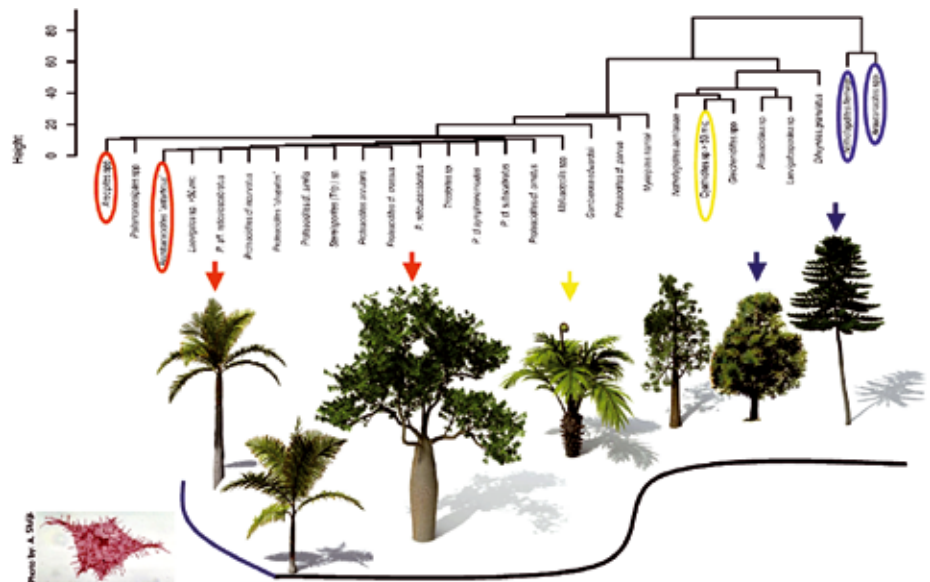


## Vervolgonderzoek

Op dit moment zijn we bezig met de analyse van de Oligocene boorkernen. Daarbij zoeken we een antwoord op de vraag hoe (het leven in) de Zuidelijke Oceaan reageert op het plotselinge verschijnen van de Antarctische ijskap. Daarbij is het de vraag hoe snel het ecosysteem zich heeft aangepast op de snelle 'bevrozing' van zijn omgeving. Dit kan ook meer inzicht geven in de ecosystemeveranderingen in onze tijd, als gevolg van het opwarmen van de aarde.

De Nederlandse bijdrage aan het oceaanoorprogramma IODP, mijn participatie en het vervolgonderzoek worden mede gefinancierd door het Nederlands instituut voor Wetenschappelijk Onderzoek NWO.



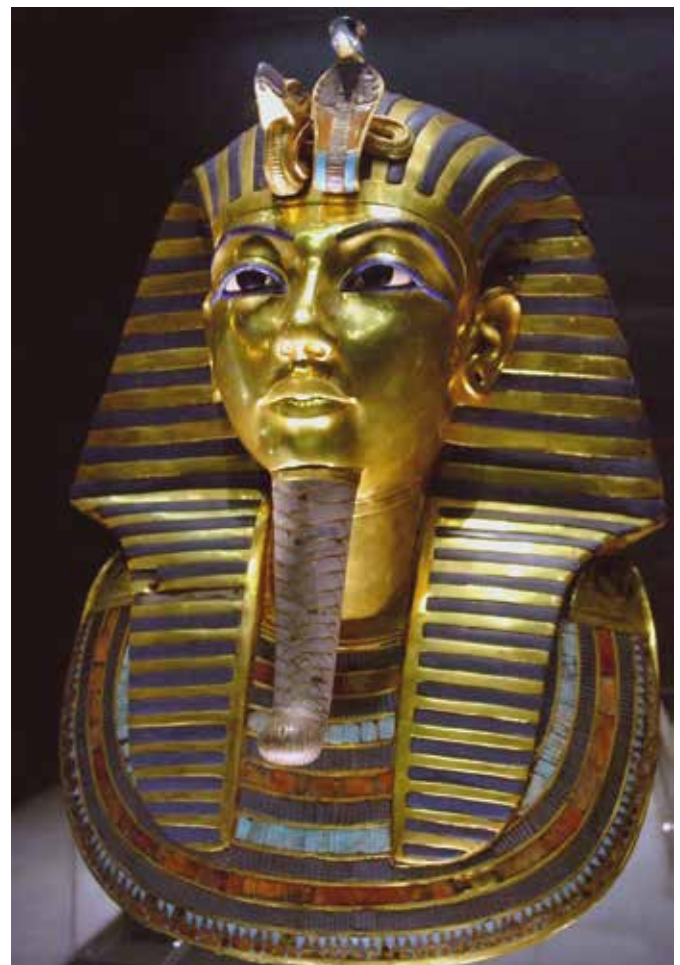
Afb. 6. (Sub-)tropische vegetatietypes op Antarctica tijdens het Vroeg-Eoceen op basis van stuifmeelkorrels die via rivieren vanaf het Antarctische vasteland in zee zijn gespeld. Bron: Joerg Pross en Lineth Contreras, Frankfurt Universität.

## De oorsprong van goud

door A.J. (Tom) van Loon

Geologisch Instituut Adam Mickiewicz University, Poznan, Polen  
e-mail: tom.van.loon@wxs.nl; tvanloon@amu.edu.pl

Al sinds de oudheid wordt goud herkend als een waardevol element, deels omdat het zo'n zeldzaam element op aarde is, deels omdat er prachtige sieraden en andere mooie objecten van te maken zijn en het metaal zo goed bewerkbaar is. Een indrukwekkend voorbeeld is het dodenmasker van Toet-ankh-Amon, de Egyptische farao die in de 14e eeuw v.Chr. leefde (afb.1). Goud is in zeer lage concentraties in de aardkorst aanwezig zodat het slechts loont dit metaal in *placers* en goudaders te exploiteren. *Placers* zijn niets anders dan afzettingen waarin zware deeltjes zijn geconcentreerd, bijvoorbeeld in de geul van een rivier waarin door erosie goudaders tevoorschijn zijn gekomen. Goud is daar soms aanwezig in de vorm van *nuggets* (afb. 2). Omdat het in *placers* gewonnen goud afkomstig is uit geërodeerde goudaders, is het gedolven goud uiteindelijk vrijwel helemaal afkomstig uit goudaders. Het ontstaan daarvan is bekend: wanneer magma opstijgt, probeert een deel via spleten en andere zwaktezones zover mogelijk opwaarts door te dringen. Daarbij koelt het af, waarbij steeds meer mineralen uitkristalliseren. Daardoor wordt het in de aardkorst binnendringende materiaal steeds armer aan elementen, totdat uiteindelijk een soort waterige oplossing overblijft waaruit alleen nog kwarts kan neerslaan (kwartsaders). In die kwartsaders zitten de laatste restjes van elementen die geen of niet gemakkelijk kristallen vormen. Daartoe behoort goud (afb. 3). Omdat kwartsaders vaak dun zijn en verspreid voorkomen, moeten grote hoeveelheden gesteente verwerkt worden om daaruit het goud te kunnen isoleren. Dat resulteert in gigantische mijnen (afb. 4). Het meeste goud wordt inmiddels echter ondergronds gewonnen. Dit met zoveel moeite gewonnen goud wordt uiteindelijk voor een zeer groot deel als 'onderpand' voor papiergeld door overheden in de vorm van 'broodjes' veilig in kluizen opgeslagen (afb. 5).



Afb. 1. Het dodenmasker van farao Toet-ankh-Amon in het Egyptisch Museum te Cairo is rijkelijk ingelegd met goud. Foto: Bjørn Christian Tørrissen.





Afb. 2. De Washington-nugget, een van de grootste nuggets die in de laatste eeuw is gevonden. Dat gebeurde overigens niet bij Washington, maar bij Nevada City in Californië. De nugget weegt 2,49 kg en werd in 2012 geveild voor 460.000 dollar.



Afb. 3. Kwartsader met gedegen goud in de Campanillas-mijn (Ecuador). Foto: L. Fontboté, Universiteit van Genève.

Hoe komt goud eigenlijk in magma terecht? Dat is een vraag die niet door geologen beantwoord kan worden omdat dit te maken heeft met het ontstaan van de aarde. Het is eerder een zaak van astronomen, maar ook zij hebben deze vraag nooit afdoende kunnen beantwoorden omdat er een fundamenteel probleem bestond. Dit probleem lijkt inmiddels te zijn opgelost, en - zoals wel vaker - de oplossing lijkt achteraf niet eens zo bijzonder. "Ik had het zelf kunnen bedenken ...", is de eerste reactie, maar niemand bedacht het. Totdat een groep astronomen onlangs een verschijnsel waarnam en daarbij een oplossing voor het 'goudprobleem' vond.

### Het ontstaan van de chemische elementen

Om het goudprobleem (en de oplossing ervan) te kunnen begrijpen, is eerst enige uitleg van het ontstaan van de (chemische) elementen noodzakelijk. Uiteraard is dit ingewikkelder dan in een paar woorden kan worden uitgelegd. Ik beperk me daarom tot een sterk versimpelde weergave (die trouwens al ingewikkeld genoeg is ...).

De materie in de kosmos bestaat voor ca. 74% uit waterstof (H). Het is het meest eenvoudige chemische element, bestaande uit een kern van één proton maar zonder neutron (bij de zeldzame aanwezigheid van één of twee neutronen in de kern spreekt men van, respectievelijk, deuterium en tritium). Omdat een proton positief is geladen en waterstof neutraal is, 'vliegt' één elektrisch negatief geladen deeltje om de kern: een elektron. Naast waterstof bestaat de materie in de kosmos vooral uit helium. Dit na waterstof meest simpele element bevat twee protonen in de kern en twee neutronen (uiterst zelden één neutron) en dus ook

twee elektronen 'in een baan om de kern'. Helium maakt 24% van de materie in de kosmos uit. Voor alle overige elementen blijft dus slechts zo'n 2% over. Die 2% is sterk geconcentreerd in de zonnestelsels.



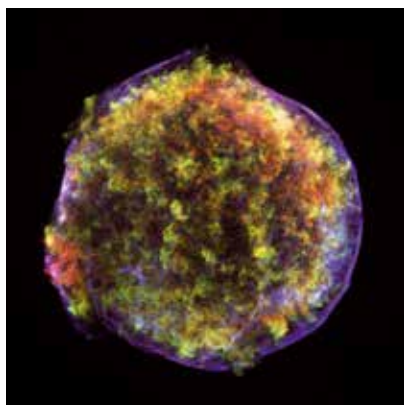
Afb. 4. De gigantische Round Mountain goudmijn in Nevada, VS. Foto: Patric Huber.

Het ontstaan van zonnestelsels is inmiddels redelijk duidelijk. Door de aantrekkingskracht vormen zich clusters van kosmisch materiaal. Hoe groter de cluster, hoe sterker de aantrekkingskracht. Zo ontstaan uiteindelijk zulke grote concentraties, dat het materiaal zich tot een - ruimtelijk gezien - relatief kleine bol omvormt, die op den duur een zon wordt. In het binnenste van die bollen is de druk zo hoog dat waterstofatomen fuseren tot helium, waarbij energie vrijkomt: de zonnearmte. Door verdergaande fusieprocessen worden echter ook zwaardere elementen gevormd. Hoe zwaarder die elementen zijn, hoe meer ze naar de kern zakken. Zo ontstaat op den duur een kern van ijzer. Zouden er echter zwaardere elementen in de kern terecht komen, dan zou die kern vanwege fysische oorzaken (tegendruk bij fusie) gaan uitzetten, waardoor geen zware elementen meer gevormd zouden kunnen worden. IJzer, een element met een kern met 'slechts' 26 protonen, blijft zo het zwaarste element in een zon. Hoe de eindfase van een zon verloopt, hangt af van zijn grootte. In sommige gevallen zet de zon eerst uit om daarna te imploderen tot een neutronenster. We kennen dat verschijnsel als een supernova (afb. 6). Daarbij komen enorme hoeveelheden energie vrij, waarbij ook zwaardere elementen dan ijzer worden



Afb. 5. 'Broodjes' goud in Fort Knox, een legerpost in de staat Kentucky, VS.





Afb. 6. De Tycho Brahe supernova, vernoemd naar de Deense astronoom die dit verschijnsel in 1572 waarnam. Foto: NASA.

'gloed' van infrarood licht (duidend op de vorming van zware radioactieve elementen) bleef enkele dagen zichtbaar. Volgens de onderzoekers maakt de aard van de gloed het waarschijnlijk dat bij de botsing van de neutronensterren zware elementen werden gevormd, inclusief goud.

gevormd. Bij het ontstaan van een supernova worden grote hoeveelheden materiaal de kosmos in geslingerd, maar stort de zon geheel ineen. Afhankelijk van de grootte van de zon ontstaat dan een geconcentreerde massa, bijvoorbeeld een witte dwerg (lichte zon), een zwart gat (zeer zware zon) of een neutronenster (bij een enkele malen grotere zon dan de onze). Een neutronenster is zodanig geconcentreerd (de hoeveelheid die op één theelepel past zou ongeveer een miljard ton wegen) dat er geen sprake meer kan zijn van protonen en elektronen: alle massa is aanwezig als neutronen (een neutron kan worden beschouwd als het fusieproduct van een proton en een elektron) die samen als het ware één kern vormen.

Alle rampen die mogelijk zijn, zullen ooit gebeuren, als er maar voldoende tijd is. Dat geldt ook voor de kosmos. En zo kan het gebeuren dat twee neutronensterren met elkaar in botsing komen (afb. 7). Het is nauwelijks voor te stellen wat er dan aan energie vrijkomt. Astronomen herkennen zo'n gebeurtenis als een *gamma-ray burst* (GRB): een uitbarsting van gammastraling. Maar wat heeft dit nu met de vorming van goud te maken?

### Tienmaal de maanmassa in goud

Op 3 juni vorig jaar namen astronomen van het Smithsonian Astrophysical Observatory en het Harvard College Observatory een GRB (nr. 130603B) waar. De uitbarsting, die plaats vond op een afstand van 3,9 miljard lichtjaar van de aarde, duurde nog geen tweederde van een seconde, maar de resulterende



Afb. 7. Impressie van de botsing tussen twee neutronensterren. Illustratie: Dana Berry, SkyWorks Digital, Inc.



Afb. 8. Etalage op de goudmarkt in Dubai: hier is alles goud wat er blinkt. Foto: Tom van Loon.

De botsing tussen de twee onvoorstelbaar grote massa's materie leverde uiteraard niet zo maar wat goud op. De onderzoekers schatten de gevormde hoeveelheid op tienmaal de massa van onze maan. De waarde daarvan zou bij de huidige goudprijs zo'n  $10^{28}$  euro bedragen. Wie praat er nog over bezuinigen?

De Amerikaanse astronomen hebben de hoeveelheid goud die bij deze botsing werd gevormd geschat en vermenigvuldigden dit met het (geschatte) aantal GRB's dat in de loop van de geschiedenis van het heelal plaatsvond. Ze concludeerden dat al het (al met al relatief toch zeer zeldzame) goud in de kosmos waarschijnlijk van GRB's afkomstig is.

Planeten zoals de aarde ontstaan doordat, bij de vorming van een zonnestelsel, materiaal uit de kosmos in banen om een zon wordt geconcentreerd, en zich daar geleidelijk omvormt tot planeten. Het goud dat wij op aarde vinden, moet ook op deze wijze in de aarde zijn beland. Om vervolgens, dankzij vulkanische/magmatische processen, voor een deel in de aardkorst terecht te zijn gekomen. Met deze kennis in gedachten maakt het een gouden sieraad nóg exclusiever (afb. 8). Want al het goud maakte ooit deel uit van een neutronenster en is ontstaan bij wat wel als het meest catastrofale ongeval in de kosmos kan worden beschouwd.

### Referentie

Berger, E., Fong, W. & Chornock, R., 2013. Smoking gun or smoldering embers? An r-process kilonova associated with the short-hard GRB 130603B. *Astrophysical Journal Letters* (preview), 5 pp