



Het zonnestelsel bestond zo'n 4,56 miljard jaar geleden grotendeels uit een protoster omringd door een protoplanetaire schijf van stof en gas. Over een tijds-
spanne van miljoenen jaren zouden zich in deze protoplanetaire schijf uiteindelijk planeten zoals de Aarde vormen. Foto: NASA/JPL-Caltech. T. Pyle (SSC).

De eerste 10 miljoen jaar van het zonnestelsel:

Accretie en differentiatie van planetesimalen

door Thomas Kruijer
Institute of Geochemistry and Petrology, ETH Zurich, Switzerland
thomas.kruijer@erdw.ethz.ch

Zo'n 4,56 miljard jaar geleden bestond ons zonnestelsel uit een jonge protoster omringd door een kegelvormige schijf die uit niet veel meer bestond dan gas en stof. Hier vonden de planeetvormende processen plaats die uiteindelijk zouden leiden tot de bouw van terrestrische planeten zoals de Aarde. Ik bestudeer meteorieten – op de Aarde gevallen brokstukken gesteente uit de ruimte – om meer te weten te komen over de processen die plaatsvonden in de eerste miljoenen jaren van ons zonnestelsel. In deze periode was er nog geen sprake van de planeten zoals we die nu kennen, zoals de Aarde, Venus en Mars, maar werden in verschillende stadia steeds grotere planeetachtige lichamen gevormd.

Planeetvormende processen in de zonnenevel

De eerste 10 miljoen jaar van ons zonnestelsel was veruit de meest dynamische periode van de 4,56 miljard jaar dat het zonnestelsel reeds bestaat. Er was van alles aan de gang. Gas uit de zonnenevel condenseerde tot vaste stofdeeltjes, die vervolgens onder invloed van verschillende processen samenklonterden. Vervolgens werden uit deze vaste deeltjes de eerste planeetachtige lichamen gevormd. De essentiële overgang van kleine stof-agglomeraten (met een diameter < 1 m) naar planetesimalen (met een diameter tussen 1 en 1000 km) wordt door astrofysici het minst goed begrepen. Het laatste proces van planeetvorming was meer stochastisch van aard, d.w.z. grotendeels van

toeval afhankelijk, en werd gekenmerkt door grote botsingen tussen planetesimalen en planetaire embryo's (diameter > 1000 km). Eén van deze botsingen – die tussen de proto-Aarde en een planetair embryo – heeft wellicht geleid tot de vorming van de Maan, zo'n honderd miljoen jaar na het begin van het zonnestelsel. Na enkele honderden miljoenen jaren was slechts een fractie van de oorspronkelijke hoeveelheid planetesimalen overgebleven; de totale massa van het binnenste deel van het zonnestelsel lag grotendeels opgeslagen in slechts vier terrestrische planeten (Mercurius, Venus, Aarde, Mars) en de zon.

Een groot deel van de tot op heden overgebleven planetesimalen en planetaire embryo's vormt nu de asteroïdengordel tussen Mars en Jupiter. Meteorieten zijn brokstukken van op een zeker moment opgebroken asteroïden. Veel meteorieten zijn dus restanten van vroeg gevormde planetesimalen; voor wetenschappers zijn zij een onschatbare bron van informatie over de vroegste geschiedenis van het zonnestelsel.

Begrippen:

Planetesimalen:

Kleine (1-1000 km) planeetachtige objecten die in een protoplanetaire schijf zijn gevormd gedurende de eerste 10 miljoen jaar van het zonnestelsel.

Planetaire embryo's:

Grotere (>1000 km) planeetachtige lichamen die gevormd zijn na botsingen tussen planetesimalen. Nog grotere botsingen tussen deze embryo's (en overgebleven planetesimalen) leidden uiteindelijk tot de bouw van terrestrische planeten.

Asteroïden:

Overgebleven planetesimalen en planetaire embryo's uit het vroege zonnestelsel. De meeste asteroïden zijn nu in een stabiele baan om de zon en vormen een asteroïdengordel tussen Mars en Jupiter.

Meteorieten – een blik in het verre verleden

Meteorieten komen in vele variëteiten voor. Chondritische meteorieten (afb. 1a) zijn wat betreft petrologie en chemische samenstelling het meest primitief. Het zijn restanten van ongedifferentieerde protoplaneten en hun chemische samenstelling is gelijk aan die van de zon (met uitzondering van de vluchtige elementen). De verschillende componenten in chondrieten, zoals chondrulen, Ca-Al-rijke inclusies, matrix en andere componenten, zijn zeer waarschijnlijk direct in de zonnenevel gevormd. Cosmochemici bestuderen deze primitieve componenten

daarom om de condities in de zonnenevel te reconstrueren. Ca-Al-rijke inclusies (CAI's) bestaan uit mineralen die op zeer hoge temperatuur gekristalliseerd zijn. Omdat dit de oudst gedateerde objecten in ons zonnestelsel zijn (~4,567–4,568 miljard jaar) worden CAI's door cosmochemici als referentiepunt in de tijd voor het begin van het zonnestelsel gebruikt ($t=0$). Ouderdommen van meteorieten worden daarom veelal aangeduid als tijdsinterval ten opzichte van de vorming van CAI's. Een andere categorie meteorieten komt echter van planetesimalen die na hun accretie onder invloed van intense warmte volledig gesmolten en daardoor gedifferentieerd zijn in mantel en kern. Voorbeelden hiervan zijn ijzermeteorieten (afb. 1b) en silicaat-rijke steenmeteorieten (bijv. basalt van de asteroïde Vesta), die respectievelijk de ijzer-nikkelkernen en silicarijke mantels van planetesimalen vormden.

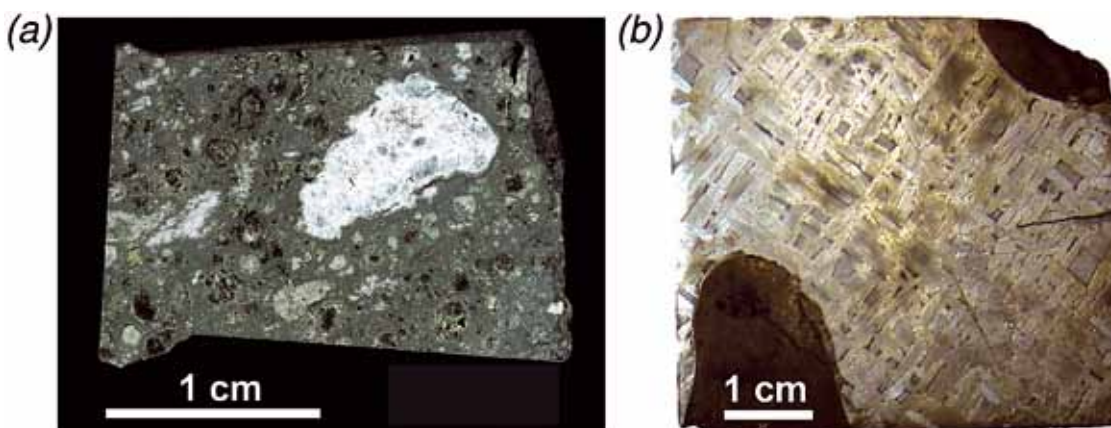
Datering van silicaat-ijzerdifferentiatie

In de cosmochemie gebruikt men, evenals in de geochemie, dikwijls radionucliden om meteorieten te dateren. Het meten van de isotopoverhoudingen in meteorieten maakt het mogelijk om de chronologie van het vroege zonnestelsel tot in groot detail te reconstrueren. Het ^{182}Hf - ^{182}W -vervalsysteem wordt gebruikt om de differentiatie van planeten in kern en mantel te dateren. Een kortlevende (en nu uitgestorven) isotoop van het element hafnium (^{182}Hf) was radioactief en verviel relatief snel naar een wolfram-isotoop van dezelfde massa (^{182}W) met een halfwaardetijd van ongeveer 9 miljoen jaar.

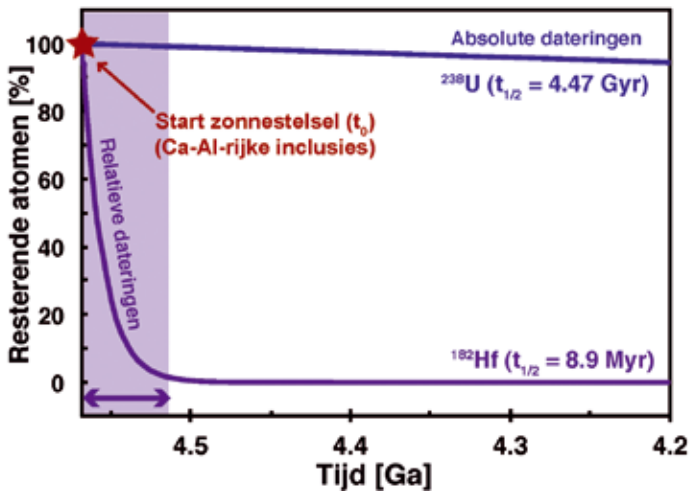
Een nadeel van het ^{182}Hf - ^{182}W -systeem is dat hiermee alleen differentiatieprocessen die plaatsvonden in de eerste 50 miljoen jaar van ons zonnestelsel gedateerd kunnen worden (afb. 2). Na die periode waren alle aanwezige ^{182}Hf -atomen vervallen tot ^{182}W -atomen. Dit heeft tot gevolg dat met dergelijke kortlevende vervalsysteemen alleen relatieve dateringen ten opzichte van bijvoorbeeld de ouderdom van CAI's uitgevoerd kunnen worden (dit in tegenstelling tot langlevende vervalsysteemen zoals ^{238}U - ^{206}Pb of ^{87}Rb - ^{87}Sr die voor absolute dateringen worden gebruikt; afb. 2). De moeilijkheid van dateringen aan meteorieten is dat we processen trachten te reconstrueren die niet alleen plaatsvonden binnen een zeer kort tijdbestek (minder dan 10 miljoen jaar), maar tevens bijzonder ver in het verleden (meer dan 4,5 miljard jaar geleden). Het is alsof je met een lange hengel een mug op de spits van een kerktoren probeert dood te slaan. Het grote voordeel van dergelijke kortlevende en uitgestorven isotopen is echter dat zij gedurende hun korte leven relatief snel tot een andere isotoop vervielen. Dat betekent dat je als analist relatief grote isotoop-anomalieën meet voor een gegeven tijdsinterval (afb. 2), wat dan weer resulteert in een hogere nauwkeurigheid en resolutie in de tijd.

De ^{182}Hf - ^{182}W -chronometer

Maar hoe werkt zo'n ^{182}Hf - ^{182}W -datering nu eigenlijk? In de

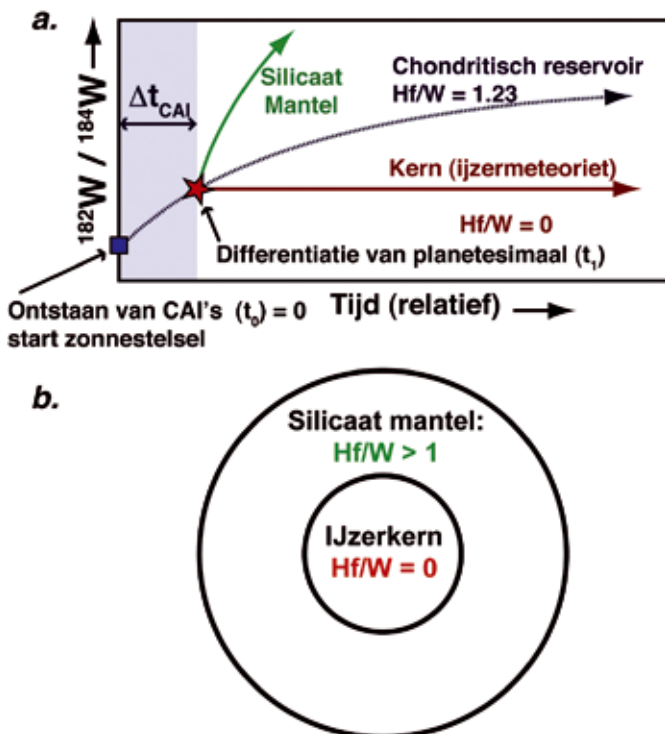


Afb. 1. Enkele voorbeelden van meteorieten: (a) fragment van CV3 chondriet Allende. Afgeronde chondrulen zijn als afzonderlijke componenten in de matrix herkenbaar. De witte en onregelmatige vorm middenin is een Ca-Al-rijke inclusie (CAI). Deze CAI's zijn de oudst gedateerde objecten (tot ~4,568 miljard jaar) die in ons zonnestelsel gevormd zijn. (b) Gepolijst specimen van IIIAB ijzermeteoriet Cape York met relatief grote donkere inclusies van het mineraal troiliet (FeS).



Afb. 2. Onderscheid tussen een kortlevend (^{182}Hf - ^{182}W) en een langlevend (^{238}U - ^{206}Pb) radioactief vervalstelsel. De ^{182}Hf - ^{182}W chronometer maakt het mogelijk om differentiatieprocessen in de eerste ~50 miljoen jaar na het ontstaan van het zonnestelsel met grote nauwkeurigheid te dateren. Deze ouderdommen zijn echter altijd relatief, bijv. ten opzichte van het moment waarop zich Ca-Al-rijke inclusies vormden. Langlevende radionucliden (zoals ^{238}U) vervallen nog altijd en zijn daarom geschikt voor absolute dateringen.

zonnenevel komen de sporelementen hafnium en wolfram in relatief constante ('chondritische') proporties voor ($\text{Hf}/\text{W} \sim 1,23$). Door het verval van ^{182}Hf neemt de $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ -verhouding in de zonnenevel in de loop van de tijd toe (afb. 3a). Interne processen in planeetachtige lichamen kunnen de Hf/W -verhouding van het zonnestelsel echter veranderen (of 'fractioneren'). Dit heeft te ma-



Afb. 3. Datering van de metaal-silicaat-differentiatie met behulp van het ^{182}Hf - ^{182}W -stelsel. (a) Evolutie van de $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ -verhouding door de tijd. De ^{182}Hf - ^{182}W -chronometer dateert het moment van metaal-silicaat-segregatie in een planetesimaal. Door $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ -verhoudingen in ijzermeteorieten te meten en deze op de evolutiecurve van de zonnenevel te projecteren ('chondritisch reservoir'), is het mogelijk om relatieve ouderdommen ten opzichte van het begin van het zonnestelsel te berekenen. (b) Fractionering van Hf en W in een protoplaneet.

ken met de chemische eigenschappen van deze elementen. Hafnium is een lithofiel ('silicaatminnend') element, terwijl wolfram voornamelijk siderofiel is ('ijzerminnend'). Gedurende de metaal-silicaat-differentiatie komt Hf door deze eigenschap volledig in de silicaatmantel terecht, terwijl wolfram grotendeels in de ijzerkern verdwijnt. Dit resulteert in een hoge Hf/W -verhouding in de mantel, terwijl deze in de kern vrijwel gelijk aan nul is (afb. 3b). Hoewel de $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ -verhouding in de mantel na differentiatie op een zeker moment (door haar verhoogde Hf/W -ratio) versneld toeneemt, blijft de $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ verhouding in de ijzerkern constant in de daaropvolgende miljarden jaren (afb. 3a). Metingen van de $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ -verhouding in een ijzermeteoriet (een fragment van zo'n ijzerkern) met behulp van een massaspectrometer maken het hierdoor mogelijk om directe ouderdomsbepalingen te doen. In mijn onderzoek meet ik de W-isotopensamenstelling van ijzermeteorieten om de metaal-silicaat-differentiatie in de vroegste planetesimalen te dateren.

De paradox: ijzermeteorieten zijn ouder dan chondrieten

Onze Hf-W-dateringen aan ijzermeteorieten tonen aan dat Ca-Al-rijke inclusies - de oudst gedateerde objecten in het zonnestelsel - en de moederlichamen van ijzermeteorieten gelijktijdig gevormd zijn (afb. 4). Deze nieuwe resultaten bevestigen een enkele jaren geleden gedane wetenschappelijke ontdekking. IJzermeteorieten - restanten van gedifferentieerde planetesimalen - blijken 2 tot 3 miljoen jaar ouder te zijn dan chondrieten (afb. 4), en dat terwijl individuele componenten in chondrieten tot de meest primitieve materialen van ons zonnestelsel behoren (zoals CAI's). Voorheen werd aangenomen dat ijzermeteorieten de gedifferentieerde producten van chondrieten representeren, maar dat blijkt dus niet het geval. Vreemd genoeg heeft men het materiaal dat de complementaire silicaatmantels van deze planetesimalen vormde - de silicaatrijke meteorieten met dezelfde ouderdom als ijzermeteorieten - nog niet kunnen identificeren. Maar dat deze silicaatmantels ooit bestonden staat hoogstwaarschijnlijk vast: de Hf-W-ouderdommen van ijzermeteorieten tonen aan dat Hf en W ooit gefractioneerd zijn, en dat er dus metaal-silicaatdifferentiatie in de moederlichamen van ijzermeteorieten moet hebben plaatsgevonden.

Bij radioactief verval komt in het algemeen een grote hoeveelheid warmte vrij, in het bijzonder voor nucliden met een korte halfwaardetijd. Naast ^{182}Hf was in het vroege zonnestelsel een andere, nog sneller vervallende nuclide in hoge concentraties aanwezig: aluminium-26. Met een halfwaardetijd van 0,73 miljoen jaar verviel dat zo snel dat vroeg gevormde protoplaneten tot de smelttemperatuur (>1000-1500°C) van gesteente verhit werden. De snel afnemende concentratie van ^{26}Al in de eerste miljoenen jaren biedt wellicht een verklaring voor de paradox dat ijzermeteorieten ouder blijken dan chondrieten (afb. 4). IJzermeteorieten zijn afkomstig van planetesimalen die relatief vroeg vormden en onmiddellijk konden differentiëren onder invloed van door ^{26}Al -verval geproduceerde warmte. Pas twee tot drie miljoen jaar later werden uit de verschillende componenten in chondrieten (chondrulen, matrix, CAI's en andere componenten) de moederlichamen van chondrieten gebouwd. In tegenstelling tot de planetesimalen waarvan ijzermeteorieten de kernen vormden, zijn de moederlichamen van chondrieten nooit gesmolten en gedifferentieerd. Omdat de snel vervallende nuclide ^{26}Al in een paar miljoen jaar tijd tot dermate lage concentraties gereduceerd was, kon deze isotoop onvoldoende radioactieve warmte voor differentiatie in planetesimalen opwekken. Daarbij dient overigens te worden vermeld dat bepaalde klassen chondrieten wel thermische metamorfose hebben ondergaan ten gevolge van warmte opgewekt door ^{26}Al -verval.

De bouw van planeten in ons zonnestelsel werd voltooid in de daaropvolgende tientallen miljoenen jaren. Gigantische botsingen tussen planetesimalen en planetaire embryo's leidden tot de groei van planeten. In dit stadium was het aantal radioactieve

^{26}Al -atomen al tot een minimum gereduceerd en speelde deze nuclide geen rol meer als warmtebron. Terrestrische planeten zoals de Aarde moesten het voor hun differentiatie hebben van andere warmtebronnen, zoals compressie onder invloed van de toenemende zwaartekracht, inslagen en radioactief verval van langlevende radionucliden.

Planetesimalen kunnen alleen differentiëren onder invloed van radioactief verval van ^{26}Al indien hun diameter groot genoeg is (tientallen kilometers). IJzermeteorieten zijn restanten van relatief grote (met een diameter tussen 20 en 1000 km), gedifferentieerde planetesimalen. Dit impliceert dat de datering van ijzermeteorieten belangrijke informatie verschaft over hoe vroeg in de geschiedenis van het zonnestelsel relatief grote planetesimalen werden gevormd (bedenk dat het moment van differentiatie zonder uitzondering plaatsvindt na de accretie van een planetesimaal). Numerieke modellen laten zien dat planetesimalen vrijwel direct differentiëren na hun accretie. Ons onderzoek bevestigt met grotere nauwkeurigheid dan voorheen dat dit al heel vroeg in de geschiedenis van het zonnestelsel het geval was, minder dan 1 miljoen jaar na de vorming van de eerste inclusies (CAI's), i.e. de start van het zonnestelsel.

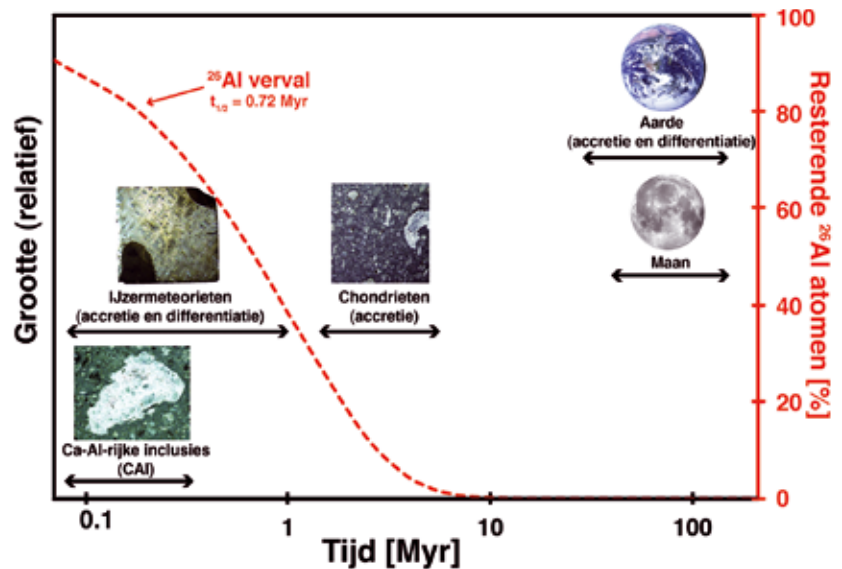
Tot slot: effecten van kosmische straling op Hf-W-ouderdommen

Naarmate metingen preciezer worden door verbeterde analytische apparatuur, krijgen we ook steeds meer met secundaire effecten op isotopenverhoudingen te maken. Ondanks de analytische precisie die je in theorie kunt bereiken, beklijft de belangrijkste vraag of je metingen correct zijn. Het dagelijks werk in het laboratorium bestaat voor een groot deel uit het 'fine-tunen' van meettechnieken.

Een belangrijke doelstelling van mijn project is om een correctiemethode te ontwikkelen voor W-isotopenvariëaties die veroorzaakt worden

door kosmische straling.

Wanneer meteorieten na het opbreken van hun moederlichaam naar de Aarde reizen – dit kan wel tot 1.5 miljard jaar duren! –, worden deze metersgrote lichamen blootgesteld aan kosmische straling. Deze straling leidt tot nucleaire reacties binnenin de meteoriet, met als gevolg een verlaging van de $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ -verhoudingen. Dit gesupponeerde effect resulteert in te hoog gemeten ouderdommen. De in dit artikel genoemde Hf-W-ouderdommen voor ijzermeteorieten komen van monsters die zeer waarschijnlijk niet beïnvloed zijn door kosmische straling, wat resulteert in correcte ouderdomsbepalingen.



Afb. 4. Chronologie en evolutie van het vroege zonnestelsel. Alle ouderdommen zijn verkregen door middel van radiometrische dateringen. Ca-Al-rijke inclusies definiëren het begin van het zonnestelsel. Ijzermeteorieten representeren de Fe-Ni-kernen van de eerste planetesimalen, die differentieerden onder invloed van door ^{26}Al -verval gegenereerde warmte. Accretie van chondrieten vond 2-3 miljoen jaar later plaats, nadat het ^{26}Al in het zonnestelsel afgenomen was tot <25% van het oorspronkelijke gehalte. Planeetvorming in ons zonnestelsel was voltooid na de accretie en differentiatie van terrestrische planeten zoals de Aarde.