

Solsystemets voldsomme fødsel

Af David Ulfbeck og Martin Bizzarro, Axiom Laboratoriet, Københavns Universitet

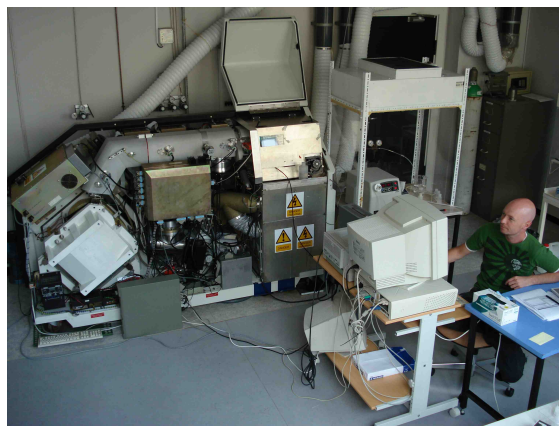
Nye ^{60}Fe - ^{60}Ni -isotop målinger i meteoritter viser, at asteroider der dannedes mere end 2 millioner år efter Solsystemets opståen indeholdt den kortlivede radioaktive isotop ^{60}Fe . Ældre asteroider indeholder derimod ingen spor efter denne isotop som produceres i særlige supernova miljøer. De nye resultater viser, at Solsystemet sandsynligvis dannedes i umiddelbar nærhed af én eller flere meget massive stjerner, muligvis i et miljø meget lig det man finder i Orion- eller Ørnetågerne.

Studier af Solsystemets oprindelse forsyner os med grundlæggende viden om processerne bag dannelsen af stjerner og planetsystemer. Rester fra planetdannelsen i Solsystemets tidligste stadier findes idag bevaret i asteroidebæltet mellem Mars og Jupiter. Fra tid til anden forlader enkelte af disse legemer deres kredsløb og falder ned på Jorden som meteoritter. Dette materiale udgør vores eneste direkte kilde til information om begivenhederne der indtraf ved Solsystemets dannelse. Vi har tidligere (Kvant, marts 2006) berettet om klassificeringen af meteoritter og brugen af henholdsvis kort- og lang-livede henfaldssystemer til at sammenkæde relative med absolutte aldre for dannelsen af de første faste legemer i Solsystemet.

Vi har siden fortsat disse studier og undersøgt ^{60}Fe - ^{60}Ni henfaldssystemet i de fleste grupper af meteoritter [1]. For nogle kortlivede henfaldssystemer såsom ^{53}Mn - ^{53}Cr , ^{182}Hf - ^{182}W gælder det, at de oprindelige mængder af kortlivede isotoper i Solsystemet kan tilskrives balancen mellem den stellare produktion af disse isotoper og deres henfald. Derimod er indholdet af nogle kortlivede isotoper i Solsystemet, som for eksempel ^{41}Ca , ^{26}Al og ^{60}Fe så højt, at ekstra mængder må være blevet tilført. Medens de forhøjede indhold af ^{41}Ca og ^{26}Al i teorien kunne være dannet ved et intenst ^3He -partikel bombardement af ^{40}Ca og ^{25}Mg kerner i materialet tæt ved den unge sol, kendes idag ingen mekanisme for in-situ dannelse af ^{60}Fe i Solsystemet, og denne isotop må derfor stamme fra en ekstern stellar kilde [2,3]. ^{60}Fe har en meget kort halveringstid ($T_{1/2} = 1.5 \times 10^6$ år) og derfor kan man idag kun detektere tilstedeværelsen af denne isotop i det unge Solsystem i form af små overskud af henfaldsproduktet ^{60}Ni i meteoritter.

At bestemme nikkels isotopsammensætning i meteoritter (såvel som andet geologisk materiale) er analytisk krævende. Der findes 5 naturlige isotoper af nikkel, ^{58}Ni (68,1 %), ^{60}Ni (26,2 %), ^{61}Ni (1,1 %), ^{62}Ni (3,6 %) og ^{64}Ni (0,9 %), og i meteoritter der engang indeholdt ^{60}Fe kan man forvente at finde et overskud af ^{60}Ni i størrelsesordenen af 20-30 ppm i forhold til jordiske prøver. For at opnå en god bestemmelse af nikkels isotopfordeling kræves ca. 15 μg rent nikkel som isoleres fra 50-200 mg prøvemateriale. Prøvens mineralindhold nedbrydes i små teflonbeholdere fyldt med koncentreret syre varmet op til 150° C. Herefter

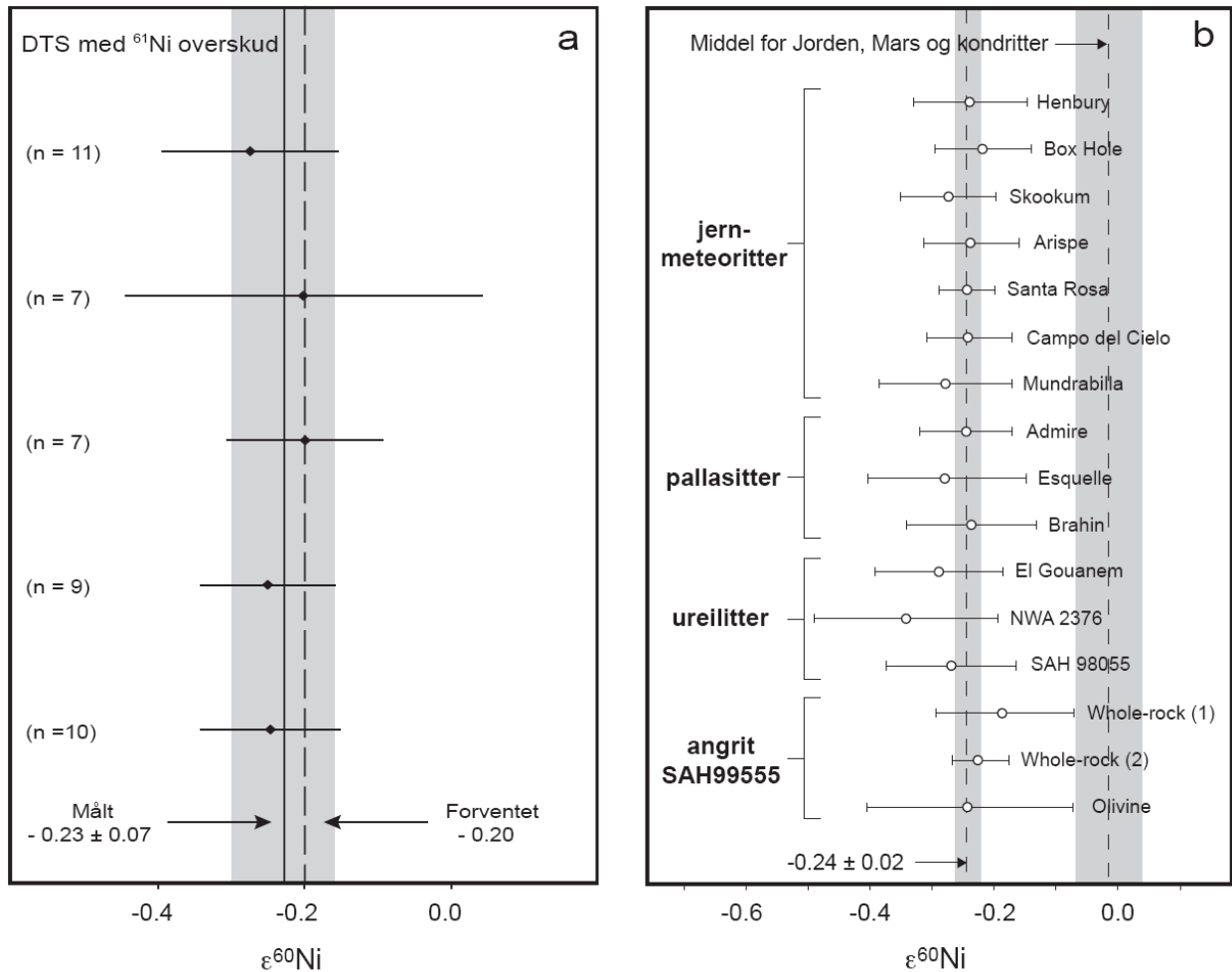
isoleres og beriges nikkel ad kemisk vej i flere etaper fra et oprindeligt koncentrationsniveau på ca 100 ppm til mere end 99 % i den endelige prøve.



Figur 1. VG Axiom plasma-kilde massespektrometret i Axiom laboratoriet på Institut for Geologi og Geografi ved Københavns Universitet.

Isotopsammensætningen bestemmes på et plasma-kilde massespektrometer (figur 1), hvor de relative forhold af nikkelisotoperne $^{60}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$ måles gentagne gange og sammenlignes med en jordisk standard for at bestemme størrelsen af eventuelle overskud af ^{60}Ni . Andre isotopforhold, såsom $^{61}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$ og $^{62}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$, måles for at fastlægge om prøvens indhold af stabile nikkelisotoper er normalt. For at verificere vores analytiske fremgangsmåde, har vi tilsat en jordisk prøve (med "normalt" nikkelisotopforhold) en kendt mængde nikkel beriget i ^{61}Ni (ikke ^{60}Ni – for at undgå forurening af meteoritprøver) og efterfølgende analyseret denne prøve 5 gange uafhængigt af hinanden. Resultatet af denne øvelse har vist, at vi er i stand til nøjagtigt og præcist at bestemme ^{60}Ni indholdet i en prøve (figur 2).

Overskud af ^{60}Ni dannet ved henfald af ^{60}Fe er tidligere blevet dokumenteret i bl.a. kondritmeteoritter og andre meteorit komponenter der alle har det til fælles at de er dannet mere end 2 millioner år efter Solsystemets opståen [4], og dermed har den første optræden af ^{60}Fe i Solsystemet ikke været præcist fastlagt. Alle meteoritter vi har undersøgt i dette studie dannedes inden for de første 3 millioner år af Solsystemets historie, og skulle derfor dække dette "tidshul" fra tidligere studier.



Figur 2. a) ^{60}Ni isotop målinger for en terrestrisk standard (DTS) med et lille overskud af ^{61}Ni . Isotopsammensætningen er udtrykt i ϵ -enheder som prøveværdiens afvigelse fra en standard pr. 10000. Grundet korrektionen for favoriseringen af tunge fremfor lette isotoper i massespektrometret resulterer overskuddet i ^{61}Ni i et tilsyneladende underskud i ^{60}Ni . Den forudsagte $\epsilon^{60}\text{Ni}$ værdi er $-0,20$ og værdien bestemt i 5 separate analyseperioder med hver 7-11 gentagne analyser er $-0,23 \pm 0,07$. b) $\epsilon^{60}\text{Ni}$ for de ældste meteoritter (jernmeteoritter, pallasitter, ureilitter og angritten SAH99555) udviser et underskud på $0,24 \pm 0,02$ ϵ -enheder sammenlignet med Jorden, Mars og kondritmeteoritter.

Nikkelisotopanalyserne har givet det overraskende resultat at de ældste asteroider (dvs. jernmeteoritter, pallasitter, ureilitter og angritter) *ikke*, som ellers forventet, indeholder ekstra mængder af ^{60}Ni , men derimod har små og *ens underskud* relativt til jordiske standarder, kondritmeteoritter, samt prøver fra Mars (figur 2). Vi kan således for første gang se at ^{60}Fe , hvis tilstedeværelse er tydeligt dokumenteret i yngre meteoritter, ikke fandtes da de ældste asteroider dannedes ca. en million år efter Solsystemets opståen for 4567 millioner år siden (se Kvant, marts 2006). I modsætning hertil viser ^{26}Mg isotopdata at ^{26}Al var homogent fordelt i alt materiale lige fra Solsystemets start [4], og derfor må ^{60}Fe være ankommet til Solsystemet forskudt fra ^{26}Al . Den tidsforskudte introduktion af ^{26}Al og ^{60}Fe har vidtrækkende konsekvenser for vores modeller for Solsystemets opståen og udvikling. Man kan således ikke gøre rede for dette tidsinterval hvis man antager at ^{60}Fe stammer fra et "klassisk" stjernemiljø. Derimod forudsiger modeller for meget massive (> 30 sol-

masser) stjerner udvikling, at ^{26}Al afsindres sammen med stjernens ydre atmosfærelag i det såkaldte Wolf-Rayet (WR) stadie, og at ^{60}Fe udelukkende produceres under den efterfølgende type 1b/c supernova (SN1b/c) begivenhed. Den forventede produktion af ^{26}Al i WR stadiet stemmer overens med de initiale (oprindelige) mængder man kan beregne for Solsystemet, og ydermere syntetiseres ^{26}Al ikke samtidig med ^{60}Fe i supernova stadiet. Varigheden af WR stadiet er 1-2 millioner år, hvilket stemmer særdeles godt overens med tidsforskellen mellem indkorporeringen af ^{26}Al og ^{60}Fe i Solsystemet udledt fra vores studier. Disse resultater peger på at Solsystemet dannedes i umiddelbar nærhed af en eller flere massive stjerner, muligvis i en region af rummet, hvor stjernedannelse foregår i stor skala eksempelvis som i Orion eller Ørne-tågerne. Man kan tænke sig et scenarie, hvor en molekylær tåge, beriget i ^{26}Al fra en massiv WR-stjerne, gennemgår gravitationelt kollaps og danner Solsystemet med en homogen fordeling af ^{26}Al , og først ca. 1 million år senere får

tilført ^{60}Fe i materiale kondenseret ud af produkterne fra en SN Ib/c begivenhed.



Figur 3. Et udsnit af Ørnetågen fotograferet med Hubble teleskopet. Den mørke søjle er en af flere ansamlinger af molekylær gas, op til flere lysår lange, hvor nye og også meget massive, stjerner dannes i stort antal. Muligvis opstod vores Solsystem i et lignende miljø for 4567 millioner år siden. Foto ESA/NASA.

På baggrund af disse oplysninger tegner der sig nu det billede, at Solen og planeterne dannedes i et langt mere turbulent miljø end hidtil antaget, nemlig i en tæt klynge af massive stjerner, hvis korte liv og død kan spores i resterne af de byggesten planeterne dannedes af.

Endnu et resultat har vist sig fra nikkelisotopanalyserne af meteoritter. I de tidligst dannede meteoritter viser det sig at $^{62}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$ forholdet er lavere end i jordiske prøver og i kul-kondritter som besidder overskud af ^{62}Ni relativt til Jorden. Variationen i mængden af denne neutron-rige isotop af nikkel er overordnet korreleret med lignende variationer for andre neutron-rige isotoper som f.eks. ^{50}Ti og ^{54}Cr . De uens mængder af neutron-rige isotoper man finder i forskellige typer

af meteoritter kan enten fortolkes som tegn på oprindelige heterogeniteter i den molekylære sky Solsystemet dannedes udfra, eller som resultat af en selektiv forarbejdning af materiale i det nydannede Solsystem. I begge tilfælde viser de seneste nikkelisotopdata at megen information ligger gemt i studiet af neutron rige isotoper, og dermed er kursen for nye studier af Solsystemets dannelse og tidlige historie stukket ud.

Litteratur

- [1] Bizzarro, M., Ulfbeck, D., Trinquier, A., Thrane, K., Connelly, J.N. and Meyer, B.S. (2007): Evidence for a later supernova injection of ^{60}Fe into the protoplanetary disk, *Science* **316**, 1178-1181.
- [2] Shu, F.H., Shang, H., Glassgold, A.E. and Lee, T. (1997): X-rays and fluctuating X-winds from proto-stars, *Science* **277**, 1475-1479.
- [3] Tachibana, S., Huss, G.R., Kita, N.T., Shimoda, G. and Morishita, Y. (2006): ^{60}Fe in chondrites: debris from a nearby supernova in the early solar system?, *Astrophys. Journal* **639**, L87-L90.
- [4] Bizzarro, M., Baker, J.A., Haack, H., and Lundgaard, K.L. (2005): Rapid timescales for accretion and melting of differentiated planetesimals inferred from $^{26}\text{Al} - ^{26}\text{Mg}$ chronometry, *Astrophys. Journal* **632**, L41-L44.



David Ulfbeck er laboratoriemanager / 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.



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.