

Kunstnerisk gengivelse af den kataklysmiske kollision mellem den tidligere jord og en planet af Mars-størrelse, som antageligvis har ført til dannelsen af Månen.

Illustration: NASA/JPL-Caltech.

# URAN

sladrer om alt fra solsystemets fødsel til dinosaurernes uddøen

**Om forfatteren**  
Kristian Sjøgren er videnskabsjournalist  
ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND**  
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Aarhus Universitet, Michael Møller Hansen. Læs mere på [www.dff.dk](http://www.dff.dk)

**Forholdet mellem to isotoper af uran kan give forskere et meget mere nøjagtigt indblik i begivenheder i forhistorisk tid. Forskere fra Københavns Universitet har finjusteret datering med uran, så de nu med endnu større nøjagtighed er i stand til at datere eksempelvis solsystemets fødsel og dannelsen af Månen.**

**U**ran! Det lyder som en ingrediens i en farlig bombe, og det er det da også, men uran er meget mere end det. Blandt andet bruger forskere uran til at datere alt fra solsystemets fødsel til tidspunktet for dinosaurernes uddøen. Forskere kan også bruge uran til at forstå udviklingen af Jordens atmosfære og til at få indsigt i den pludselige udvikling af komplekst liv på Jorden for 541 millioner år siden under den Kambriske Eksplosion. Når det gælder muligheden for at datere begi-

venheder over geologisk tid, findes der ikke et bedre ur end uran. Det er geologernes og astronomernes svar på et platinindfattet kvartsur fra Schweiz.

Præcision i dateringer, når det gælder det lange tilbageblik i Jordens historie, kan ansues på to forskellige måder. Der er nøjagtighed i forhold til at kunne datere et tidspunkt i geologisk tid, eksempelvis at kunne sige, at vores solsystem blev dannet for 4.567,30 millioner år siden. Her er nøjagtigheden, hvor tæt

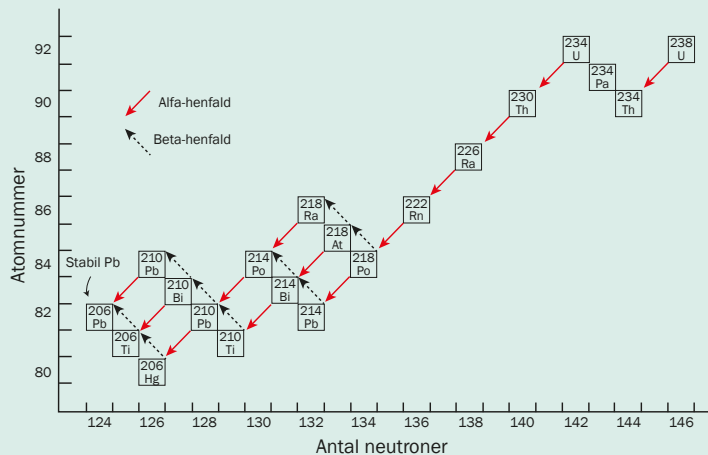
estimatet er på virkeligheden. Der findes dog også præcision i form af "præcision", eksempelvis at kunne sige, at vores solsystem blev dannet for 4.567,30 millioner år siden med en usikkerhed på +/- 0,16 millioner år. Her er de 0,16 millioner år præcisionen. Et estimat kan altså godt være meget nøjagtigt, men upræcist, eller sågar unøjagtigt, men meget præcist. Her vil usikkerheden være meget lille, men slet ikke overlape den korrekte alder.

Netop nøjagtigheden har forskere

## Om uran

Uran er et sølvgråt metal med nummer 92 i det periodiske system. Det er radioaktivt, fordi alle isotoper af uran er ustabile og henfalder til bly over tid med halveringstider på mellem 159.200 år og 4,5 milliarder år. Netop den lange halveringstid gør, at uran er så godt til at datere Jordens og solsystemets alder. Uran findes som tre isotoper,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  og  $^{238}\text{U}$ , hvor  $^{238}\text{U}$  er den absolut hyppigst forekommende i naturen og udgør mere end 99 procent af alt uran.

Uran er det eneste fissile grundstof, hvilket betyder, at det kan lave fission gennem henfald og splitte atomkernen op i mindre og lettere atomkerner. Fissionsprocessen producerer frie neutroner, gammafotoner og store mængder varme. Denne egenskab gør uran interessant i forhold til både at lave energi i atomkraftværker og altødelæggende bomber. Et kilo  $^{235}\text{U}$  indeholder 20 terajoules energi, hvilket er det samme som 1.500 ton kul. Little Boy, der var



Figuren viser henfaldskæden for uran-238, som gennem en række mellemprodukter ved alfa- og beta-henfald, ender med stabilt Pb-206. Kilde: www.usgs.gov

navnet på den bombe, som amerikanerne smed over Hiroshima den 6. august 1945, var baseret på uran-fission, og energiuudledningen lød på ækvivalenten til 12.500 kilo dynamit. 50.000 bygninger blev ødelagt, og 75.000 mennesker omkom.

Uran, der kun bliver dannet naturligt i supernovaer, er forholdsvis almindeligt i jordskorpen, hvor

grundstoffet udgør 2 til 4 dele per million. Det gør uran meget mere almindeligt end sølv og også mere almindeligt end tin, cadmium, kviksølv og antimon. Uran er fortrinsvist bundet i sten, jord og vand. Selvom man ofte forbinder uran med bomber, atomkraftværker og dateringer af solsystemet, findes der faktisk også bakterier, som bruger uran som energiresource.

fra Københavns Universitet raffineret, så de i dag meget bedre kan sige, hvornår begivenheder fandt sted for mange millioner år siden.

»Når vi taler om eksempelvis at kunne fastslå solsystemets fødsel for mere end 4,5 milliarder år siden, er en præcision på 160.000 år meget præcist. I 1950'erne blev solsystemets alder beregnet til at være 4,55 milliarder år plus/minus 70 millioner år. Det oprindelige tal for solsystemets alder var korrekt, men med bedre præcision kan vi meget mere nøjagtigt vurdere kronologien i de begivenheder, som fandt sted dengang. Denne præcision er også nødvendig for at kunne lave bedre kronologier over begivenheder i Jordens lange historie,« fortæller manden bag forskningen, professor James Connelly fra Naturhistorisk Museum ved Københavns Universitet.

James Connelly benytter i sin forskning også uran til at fastslå indholdet af ilt i atmosfæren i forhistorisk tid, men mere om det senere.

### Derfor er uran så godt til dateringer

At uran kan bruges til at fastslå tidspunkter for begivenheder i geologisk målestok skyldes, at det er et radioaktivt stof, som henfalder over tid. Over milliarder af år henfalder uran lidt efter lidt og bliver til bly i stedet for. Derfor kan forskere bruge forholdet mellem uran og bly i eksempelvis et mineral til at bestemme, hvornår mineralet blev dannet. Er mængden af bly i forhold til uran høj, blev mineralet formet for relativ lang tid siden, i forhold til hvis forholdet mellem bly og uran er lavt. Forskere benytter normalt indholdet af uran og bly i mineralet zirkon til at lave deres mest præcise

beregninger, da zirkon er rigtig godt til at inkorporere uran i sin krystalstruktur og samtidig afviser bly til at starte med.

Derudover findes der forskellige isotoper af uran (U) og bly (Pb), hvor  $^{238}\text{U}$  henfalder til  $^{206}\text{Pb}$  over tid, mens  $^{235}\text{U}$  henfalder til  $^{207}\text{Pb}$ .  $^{238}\text{U}$  til  $^{206}\text{Pb}$  har en halveringstid på 4,47 milliarder år, hvilket vil sige, at halvdelen af alle uranatomer henfalder til bly i løbet af 4,47 milliarder år, mens halveringstiden for  $^{235}\text{U}$  til  $^{207}\text{Pb}$  er på 704 millioner år. Netop den meget lange halveringstid gør uran særdeles velegnet i forhold til at datere geologisk tid, men da halveringstiderne for isotoperne er forskellige, skal forholdet mellem isotoperne tages med i beregningen, når forskere bruger uran til datering.



## Om James Connelly

James Connelly er professor ved Centre for Star and Planet Formation, Globe Institute ved Københavns Universitet. Han er født og opvokset i Canada, hvor han også tog sin kandidatgrad og ph.d. samt efterfølgende to års postdoc-forskningsarbejde. Sidenhen blev han ansat ved University of Texas i Austin i 1994, hvor han med tiden fik stilling af professor med ansvar for et laboratorium, der var specialiseret i datering med uran- og bly-isotoper. I 2004 i forbindelse med et sabbatår ved Københavns Universitet begyndte han at studere meteoritter og flyttede permanent til København i 2009 ved etableringen af Centre for Stars and Planet Formation ved universitetet. Hans forskning går nu ud på at skabe mere præcise dateringer af meteoritter for ultimativt bedre at forstå Solsystemets dannelse.

»For at kunne lave så nøjagtige målinger som overhovedet muligt, er vi nødt til at kende forholdet mellem de to uran-isotoper  $^{238}\text{U}$  og  $^{235}\text{U}$ . I mange år har vi formodet, at dette forhold er 137,88, men inden for de seneste 10 år har flere målinger vist, at det ikke altid er tilfældet, og det påvirker nøjagtigheden i vores aldersberegninger,« forklarer James Connelly.

### Når uran fraktionerer

At forholdet ikke altid er 137,88 skyldes et fænomen, der hedder fraktionering. Fraktionering opstår, når forskellige isotoper af samme grundstof ikke vejer det samme. Tag som eksempel en kedel med kogende vand. Vand består af  $\text{H}_2\text{O}$ , og oxygen findes som tre forskellige isotoper med forskellige vægte,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  og  $^{18}\text{O}$ . De forskellige vægte betyder, at de lette isotoper fordampes hurtigere end de tunge, når vandet koger, så efter noget tid vil

der i kedlen være relativt mere  $^{18}\text{O}$  i forhold  $^{16}\text{O}$ , sammenlignet med da vi satte kedlen over.

Fraktionering er simpelthen et skifte i et grundstofs isotopiske sammensætning på grund af en hvilken som helst kemisk reaktion. Når det gælder ilt i kogende vand, er ændringen i den isotopiske sammensætning drevet af en vægtforskel mellem de forskellige oxygenisotoper, men ændringen behøver ikke skyldes en vægtforskel.

Når det gælder uran, har forskere altid troet, at der ikke ville være fraktionering, da den relative vægtforskel mellem  $^{235}\text{U}$  og  $^{238}\text{U}$  er meget lille. Det skyldes, at atomerne er så store, at vægtforskellen mellem dem bliver næsten ubetydelige. Et kilo fra eller til betyder også mere for et menneske end for en blåhval. Inden for de seneste 10 år har forskning dog vist, at der forekom-

mer fraktionering i urans isotopiske sammensætning, og det har betydning for datering med uran og også i forhold til at bestemme mængden af ilt i havene og atmosfæren over geologisk tid.

I forhold til uran sker fraktioneringen, når uran bliver oxideret fra  $\text{U}^{4+}$  til  $\text{U}^{6+}$ , ved at to elektroner fjernes fra atomernes yderste orbital. På grund af størrelsesforskellen mellem de to isotoper såvel som pakningsforskellen i atomkernerne bliver den ene isotop lettere oxideret end den anden, og det er med til at skabe fraktionering.

»Vi er derfor nødt til at tage variationen i forholdet mellem  $^{235}\text{U}$  og  $^{238}\text{U}$  i betragtning, da det har indflydelse på nøjagtigheden i vores beregninger,« siger James Connelly.

For at øge nøjagtigheden i de geologiske målinger har James Connelly sammen med sine kollegaer målt på forholdet mellem  $^{235}\text{U}$  og  $^{238}\text{U}$  i zirkoner fra geologisk tid. Den fundne variation har de inddraget i nye beregninger af forskellige geologiske begivenheder for at kunne datere dem meget mere nøjagtigt.

## Afviser meteorteori om livets udvikling

Et af de områder, hvor James Connelly har benyttet højpræcisionsmetoder med uranisotoper til at beregne geologisk alder, er i forhold til at fastslå, hvordan meteornedslag har spillet ind i udviklingen af liv på Jorden. For lige under 470 millioner år siden skete der to ting i vores solsystem, som nogle forskere hidtil har formodet var korreleret.

Den ene begivenhed var opbrydningen af en stor asteroide i asteroidebæltet, hvilket sendte store mængder meteoriter mod Jorden. Disse meteoriter rammer os stadig den dag i dag.

Den anden ting var "den store ordoviciske biodiversificeringsbegivenhed", hvor livet på Jorden pludselig begyndte at tage mange flere forskellige former.

## Sådan gør forskerne, når de skal datere en bjergart

For at kunne bruge bjergarter til at sige noget om Jordens udvikling over geologisk tid, er det nødvendigt at kende til alderen på de forskellige bjergarter samt have kendskab til de begivenheder, som har påvirket dem. En standardmetode til at gøre dette er ved at benytte zirkoner, der er et meget almindeligt mineral, som indeholder relativt store mængder uran (flere hundrede dele per million partikler). Uran findes naturligt i isotoperne  $^{235}\text{U}$  og  $^{238}\text{U}$ , som spontant henfalder til bly henover meget præcist fastlagte tidsintervaller.

For at kunne fastslå alderen på en enkelt zirkonkrystal, er forskerne først nødt til at knuse den sten, som zirkonen sidder i, og derefter opløse krystallen i en meget aggressiv syre under højt tryk og høje temperaturer. Efterfølgende



Mineralet Zircon ( $\text{ZrSiO}_4$ ) er det mest almindelige uran-bærende mineral brugt til uran-bly-datering. Kobbertråden på fotoet er 150  $\mu\text{m}$  tyk.



Foto fra forskernes laboratorium med et massespektroskop. Foto: James Connelly.

skal forskerne oprense mængden af bly og uran i prøven. På grund af udstødning fra biler findes bly overalt i luften og miljøet, og derfor bliver forskerne nødt til at udføre dette arbejde under ultrarene betingelser.

Efter uran og bly er oprenset, bruger forskerne massespektroskopi til at fastslå antallet af atomer af hver af de to uran-isotoper i prøven og sammenholde det med antallet af bly-atomer, der er opstået på grund af henfald. Alderen på zirkonen finder forskerne frem til ved at sætte tallene for antallet af de forskellige

isotoper ind i en simpel formel. Hele den ovenstående procedure fortsætter forskerne med på forskellige zirkoner, indtil de er sikre på resultatet.

Når først forskerne har bestemt alderen på en sten ud fra alderen på de indeholdte zirkoner, benytter de deres intuition og viden til at sætte det ind i en kontekst. Hvis forskerne eksempelvis daterer en vulkansk sten til at være én milliard år gammel, kan de ret let konkludere, at lavaen formentlig størknede for én milliard år siden i forbindelse med et vulkanudbrud.

Forskere har haft en idé om, at meteornedslagene i perioden efter opbygningen af asteroiden på den ene eller anden måde har påvirket livets udvikling på Jorden og sat skub i en biodiversificeringseffekt.

Ved hjælp af datering med uran-isotoper har James Connelly med kollegaer dog været i stand til at tidsfastsætte, at opbygningen af den store asteroide skete for 468 +/- 0,3 millioner år siden. Midten af den geologiske tidsperiode Ordovicium, hvor den store biodiversificering fandt sted, lå derimod fra for

472,5 millioner år siden, hvilket gør, at meteornedslag ikke kan være årsagen til eksplosionen i livets diversitet. Livets udvikling skete simpelthen før, de nævnte meteoriter begyndte at regne ned over vores lille blå planet.

### Så gammel er Månen

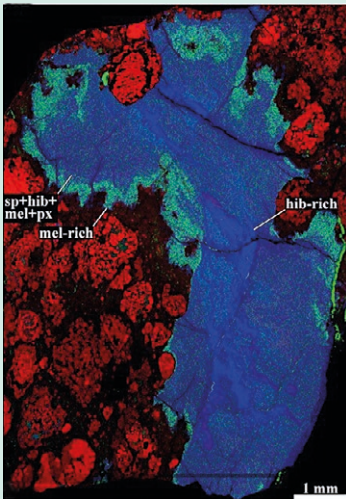
James Connellys forskning har også ledt til et yngre estimat af, hvornår Månen blev dannet.

Vores måne blev skabt, da to store himmellegemer kolliderede for cirka 4,5 milliarder år siden. Det meste

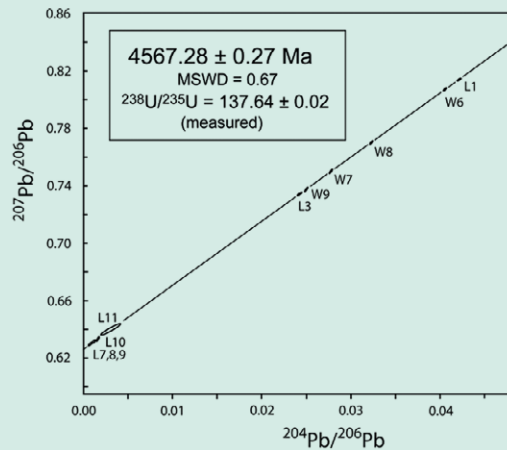
af materialet faldt tilbage på det ene af disse himmellegemer og blev til det, som i dag er Jorden, mens noget af det materiale, som var længere væk, dannede månen.

Mange forskere har gennem tiden benyttet forskellige metoder til at fastslå, hvornår denne kataklysmiske begivenhed fandt sted, og deres estimater spænder over et par hundrede millioner år omkring et tidspunkt for 4,51 milliarder år siden.

James Connellys mere præcise må-



Billedet viser den calcium-aluminium-inklusion (blå-grønne farver), som blev analyseret for at opnå de data, der er vist i plottet. Illustrationer fra Connelly et al 2012.



Et plot af blyisotop-forhold fra et af de første objekter, der blev dannet i Solsystemet (en inklusion af calcium-aluminium fra en primitiv meteorit). Blyisotop-forholdet der, hvor kurven skærer y-aksen, kan forskerne bruge til at udregne alderen på Solsystemet, nemlig  $4567,28 \pm 0,27$  millioner år.

mater for iltindholdet i atmosfæren, har disse tidligere estimater ikke haft den samme præcision, som forskere kan opnå nu.

James Connelly er i den forbindelse i færd med et forskningsprojekt, hvor forskerne kigger på sammenhængen mellem stigningen i mængden af ilt i atmosfæren for omkring 500 millioner år siden og udviklingen af liv under den kambriske eksplosion.

»Det er den slags hønen-og-ægget-spørgsmål, som man kun kan besvare, hvis man har en meget præcis kronologi over begivenhedernes gang. Kun hvis vores målinger er præcise nok, kan vi begynde at se på samspillet mellem ilt i atmosfæren og livets udvikling. Er det sådan, at iltniveauet i atmosfæren ændrede sig, og livet på Jorden reagerede efterfølgende, eller skete det omvendt?« siger James Connelly.

At uran kan bruges til at bestemme ilt i atmosfæren for mange millioner år siden skyldes igen, at uran har to oxidationstrin,  $U^{+4}$  og  $U^{+6}$ .  $U^{+4}$  er ret uopløselig i vand, mens  $U^{+6}$  godt kan opløses i vand. Derudover opstår der fraktionering mellem uran-isotoperne, fordi det er en smule lettere at reducere  $^{238}U$  end  $^{235}U$  (omdanne fra  $U^{+6}$  til  $U^{+4}$ ). Disse to ting sat sammen gør det muligt for forskerne at bestemme indholdet af ilt i atmosfæren i geologisk tid ved at kigge på isotopsammensætningen af uran i sedimenter, der blev aflejret for mange millioner år siden.

»Vi benytter bjergarter, der hovedsageligt stammer fra fossiliserede dyr, fordi de findes overalt og ikke fraktionerer uran, når de bliver dannet. Det vil sige, at de repræsenterer, hvordan det så ud i havet den gang. Ved at kigge på forskellige sedimentlag, der blev dannet på forskellige tidspunkter, kan vi se på variationen i uran-isotoperne og forstå, hvordan iltniveauerne er steget og faldet i havet og deraf også udlede, hvordan de har været i atmosfæren,« forklarer James Connelly. ■

#### Videre læsning:

Connelly JN, Bizzarro M, Krot AN, Nordlund Å, Wielandt D, Ivanova MA. (2012): The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*. Vol 338, p651-655.

linger peger dog på, at Månen blev formet for 4,426 til 4,417 milliarder år siden, hvilket er i den yngre del af estimaterne. Det er desuden inden for en meget snæver tidsramme på kun 9 millioner år.

I det hele taget er James Connellys forskningsgruppe meget interesseret i perioden lige efter solsystemets fødsel. Vi ved, at solsystemet blev dannet for 4,567 milliarder år siden, men kronologien i de efterfølgende begivenheder er uklar. Solen blev i sig selv dannet på blot 1 million år fra en gigantisk gassky, men endnu er det uvist, hvilke planeter der efterfølgende blev dannet først, og hvor de fik deres masse fra. Kun ved at kortlægge de enkelte begivenheder og sætte dem ind i en kronologisk rækkefølge, kan forskere begynde at besvare nogle helt fundamentale spørgsmål om den verden, vi tager for givet.

Forskernes store opgave er at finde frem til meget præcise estimater for tidsperioder, som ligger meget lang tilbage i tiden. Eksempelvis er det svært at komme med en præcis kronologisk rækkefølge for astronomiske begivenheder inden for de første 5 millioner år efter solsystemets fødsel, hvis alle dateringer af bjergarter fra perioden er +/- 5 millioner år.

»Kan vi derimod komme ned på +/- 0,1 millioner år, kan vi være mere sikre på, at den kronologi, som vi er kommet frem til, også er den rigtige. Det er det, vi arbejder på: At få nok præcision i vores dateringer, så vi kan sige noget om de første 5 millioner år af solsystemets eksistens. Man kan sammenligne problemstillingen med dinosaurernes uddøen. Det nytter ikke noget at konkludere, at en meteor udryddede dinosaurerne, hvis vi kun kan datere meteornedslaget til cirka det tidspunkt, hvor dinosaurerne uddøde +/- 5 millioner år. Vi er nødt til at vide, at meteoren faldt ned, før dinosaurerne forsvandt og ikke muligvis efter,« siger James Connelly.

#### Beregner fortidens indhold af ilt i atmosfæren

Et andet forskningsområde, hvor James Connelly har benyttet uran-isotoper til at blive klogere på fortiden, er i forbindelse med beregninger af ilt i atmosfæren og havet i geologisk tid.

I den sammenhæng er det vigtigt at pointere, at uran er følsomt overfor mængden af ilt i atmosfæren. Jo mere ilt, der er, des mere forskydes forholdet mellem  $^{235}U$  og  $^{238}U$ . Det betyder, at fraktionering kommer i spil, og i og med fraktionering ikke har været indregnet i tidligere esti-