

Maan afkomstig diep uit de aarde

Een alternatieve hypothese voor het ontstaan van de Maan

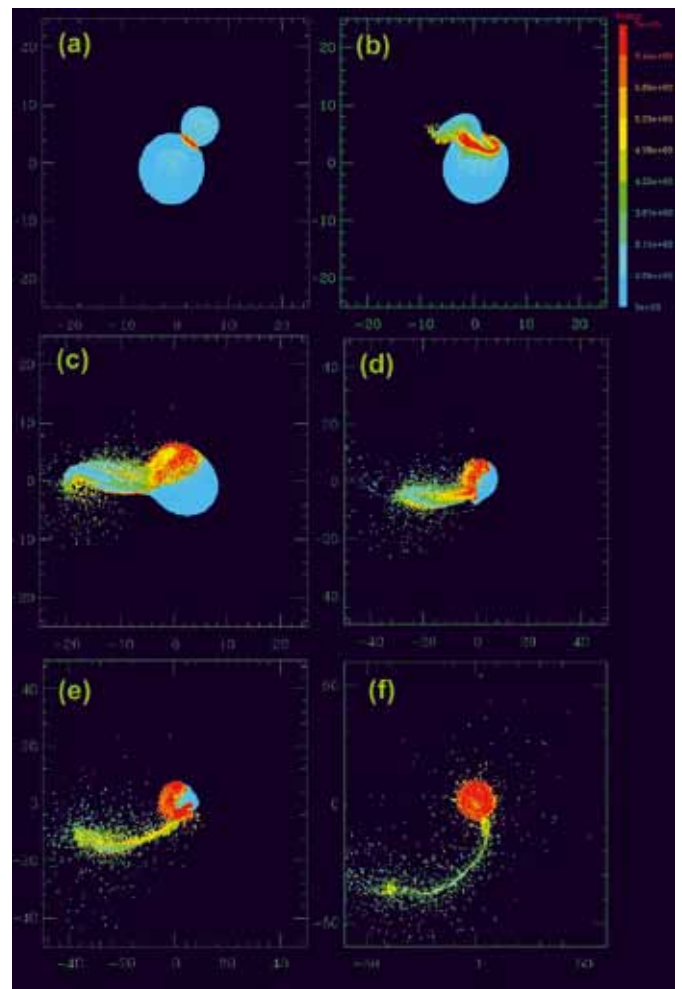
door Wim van Westrenen¹ en Rob de Meijer²

Samenvatting

In dit artikel presenteren wij een alternatieve, controversiële hypothese over de vorming van de Maan. Volgens het algemeen aanvaarde model is de Maan ontstaan uit de brokstukken van een botsing tussen onze Aarde en een tweede planeet ter grootte van Mars. Dit ‘grote botser’ model komt de laatste jaren echter steeds verder onder druk te staan. In deze bijdrage geven we eerst een overzicht van de voornaamste problemen van dat model en komen daarna met een nieuw idee. We maken aannemelijk dat de Maan is samengesteld uit mantel- en korstgesteenten die uit de Aarde zijn geslingerd als gevolg van een opholslaande, natuurlijke nucleaire georeactor op de grens tussen de aardkern en aardmantel.

Inleiding

Het ‘grote botser’ model voor de vorming van de Maan, dat halverwege de jaren 1970 ontwikkeld is door de Amerikanen Hartmann & Davis en Cameron & Ward, heeft vele attractieve eigenschappen. Computerberekeningen aan dit model laten zien dat een botsing tussen de jonge Aarde en een planeet ter grootte van Mars (door astronomen Theia gedoopt, de moeder van Selene (de Maan) in de Griekse mythologie) kan leiden tot de vorming van een maan met ongeveer de juiste massa en de juiste afstand tot de Aarde (afb. 1). Als de karakteristieken van deze botsing (de snelheid waarmee Aarde en Theia elkaar raken, de inslaghoek, de afmetingen van Aarde en Theia) goed gekozen worden, kan ook het huidige, relatief grote, draaiimpulsmoment van het Aarde-Maan systeem aardig worden nagebootst (dit draaiimpulsmoment is de ‘totale hoeveelheid rotatie’ van de twee lichamen opgeteld). Een dergelijk model kan ook verklaren waarom het ijzergehalte van de Maan zoveel lager is dan dat van de Aarde. Als de grote botsing plaatsgevonden heeft nadat zowel Aarde als Theia al een ijzerrijke metalen kern gevormd hadden, dan zou de kern van Theia na de botsing in de Aarde terechtgekomen zijn en naar het midden gezakt zijn. Het materiaal dat in een baan om de Aarde terechtgekomen was, zou dan voornamelijk bestaan hebben uit silicaatmineralen afkomstig van Aarde en Theia. Dit zou een Maan geven die vrijwel alleen uit silicaten bestaat, met maar een heel kleine of zelfs geen ijzerkern – precies volgens de waarnemingen.



Afb. 1. Zes afbeeldingen uit een recent computermodel van een Maanvormende botsing (van Robin Canup, Southwest Research Institute, VS, 2008). De kleurcodering geeft temperaturen aan (blauw = 2000 Kelvin, rood = 7000 Kelvin). Tussen afbeelding (a) en afbeelding (f) zit ongeveer 5 uur. Linksonder in (f) is de Maan al deels gevormd uit de brokstukken die na de botsing in een baan rond de Aarde terecht zijn gekomen.

¹Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit Amsterdam, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, wim.van.westrenen@falw.vu.nl

²Stichting EARTH, de Weehorst, 9321 XS 2, Peize, rmeijer@geoneutrino.nl

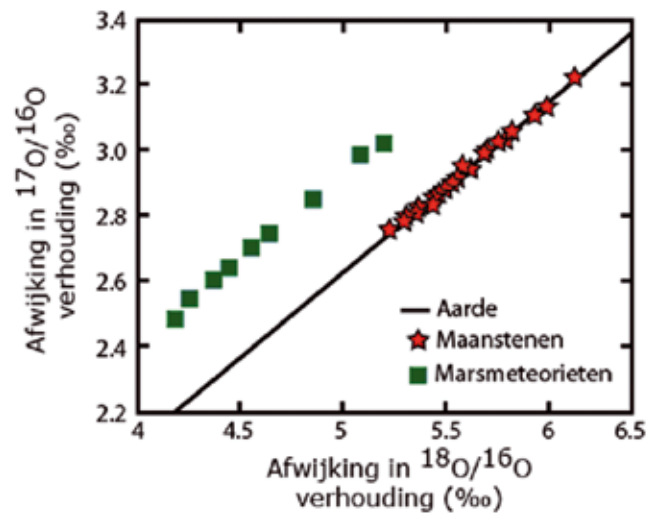
Isotopensamenstellingen

Ieder chemisch element is opgebouwd uit een kern, waarin protonen en neutronen zitten en een schil waarin de elektronen om de kern draaien. Elk element heeft een vast aantal protonen en elektronen. Het aantal protonen en elektronen is altijd gelijk. Waterstof (H) bijvoorbeeld heeft één proton en één elektron, goud (Au) heeft 79 protonen en net zoveel elektronen. Het aantal neutronen in de kern kan wel verschillen. Vormen de neutron-protoncombinaties stabiele kernen, dan spreken wij over stabiele isotopen. Zo heeft zuurstof drie stabiele isotopen, die acht protonen en acht (^{16}O), negen (^{17}O) of tien neutronen (^{18}O) in de kern hebben. Is een combinatie van protonen en neutronen in de kern niet stabiel, dan zal de kern veranderen door uitzending of invangen van een deeltje of van straling. Een voorbeeld hiervan is het radioactieve koolstof-14, dat vervalt tot het stabiele stikstof-14. De verdeling van stabiele isotopen in de diverse delen van de Aarde (en de Maan) zegt iets over de processen die hebben plaatsgevonden in het verleden. (Meer informatie staat in 'Hoe werkt de Aarde' van Van Westrenen en De Meijer, en 'Radioactiviteit', Wetenschappelijke Bibliotheek, deel 77, Natuurwetenschap & Techniek.)

Het 'grote botser' model lijkt zo een perfecte oplossing te leveren voor de grote raadsels die ontstonden na de succesvolle Maanlandingen door de Apollomissies tussen 1969 en 1972. Tot die tijd waren er twee rivaliserende modellen voor het ontstaan van de Maan. Een groep onderzoekers dacht dat de Maan elders in het zonnestelsel was gevormd en later werd ingevangen door het zwaartekrachtveld van de Aarde (het 'invang' model). Een andere stroming ging ervan uit dat Maan en Aarde tegelijkertijd op dezelfde afstand van de Zon gevormd waren (het 'co-accretie' of 'tweelingen' model). Het wetenschappelijke hoofddoel van de Apollomissies was dan ook om te ontdekken welke van deze twee modellen klopte. Tot ieders verrassing zorgden de Apollomissies er echter voor dat beide modellen afgewezen moesten worden.

Chemische analyses van teruggebrachte Maanstenen haalden eerst het 'invang' model onderuit. De zuurstofisotopensamenstelling [zie kader] van deze stenen bleek namelijk identiek aan die van de Aarde (afb. 2), en dat is niet te verklaren met dit model. Uit eerder onderzoek aan meteorieten was al gebleken dat de zuurstofisotopensamenstelling van lichamen in het zonnestelsel sterk varieert, en grofweg afhankelijk is van de afstand tot de Zon tijdens de vorming van het lichaam. Als de Maan elders in het zonnestelsel was gevormd, zoals het invangmodel voorstelt, zou de zuurstofisotopensamenstelling van de Aarde en de Maan duidelijk moeten verschillen. Omdat zuurstof het belangrijkste element in zowel Aarde als Maan is (bijna 70% van alle atomen in beide hemellichamen zijn zuurstofatomen) is het essentieel dat een succesvol model van de vorming van de Maan de gelijke zuurstofisotopensamenstelling van Aarde en Maan kan verklaren. De zuurstofisotopensamenstelling betekende dan ook een fikse steun in de rug van het 'co-accretie' model. Bij gelijktijdige vorming van Aarde en Maan op ongeveer dezelfde plaats in het zonnestelsel is het niet onlogisch dat de zuurstofisotopensamenstelling van de twee lichamen gelijk is.

Ook het 'co-accretie' model overleefde toetsing via de Apollo-missies echter niet. De vier seismometers die de Apollo-astro-nauten op het Maanoppervlak plaatsten, hebben in de loop der jaren duizenden Maanbevingen geregistreerd. Geofysici hebben uit deze gegevens afgeleid dat de Maan weliswaar net als onze eigen planeet gedifferentieerd is in een korst, mantel en kern, maar dat de kern van de Maan in verhouding veel kleiner is dan die van de Aarde. De Maan is dus veel armer aan ijzer dan de Aarde. Dit is in directe tegenspraak met voorspellingen van het



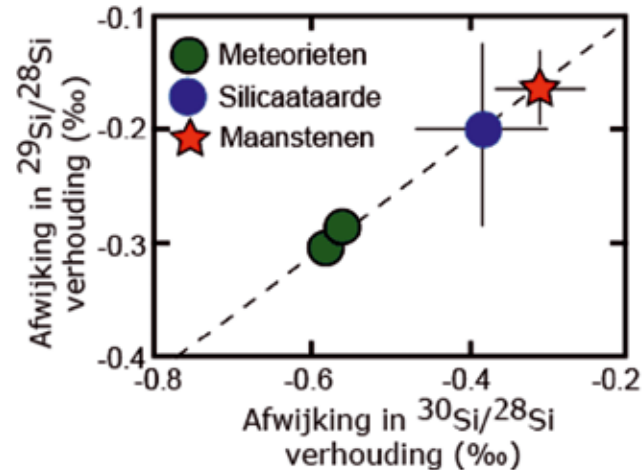
Afb. 2. Vergelijking tussen de zuurstofisotopenverhouding van terrestrische gesteenten en Maanstenen. Het element zuurstof heeft drie stabiele isotopen met massa's 16, 17, en 18 u (= atomaire massa-eenheid). Zuurstofisotopensamenstellingen worden gemeten als afwijkingen (in pro mille) in de $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ en $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ verhoudingen ten opzichte van een standaard. Alle metingen van aardse stenen vallen op de zwarte lijn, die de 'terrestrische fractionatielijne' genoemd wordt. De blauwe symbolen zijn metingen van Apollo-monsters van de Maan. Ter vergelijking zijn metingen van Marsmeteorieten afgebeeld. In ons zonnestelsel vallen alleen Aarde en Maan precies op elkaar in dit diagram. Alle andere hemellichamen waarvoor metingen beschikbaar zijn volgen andere trends op dit diagram.

co-accretiemodel. Als de Aarde en Maan gevormd zijn op dezelfde afstand van de Zon, dan zou hun chemische samenstelling ongeveer gelijk moeten zijn. Voor het ijzergehalte is dat duidelijk niet het geval. Het falen van de twee belangrijkste modellen voor vorming van de Maan maakte de weg vrij voor de ontwikkeling van het 'grote botser' model. Gedurende de afgelopen 35 jaar is de status van dit model vrijwel onaantastbaar geworden. Zoals we hieronder laten zien, maken recente ontwikkelingen een nieuwe kijk op Maanvorming echter noodzakelijk.

Problemen met het 'grote botser' model

De afgelopen drie jaar is de betrekkelijke rust voor wat betreft modellen voor de vorming van de Maan flink verstoord. Twee onderzoekslijnen zorgen voor beroering. Enerzijds laten steeds gedetailleerdere computerberekeningen van botsingen duidelijk zien dat een Maan die ontstaan is uit de brokstukken van een botsing tussen de Aarde en Theia voor het overgrote deel (zo'n 80%) zal bestaan uit materiaal dat oorspronkelijk uit Theia komt – niet uit Aards materiaal (afb. 1). Om het 'grote botser' model in de lucht te houden, moeten we er nu dus van uit gaan dat de zuurstofisotopensamenstellingen van de Aarde en Theia identiek waren. In de voorgaande sectie zagen we nou juist dat het 'invang' model eerder werd afgewezen omdat alle lichamen in het zonnestelsel unieke, verschillende zuurstofisotopensamenstellingen hebben. De uitkomst van de computermodellen is dus in tegenspraak met de observaties aan de Maanstenen. Anderzijds geeft een snelgroeijende reeks zeer precieze metingen van de isotopensamenstellingen van Maanstenen aan dat de Maan en de mantel en korst van de Aarde (samen de silicaataarde genoemd) vrijwel identiek zijn voor veel meer elementen dan alleen zuurstof (afb. 2). Afbeelding 3 laat metingen uit 2007 zien aan de isotopenverhoudingen van het element silicium voor gesteenten afkomstig van de Aarde en Maan. Ook in dit geval overlappen de data volledig. Ditzelfde geldt voor titaan-, chroom-, neodymium-, kalium- en zelfs wolframisotopen. Ten slotte blijkt uit analyses van het watergehalte van vulkanische glasbolletjes van de Maan zelfs dat het watergehalte van het inwendige van de Maan na maanvorming

identiek geweest kan zijn aan dat van de Aarde. De Maan en de Aarde vormen een uniek koppel in de aardwetenschappen. In alle andere ons bekende situaties waarbij gesteenten van diverse locaties met elkaar vergeleken worden, wordt het verschil tussen de gesteenten steeds groter naarmate de meetmethoden steeds verfijnder worden. Voor de Aarde en Maan geldt precies het tegenovergestelde: hoe nauwkeuriger we eigenschappen kunnen meten, des te kleiner die verschillen worden, of zelfs verdwijnen!



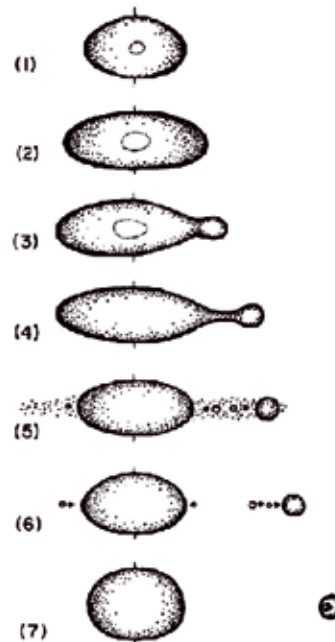
Afb. 3. Vergelijking tussen de siliciumisotopenverhouding van terrestrische gesteenten en Maanstenen. Het element silicium heeft drie stabiele isotopen met massa's 28, 29 en 30 u. Siliciumisotopensamenstellingen worden gemeten als afwijkingen (in pro mille) in de $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ en $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ verhoudingen ten opzichte van een standaard.

Zonder in deze beperkte ruimte in te kunnen gaan op de precieze werking van alle hiervoor genoemde isotopensystemen moge duidelijk zijn dat deze combinatie van gegevens een immens probleem vormt voor het 'grote botser' model. Laten we de siliciumisotopensamenstellingen als voorbeeld uitwerken. Afb. 3 laat zien dat de siliciumisotopensamenstelling van de silicaataarde en de Maan afwijkt van die van meteorieten. Meteorieten worden gezien als de bouwstenen voor de planeten. Het zou dus logisch zijn dat de siliciumisotopensamenstelling van de Aarde en Maan gelijk is aan die van meteorieten. Voor de Aarde wordt de gemeten afwijking verklaard doordat een deel van het Aardse silicium in onze ijzerrijke kern is opgelost. Dit gaat gepaard met een verandering in isotopensamenstelling zoals aangegeven in afb. 3. De mate waarin deze isotopensamenstelling verandert, hangt af van de grootte van het hemellichaam. Als er silicium opgelost is geweest in de ijzerkern van Theia, dan moet de mantel van Theia een andere siliciumisotopensamenstelling hebben gehad dan die van meteorieten, maar ook een andere dan die van de Aarde, want Aarde en Theia moeten verschillend van grootte geweest zijn om tot een succesvolle grote botsing te komen. Het 'grote botser' model voorspelt dus een verschil in siliciumisotopensamenstelling tussen Aarde en Theia, en dus tussen Aarde en Maan. Dit verschil zien we absoluut niet. Precies hetzelfde geldt voor alle andere hierboven genoemde isotopensystemen (titaan, chroom, kalium, neodymium en wolfram). De conclusie is onontkoombaar: de isotopensamenstelling van de silicaataarde en de Maan is identiek, en dit is in directe tegenspraak met de uitkomst van 'grote botser' modellen die laten zien dat zo'n 80% van de Maan niet uit de Aarde kan komen. Het aantonen van grote problemen met het momenteel universeel aanvaarde model voor Maanvorming is ons inziens essentieel en nuttig. Een prikkelender vraag is vervolgens natuurlijk: kun je dan op de proppen komen met een beter

alternatief? Hieronder proberen we die vraag bevestigend te beantwoorden.

Terug naar George Darwin

De eenvoudigste verklaring voor de ongelofelijke overeenkomsten tussen de samenstelling van de Maan en de silicaataarde (afb. 2 en 3) is dat de Maan rechtstreeks uit de silicaataarde is ontstaan. Dit idee is niet nieuw: een van de eerste hypothesen voor de vorming van de Maan werd in 1879 gepubliceerd door George Darwin (de zoon van de wereldberoemde Charles). Darwin dacht dat de Maan afgesplitst was van de buitenkant van de Aarde, door een combinatie van zeer snelle rotatie van de Aarde (veel sneller dan nu) en de getijden-interactie tussen de Aarde en de Zon. In afb. 4 is in een schets te zien hoe dit in zijn werk gegaan zou kunnen zijn. Door zeer snelle rotatie van



Afb. 4. Schets door Don Wise (1963) van het ontstaan van de Maan door afsplitsing vanaf een sneldraaiende Aarde.

een indertijd nog zeer warme Aarde zou de Aarde afgeplat worden bij de polen en uitstulpen rond de evenaar. Darwins idee was dat de getijden-interactie tussen Zon en Aarde kon zorgen voor vervormingen in de uitstulping rond de evenaar, wat uiteindelijk zou leiden tot afsplitsing van een stuk Aarde. Darwin stelde zelfs voor dat de Grote Oceaan een overblijfsel was van het gat dat de Maan na afsplitsing had achtergelaten in de Aarde.

De berekeningen van Darwin werden in de eerste helft van de 20ste eeuw verfijnd door illustere aardwetenschappers waaronder Jeffreys en Ringwood, en meer recent door Don Wise, een geofysicus die

deel uitmaakte van het team van wetenschappers dat de Apollo-astronauten adviseerde en metingen deed aan de teruggebrachte Maanstenen. De getijden-interactie tussen Zon en Aarde bleek echter verre van voldoende om een significante bult aan het aardoppervlak te creëren. In navolging van Darwin poneerden Ringwood en Wise wel dat de vorming van een ijzerrijke kern in de Aarde zou leiden tot een snelle stijging van het draaiimpulsmoment van de Aarde. Net als een kunstschachtsster sneller gaat draaien als ze haar gespreide armen dichter langs haar lichaam brengt, gaat de Aarde sneller draaien als het relatief dichte ijzer zich in het centrum van de Aarde concentreert.

De berekeningen lieten echter allemaal zien dat het huidige Aarde-Maan systeem energie tekort komt om de Maan op deze manier van de Aarde af te splitsen. Als we de Maan met haar draaiimpulsmoment terugbrengen in de Aarde, dan zou de rotatieperiode van de Aarde ongeveer 4 uur bedragen. Dit is niet snel genoeg om tot een uitstulping aan het aardoppervlak te komen die groot genoeg is om zich af te splitsen. Om deze reden werd het slijtingsmodel om de Maan te vormen al voor de Apollo-missies verworpen.

Maar naar aanleiding van de grote problemen met het 'grote botser' model die we in de vorige sectie schetsten, hebben wij dit afsplitsmodel nog eens goed onder de loep genomen. Met

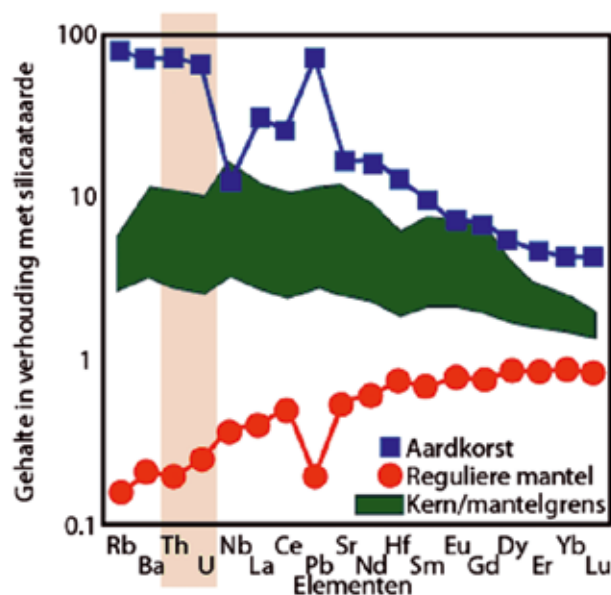
behulp van relatief eenvoudige berekeningen hebben wij de stabiliteit van het Aarde-Maan systeem zoals het nu is, vergeleken met een systeem waarin de Maan 'opgeborgen' zit in de Aarde. Op die manier is aan te tonen dat een sneldraaiende Aarde alleen een Maan kan lanceren als er binnen korte tijd ongeveer 0.5×10^{30} joule aan energie vrijkomt in de Aarde. Deze hoeveelheid energie is genoeg om een massa ter grootte van de Maan in een baan rond de Aarde te brengen. Hoewel het bestaan van een dergelijk 'energiegat' in een eerder stadium reden was om dit model in de prullenbak te gooien, hebben wij een energiebron 'gevonden' die een dergelijke hoeveelheid energie in korte tijd wel degelijk kan leveren: kernsplijting. Hieronder laten we zien dat de energie die vrijkomt bij het opholslaan (het ontploffen) van een natuurlijke kernreactor op de grens van de kern en de mantel van de Aarde voldoende is om de Maan rechtstreeks uit Aardmateriaal te vormen. Dit model verklaart rechttoe rechtaan waarom de isotopensamenstellingen van Aarde en Maan identiek zijn en het komt net zo goed overeen met alle andere gegevens over het Aarde-Maan systeem als het 'grote botser' model.

Een alternatieve hypothese

In een eerdere vakbladpublicatie (De Meijer en Van Westrenen, 2008) lieten we zien dat de kern-mantelgrens (KMG) een ideale plaats in de Aarde is voor zowel het ontstaan als het in stand houden van zogenaamde georeactoren: natuurlijke kernreactoren waarin uraan, thorium en plutonium worden omgezet in splijtingsproducten waarbij energie in de vorm van warmte vrijkomt. Dergelijke reactoren hebben in het geologische verleden zeker aan het aardoppervlak bestaan. Veldonderzoek in onder andere de Oklo uraanmijn in Gabon heeft aangetoond dat natuurlijke processen tot uraanconcentraties kunnen leiden die hoger zijn dan nodig voor het bereiken van kritikaliteit (de situatie waarbij de concentratie van het splijtbare uraan zodanig is dat een kernreactie gaande gehouden wordt). In Oklo zijn tientallen natuurlijke reactoren gevonden aan de hand van hoge concentraties splijtingsproducten. De reactoren die ontstaan zijn aan het oppervlak van de Aarde zijn gebaseerd op het principe waarbij door botsing met waterstofkernen in water de energie van de neutronen sterk wordt afgeremd (gemodereerd) tot die van een thermische beweging. Dergelijke neutronen hebben dan de juiste energie om door uraan-235 te worden ingevangen, waarop uraan-235 vervolgens splijt. Deze reactoren worden daarom langzame of thermische reactoren genoemd. In de diepe Aarde ontbreekt die 'moderator' en hebben we te maken met zogenaamde snelle reactoren waarbij snelle, ongemodereerde neutronen worden ingevangen. De diepe Aarde lijkt op het eerste gezicht een onlogische plaats voor georeactoren. Uraan, thorium en plutonium zijn typische zogenaamde magmatische elementen. Ze worden door hun relatief forse afmetingen niet gemakkelijk ingebouwd in de kristalroosters van mineralen, en concentreren zich tijdens smeltprocessen dus vooral in magma. Hierdoor zijn deze elementen vooral geconcentreerd in de korst, die immers ontstaan is uit het partieel opsmelten van mantelgesteenten. Afbeelding 5 geeft aan dat de concentraties van uraan en thorium, en een reeks andere magmatische elementen, in de reguliere aardmantel tot bijna duizend keer zo laag zijn als in de aardkorst – het bereiken van kritikaliteit voor het opstarten van een natuurlijke kernreactor in de mantel is dus veel lastiger. Recent geochemisch onderzoek, wederom gebaseerd op isotopensamenstellingen, heeft echter sterke aanwijzingen opgeleverd dat er een speciale uraan- en thoriumrijke gesteentelaag bestaat op de bodem van de Aardmantel, tegen de kern aan. Deze laag bestaat hoogstwaarschijnlijk uit delen van de alleroudste, ijzerrijke aardkorst, die door zijn hoge dichtheid en de hoge temperaturen snel helemaal naar de bodem van de mantel is gezonken. Deze diepe laag bevat tot honderd maal meer uraan en thorium dan de reguliere mantel (groene vlak in afb. 5).

Met behulp van de gegevens uit afb. 5 is uit te rekenen dat de

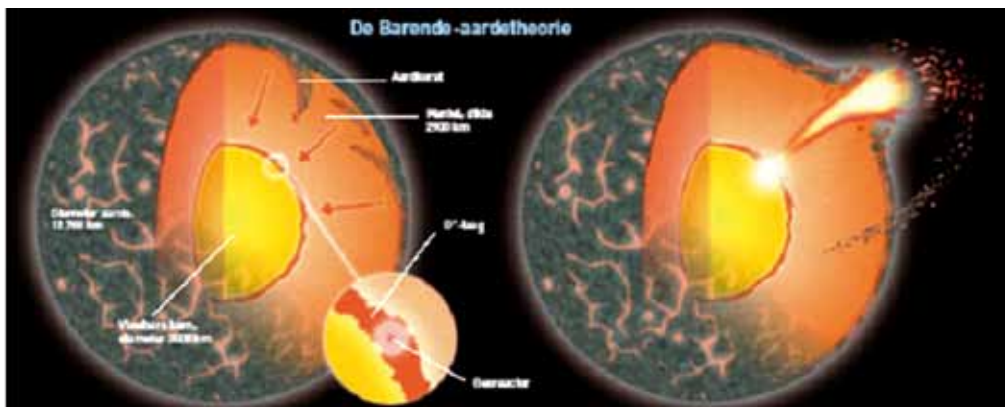
kern/mantelgrens ten tijde van het ontstaan van de Maan (ongeveer 4,5 miljard jaar geleden) zo'n 210 microgram per kilogram uraan bevatte, 400 microgram per kilogram thorium en 0.8 microgram per kilogram plutonium.



Afb. 5. Recente schattingen van de geochemische samenstelling van de aardkorst, aardmantel en kern/mantelgrens voor een reeks magmatische elementen waaronder uraan en thorium.

Uit de resultaten van hogedruk-experimenten weten we dat de mineralogie van de ondermantel van de Aarde relatief eenvoudig is. Magnesiumrijke perovskiet (mineraalformule $MgSiO_3$) en ferroperviklaas (MgO) vormen samen 95% van alle mineralen in de ondermantel. De resterende 5% bestaat uit calciumperovskiet ($CaSiO_3$). Dit is het enige mineraal in de ondermantel waarin uraan- en thoriumatomen relatief gemakkelijk ingebouwd kunnen worden. Experimenten lijken aan te tonen dat alle uraan en thorium in dit éne mineraal gaan zitten, wat leidt tot een extra concentratiestap. We kunnen uitrekenen dat calciumperovskiet ten tijde van de Maanvorming per kilogram gemiddeld ongeveer 4 milligram uraan, 8 milligram thorium en 19 microgram plutonium bevatte. Dit is slechts een factor 15 minder dan nodig is om een kernreactor te starten. Omdat zelfs vandaag de dag de KMG nog heel erg inhomogeen is (zoals afgeleid uit de interpretatie van diepe aardbevingsgolven), is dit een kleine, maar wel extra factor. Onze berekeningen laten zien dat het ontstaan van georeactoren op de KMG op deze manier mogelijk is. Ook blijkt dat eenmaal opgestarte reactoren zelf voldoende brandstof genereren (uit splijtingsproducten van uraan en thorium) om zichzelf aan de gang te houden. Samen met reactorfysicus Walter Seifritz (Zwitserland) hebben we berekend dat een opholslaande kernreactor op de KMG met een diameter van ongeveer 120 kilometer, in een tijdbestek van milliseconden een hoeveelheid energie van 0.5×10^{30} J kan leveren. In deze korte tijd stijgt de temperatuur van het omliggende materiaal enorm, waardoor het gesteente plaatselijk gasvormig wordt. De opwaartse druk van dit materiaal zorgt voor een beweging richting aardoppervlak. In drie minuten tijd kan een hoeveelheid materiaal gelijk aan de massa van de Maan de mantel en korst doorkruisen en in een baan rond de Aarde worden gebracht (afb. 6). In onze hypothese vormt dit Aardse materiaal daarna in korte tijd de Maan.

Wij kunnen ons goed voorstellen dat deze hypothese u hoogst ongeloofwaardig in de oren klinkt. In onze ogen is het opholslaan van een natuurlijke kernreactor echter de enige bekende bron van energie die in een zeer korte tijd de 0.5×10^{30} J kan



Afb. 6. Een schets van onze alternatieve hypothese voor het ontstaan van de Maan.

leveren die nodig is om Aards materiaal ter grootte van de Maan in een baan om de Aarde te brengen, waarbij de Maan en de mantel van de Aarde nagenoeg identiek van samenstelling zijn. We merken hierbij op dat onze hypothese in principe beter toetsbaar is dan de 'grote botsers' hypothese, omdat het mogelijk is dat een klein deel van de splijtproducten van de georeactor terecht gekomen is in het inwendige van de Maan. Opnieuw zullen de isotopenverhoudingen een belangrijke rol gaan spelen en zijn de aanwezigheid en gehalten van specifieke helium- en xenon-isotopen indicatoren voor de georeactor. Toekomstige Maanmissies die gesteenten uit het inwendige van de Maan terugbrengen naar de Aarde (het Maanoppervlak is 'vervuild' door de zonnwind en kan daarom niet als goede test voor onze hypothese dienen) zouden dus belangrijke gegevens kunnen opleveren over de waarschijnlijkheid van onze alternatieve hypothese voor het ontstaan van de Maan.

Naschrift

Het Maanonderzoek aan de Vrije Universiteit wordt gefinancierd

de bron voor afb. 6.

Dit onderwerp past ook binnen het onderzoeksgebied van de Stichting Earth Antineutrino Tomography (EARTH) die de radiogene warmtebronnen in het inwendige van de Aarde in kaart wil brengen – zie www.geoneutrino.nl.

Referenties

- Canup, R.M., 2008. Lunar forming collisions with pre-impact rotation. *Icarus*, 196, 518-538.
- Darwin, G.H., 1879. On the bodily tides of viscous and semi-elastic spheroids, and on the ocean tides upon a yielding nucleus. *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, 170, 1-35.
- De Meijer R.J., Van Westrenen, W., 2008. Assessing the feasibility and consequences of nuclear georeactors in the Earth's core-mantle boundary region. *South Afr. J. Sci.*, 104, 111-118.
- Wise, D.U., 1963. An origin of the Moon by Fission during Formation of the Earth's Core. *Journal of Geophysical Research*, 68, 1547-1554.

Zojuist verschenen...

De fossiele schelpen van de Nederlandse kust.

Redactie: F.P. Wesselingh en P.W. Moerdijk; afbeeldingen: G.A. Peeters en L. van der Slik; 17 auteurs, w.o. P.W. Moerdijk, A.W. Janssen. Uitgegeven door het Nederlands Centrum voor Biodiversiteit Naturalis, als tweede deel van de serie Geologie van Nederland. Distributie KNNV Uitgeverij, Postbus 310, 3700 AH Zeist, info@knnvuitgeverij.nl, en de boekhandel. Het formaat is 21,5 x 27,5 cm, de omvang 332 pagina's. ISBN

978-90-5011-342-7.

Het boek bevat 576 figuren, vanaf fig. 46 zijn dit fijne potloodtekeningen van de schelpen aan zowel binnen- als buitenzijde. De samenstellers hebben er 10 jaar aan gewerkt, voortbordurend op vroegere uitgaven zoals *De Fossielenatlas*. De moderne classificatie is hierbij gevolgd.

Het boek omvat de Keverslakken, Tweekleppigen en Stoottanden.

Wij komen op dit standaardwerk voor een belangrijk deel van de Nederlandse paleontologie in de volgende Gea uitgebreid terug.