskrevne Mg isotop undersøgelser blive suppleret af isotopanalyser af Ni i de samme og andre typer af meteoritter, for der igen nem at opnå en bedre forståelse af bl.a. hvilken rolle ^{60}Fe spillede for opvarmning af asteroider i det tidlige solsystems historie. Andre planlagte studier omfatter undersøgelser af ^{53}Mn – ^{53}Cr og ^{41}Ca – ^{41}K systemet, der med en halveringstid på ca. $0,1 \times 10^6$ år meget vel kunne vise sig at rumme et hidtil udforsket potentiale for høj-præcisions studier af Solsystemets allertidligste udvikling.

Litteratur

- [1] Wasserburg, G.J. (1987), Isotopic abundances: inferences on solar system and planetary evolution, *Earth and Planetary Science Letters* bind **86**, s. 129-173.
- [2] Baker, J., Bizzarro, M., Wittig, N., Connelly, J. and Haack, H. (2005), Early planetesimal melting from an age of 4.5662 Gyr for differentiated meteorites, *Nature* bind **436**, s. 1127-1131.
- [3] Bizzarro, M., Baker, J., Haack, H., and Lundgaard, K.L. (2005), Rapid timescales for accretion and melting of differentiated planetesimals inferred from ^{26}Al - ^{26}Mg chronometry, *The Astrophysical Journal* bind **632**, s. L41-L44.
- [4] Bizzarro, M., Baker, J. and Haack, H. (2004), Mg isotope evidence for contemporaneous formation of chondrules and refractory inclusions, *Nature* bind **431**, s. 275-278.



Martin Bizzarro er adjunkt og forskningsleder for Axiom laboratoriet på Geologisk Institut i København. Hans forskning er centreret omkring brugen af isotopsystemer i kronologiske studier af det tidlige solsystems udvikling. Driften af laboratoriet er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond.



David Ulfbeck er laboratorie-manager / post doc ved Axiom laboratoriet. Udover at varetage den daglige drift af laboratoriet, er hans forskning ligeledes koncentreret omkring isotopstudier af materiale fra det tidlige solsystem.