


Van Halley tot lunar ranging

De geschiedenis van onze dubbelplaneet (1)



Na bestudering van oude waarnemingen van zons- en maansverduisteringen kwam de Engelse sterrenkundige Edmond Halley tot de conclusie dat de maand in de loop van de tijd korter wordt, met andere woorden dat de maand dichter bij de aarde komt. We weten tegenwoordig dat deze conclusie fout is. Met een simpel model voor de dubbelplaneet aarde-maan is een mogelijke verklaring voor Halley's fout te geven. Hetzelfde model kan worden gebruikt om de geschiedenis van de baan van de maand om de aarde te berekenen, met het verrassende – maar onjuiste – resultaat dat de maand minder dan 1,5 miljard jaar geleden vlak bij de aarde zou hebben gestaan. Op zo'n korte afstand hebben de getijdenkrachten van de maand een catastrofale uitwerking op de aardkorst, maar hiervan is in de oudste aardse gesteenten niets terug te vinden. Blijkbaar is er iets mis met het model!

Frank Verbunt
Sterrenkundig Instituut Universiteit Utrecht

Collage van aarde en maand, gebaseerd op opnamen die de ruimtesonde Galileo heeft gemaakt. (Foto: NASA)

En als een nieuwsgierige reiziger of een aldaar wonende koopman zo vriendelijk zou zijn om, met de nodige zorg, de fases waar te nemen van de maansverduisteringen te Bagdad, Aleppo en Alexandrië, om daarmee hun geografische lengten te bepalen, dan zouden zij de wetenschap van de sterrenkunde geen grotere

dienst kunnen bewijzen: want in en nabij deze plaatsen zijn alle waarnemingen gedaan waarmee de gemiddelde bewegingen van de maand begrensd worden: en ik zou dan kunnen zeggen in welke mate de beweging van de maand versnelt; want dat dat zo is meen ik te kunnen bewijzen, en zal ik (zo God het wil) ooit openbaar maken.'

Deze zinnen schreef Edmond Halley, de beroemde Engelse sterrenkundige en tijdgenoot van Newton, aan het einde van een artikel dat hij in 1695 publiceerde in het november/december-nummer van de *Philosophical Transactions* ('Filosofische Verhandelingen'), het tijdschrift van de Britse Royal Society dat, zoals de omslag ver-



De Engelse sterrenkundige Edmond Halley.

meldt, 'verslag doet van de huidige activiteiten, studies, en werkzaamheden van de ingenieuze mensen in vele belangrijke gebieden van de wereld'.

Halley lijkt hier te zeggen dat de snelheid waarmee de maan langs de hemel beweegt in de loop van de tijd toeneemt (namelijk over een interval van ongeveer achthonderd jaar tussen de waarnemingen van Arabische sterrenkundigen en de tijd van Halley zelf). Als de maan sneller langs de hemel beweegt, is ze ook sneller rond: Halley denkt dus dat de maand korter wordt. Ook Alan Cook, in zijn in 1998 verschenen biografie van Halley, en Anton Pannekoek, in zijn in 1951 gepubliceerde geschiedenis van de sterrenkunde (*De groei van ons wereldbeeld*), geven deze interpretatie. Ze vermelden tevens dat Laplace de versnelling van de maan kon verklaren uit de invloed van de zon, en dat Adams liet zien dat de berekening van Laplace niet deugt.

Hoe Halley precies tot zijn uitspraak kwam is niet zeker, omdat hij de details van zijn redenering nooit heeft gepubliceerd. De verwijzing naar de waarnemingen te Bagdad, Aleppo en Alexandrië is echter duidelijk: het betreft hier de waarnemingen van zons- en maansverduisteringen door de Arabische sterrenkundige al-Battani (858-929), door Halley aangeduid met zijn Latijnse naam Albategnius, achthonderd jaar vóór de tijd van Halley, en door Ptolemaeus, nog eens zevenhonderd jaar eerder. De waarnemingen van al-Battani werden door Halley beproven in een eerder artikel in de *Philosophical Transactions* (oktober 1693). Hierin merkte Halley op dat de persoon die de eerdere vertaling uit het Arabisch naar het Latijn had gemaakt 'niet voldoende kennis van

de taal had en ook niet was onder-richt in de sterrenkunde'. Daarom maakte hij – samen met een arabist uit Oxford – een nieuwe vertaling. Zons- en maansverduisteringen Een zonsverduistering treedt op als de maan precies tussen de zon en de aarde instaat; een maansverduistering als de aarde tussen de maan en de zon in staat. Er zit daarom altijd een heel aantal maanden tussen twee zonsverduisteringen of tussen twee maansverduisteringen. Halley wist nauwkeurig hoe lang een maand duurt, en kon dus uitrekenen op welke data en waar al-Battani zonsverduisteringen had kunnen waarnemen.

Stel dat Halley in 1695 het tijdstip van een eclips berekende die achthonderd jaar eerder was opgetreden en daarbij vond dat op het moment van die eclips de stad Alexandrië (in Egypte) precies tussen de centra van de aarde en de maan zou liggen. Dan betekent dit dat men die eclips in Alexandrië had moeten zien. Nu blijkt echter dat al-Battani meldt dat de eclips van die dag in Bagdad, vijftien graden ten oosten van Alexandrië, is gezien! Halley wist natuurlijk dat Bagdad door de rotatie van de aarde een uur eerder op de lijn tussen zon en maan kwam dan Alexandrië. Blijkbaar geschiedde de eclips dus een uur eerder dan hij had berekend... Halley concludeert hieruit dat hij de gemiddelde lengte van een maand te kort heeft genomen; omdat hij zeker is van de lengte van de maand in zijn tijd, besluit hij dat de maand vroeger langer moet zijn geweest.

Het aarde-maan systeem

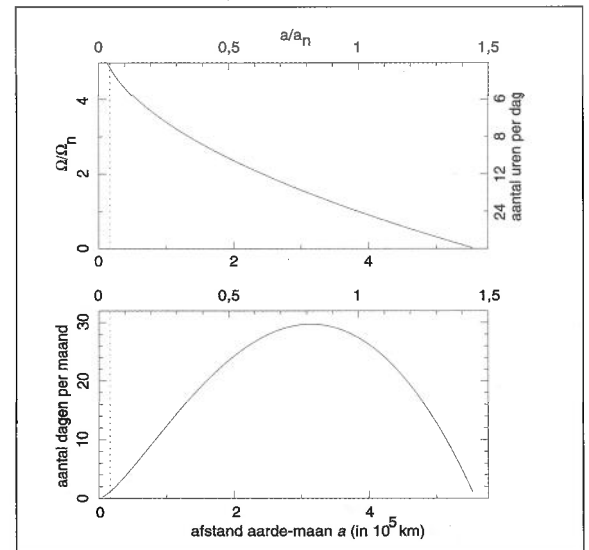
Om te kunnen inzien wat er mis is met Halley's redenering maken we een eenvoudig model voor de dubbelplaneet aarde-maan. In dit model draaien de aarde en de maan in een cirkelbaan om elkaar (revolutie), en bovendien elk om de eigen as (rotatie). We verwaarlozen de invloed op het aarde-maansysteem van de zon en van de andere planeten.

Een belangrijke natuurkundige wet vertelt ons dan dat het impulsmoment van het aarde-maansysteem behouden blijft, ruw gezegd dat de hoeveelheid draaiing behouden blijft. De hoeveelheid draaiing van een tweetal hemellichamen dat om elkaar draait is opgebouwd uit de beweging van de lichamen in hun baan (het baanimpulsmoment) en de draaiing van beide lichamen om

hun eigen as (het draai-impulsmoment). Omdat de maan veel kleiner en lichter is dan de aarde, is het draai-impulsmoment van de maan verwaarloosbaar.

Het behoud van impulsmoment in het aarde-maansysteem heeft tot gevolg dat de afstand tussen de aarde en de maan toeneemt als de aarde langzamer zou gaan roteren, en omgekeerd dat de afstand tot de maan afneemt als de aarde sneller gaat roteren. Er is dus een eenduidig verband tussen de rotatiesnelheid van de aarde en de afstand tot de maan, uitgaande van de huidige situatie (fig. 1). De aarde zou ruim twee keer zo snel roteren als we de maan – met behoud van impulsmoment – op de halve afstand zouden kunnen zetten. Indien we de lengte van de dag uitdrukken in onveranderlijke uren van 3600 seconden – dat wil zeggen seconden gemeten met een atoomklok – heeft de dag dan minder dan twaalf uren!

Als de afstand tot de maan groter is, is de tijd die de maan nodig heeft om haar rondje om de aarde te draaien langer, d.w.z. de maand is langer. Dit volgt uit de wet van de zwaartekracht, en wordt wel de derde wet van Kepler genoemd. Met het verband tussen de afstand tot de maan en de lengte van de dag kunnen we zo het *aantal dagen per maand* uitrekenen voor elke onderlinge afstand tussen



1. Boven: de rotatiesnelheid van de aarde (gedeeld door de rotatiesnelheid nu, d.w.z. een 2 betekent dat de aarde twee maal zo snel draaide) als functie van de afstand tussen aarde en maan a (in eenheden van honderdduizend kilometer). Rechts is het bijbehorende aantal uren per dag weer gegeven. De schaalverdeling aan de onderkant geeft de afstand in eenheden van honderdduizend kilometer, aan de bovenkant de afstand gedeeld door de afstand nu. De verticale stippellijn geeft de afstand waarop de aarde de maan zou vernietigen, de 'Roche-limiet'. Onder: het aantal dagen per maand. Voor de berekening is een cirkelvormige baan aangenomen.

aarde en maan (fig. 1). Dan blijkt dat het aantal dagen per maand het grootst is als de afstand tussen aarde en maan ongeveer 82% van de huidige afstand is, oftewel 314.000 km. Voor grotere en kleinere afstanden is het aantal dagen per maand kleiner. Meer specifiek is het zo dat het aantal dagen per maand, uitgaande van de huidige situatie, kleiner wordt als de afstand tot de maan zou toenemen.

Nu weten we uit recente metingen dat de afstand tot de maan inderdaad groter wordt en dus neemt het aantal dagen per maand af. Halley vond uit zijn beschouwing van de eclipsen van al-Battani dat de maand *gemeten in dagen* in zijn eigen tijd korter was dan ten tijde van al-Battani. Dat is een correcte conclusie. Halley wist echter niet dat de dag langer wordt, en dus concludeerde hij ten onrechte dat de maand korter wordt!

De geschiedenis van de maanbaan

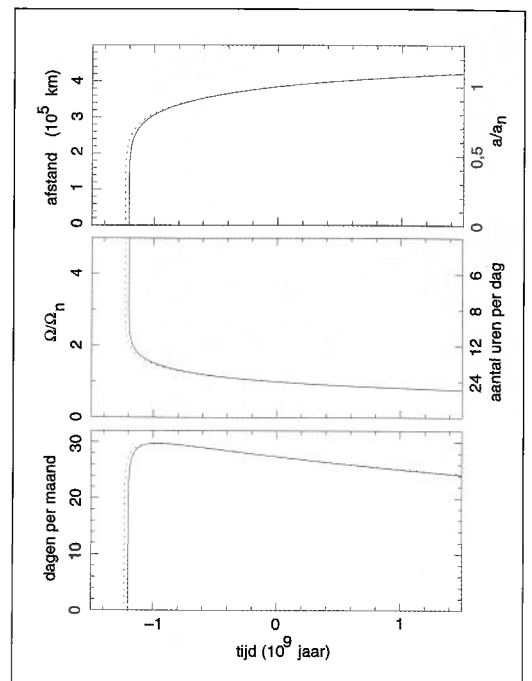
In figuur 1 zien we dat dag en maand precies even lang zouden duren als de aarde en de maan vlakbij elkaar staan, op ongeveer 14.600 km. Maar is dat ook echt ooit het geval geweest? Om deze vraag te kunnen beantwoorden, moeten we de getijdentheorie bestuderen. We doen dat in de eenvoudige vorm die George Darwin (1845-1912), de zoon van de bioloog Charles Darwin, aan de theorie gaf.

Door de aantrekkingskracht van de maan wordt onze planeet enigszins vervormd en zijn er twee getijdenbergen op de aarde. Als de aarde en de maan stil zouden staan, zou de aarde precies in de richtingen naar de maan toe en van de maan af zijn uitgerekt (en zo staat het ook in vrijwel alle boekjes getekend).

Maar de aarde draait! Het gevolg is dat de uitstulping door de aantrekkingskracht van de maan in een andere richting wijst: omdat de dag korter is dan de maand loopt de uitstulping iets voor op de maan, zoals getekend in figuur 2 (en zijn de tekeningen in al die boekjes dus fout!). Darwin nam aan dat de hoek tussen de lange as van het ei en de richting naar de maan (de twee streepjeslijnen in de figuur) constant is. De aantrekkingskracht van de maan zal de getijdenberg die het dichtst bij de maan is proberen terug te trekken, en de andere proberen vooruit te trekken. De zwaartekracht op de dichtstbijzijnde getijdenberg is groter, en dus remt de maan de rotatie van de aarde af. En, zoals we eerder zagen, leidt het behoud van impulsmoment er toe dat de afstand tussen aarde en maan dan groter wordt.

Hoe snel dit gebeurt, is niet meteen uit de theorie van Darwin af te leiden; als we echter weten hoe snel de verandering nu is, geeft de theorie de snelheid van verandering in toekomst en verleden. Het komt dus goed van pas dat met behulp van lasers de snelheid wordt gemeten waarmee de maan zich van de aarde verwijdert.

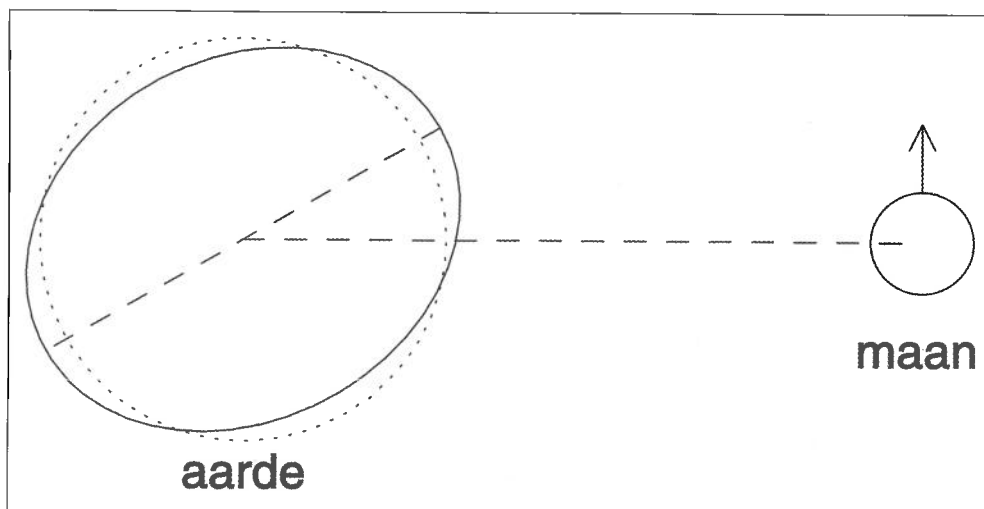
De astronauten die met Apollo 11, 14 en 15 op de maan zijn geland, hebben daar spiegels achtergelaten. Een vierde spiegel is met de Sovjet-Russische Loenochod 2 op de maan

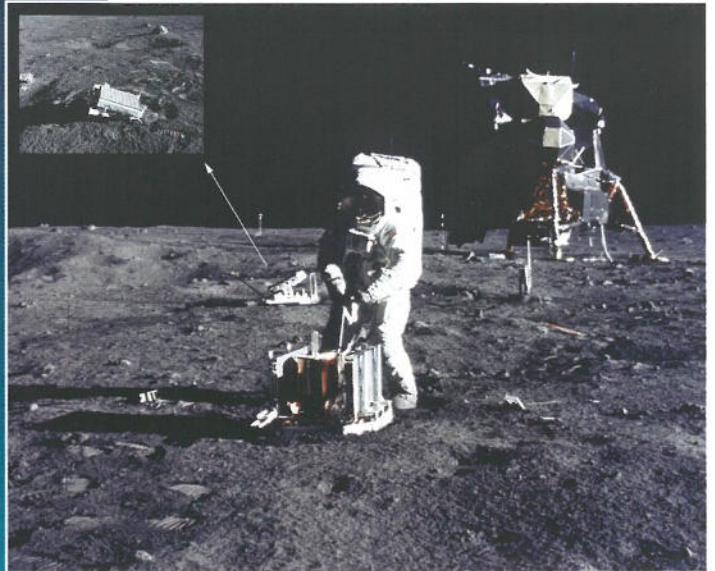


3. De verandering in de afstand tot de maan (boven), in de rotatiesnelheid van de aarde (midden) en in het aantal dagen per maand (onder), in het model van George Darwin. De getrokken lijnen zijn voor eenvoudige berekeningen met een cirkelvormige baan; de stipellijnen voor berekeningen waarin met de excentriciteit van de aardbaan wordt rekening gehouden.

gezet. Vanuit drie observatoria – in Arizona, op Hawaï en in Frankrijk – worden pulsen laserlicht naar de maan gestuurd. Van elke miljard fotonen die vanaf de aarde worden uitgezonden treft er maar één de spiegels. Van elke miljard teruggekaatste fotonen treft er maar één de telescoop op aarde. Bovendien worden niet alle fotonen die de spiegels op de maan treffen teruggekaast, en worden niet alle fotonen die de telescoop treffen ook daadwerkelijk gedetecteerd. Het resultaat is dat er honderd laserpulsen van 10^{19} fotonen moeten worden uitgezonden voordat er één enkel foton wordt gedetecteerd... Het is dan ook een fantastische technische prestatie dat de verandering van de afstand van de maan met deze methode is gemeten: elk jaar verwijdert de maan zich gemiddeld 3,82 centimeter van de aarde. Als we met dit gegeven de getijdentheorie van Darwin gebruiken om terug te gaan in de tijd, vinden we de in figuur 3 weergegeven resultaten. De aarde roteerde vroeger sneller, en de maan stond dichterbij de aarde. Bij een kleinere af-

2. De getijdenbergen die de aantrekkingskracht van de maan op aarde veroorzaakt zijn niet precies naar de maan gericht, maar lopen in het model van George Darwin iets voor op de baanbeweging van de maan. De tekening is niet op schaal.





Op de maan staan laserreflectoren die daar onder andere door Apollo-astro-nauten zijn neergezet (boven). Door vanaf de aarde laserbundels op de maan te richten (links), en te meten hoe lang het duurt voor er weerkaatste fotonen terugkomen, kan de afstand tot de maan voortdurend nauwkeurig worden gemeten. (Foto's: NASA)

stand is het effect van de getijdenkrachten veel groter, en veranderen rotatie en maansafstand veel sneller. Naarmate we verder teruggaan in de tijd, vinden we daardoor een steeds snellere verandering: een miljard jaar geleden stond de maan vijftien procent dichterbij en roteerde de aarde vijftig procent sneller. Maar minder dan een kwart miljard jaar extra geleden was de afstand tot de maan minder dan vier procent van de huidige afstand, en duurden de maand en de dag even lang, namelijk vijf uur. In de tijd van George Darwin trok men hieruit de conclusie dat de maan zich in een ver verleden heeft losgescheurd uit de aarde. De enorme getijdenkrachten zouden ervoor hebben gezorgd dat de aarde snel haar aanvankelijk enorm hoge rotatiesnelheid verloor, en de maan snel op de grote afstand duwde. Als we daarentegen vooruit rekenen naar de toekomst, blijkt dat de

veranderingen – ten gevolge van de zwakkere getijdenkrachten bij grotere afstanden – dan erg langzaam verlopen. Een van de interessante resultaten van het model is dat de excentriciteit van de aardbaan (de afwijking van een cirkelvorm) steeds groter wordt.

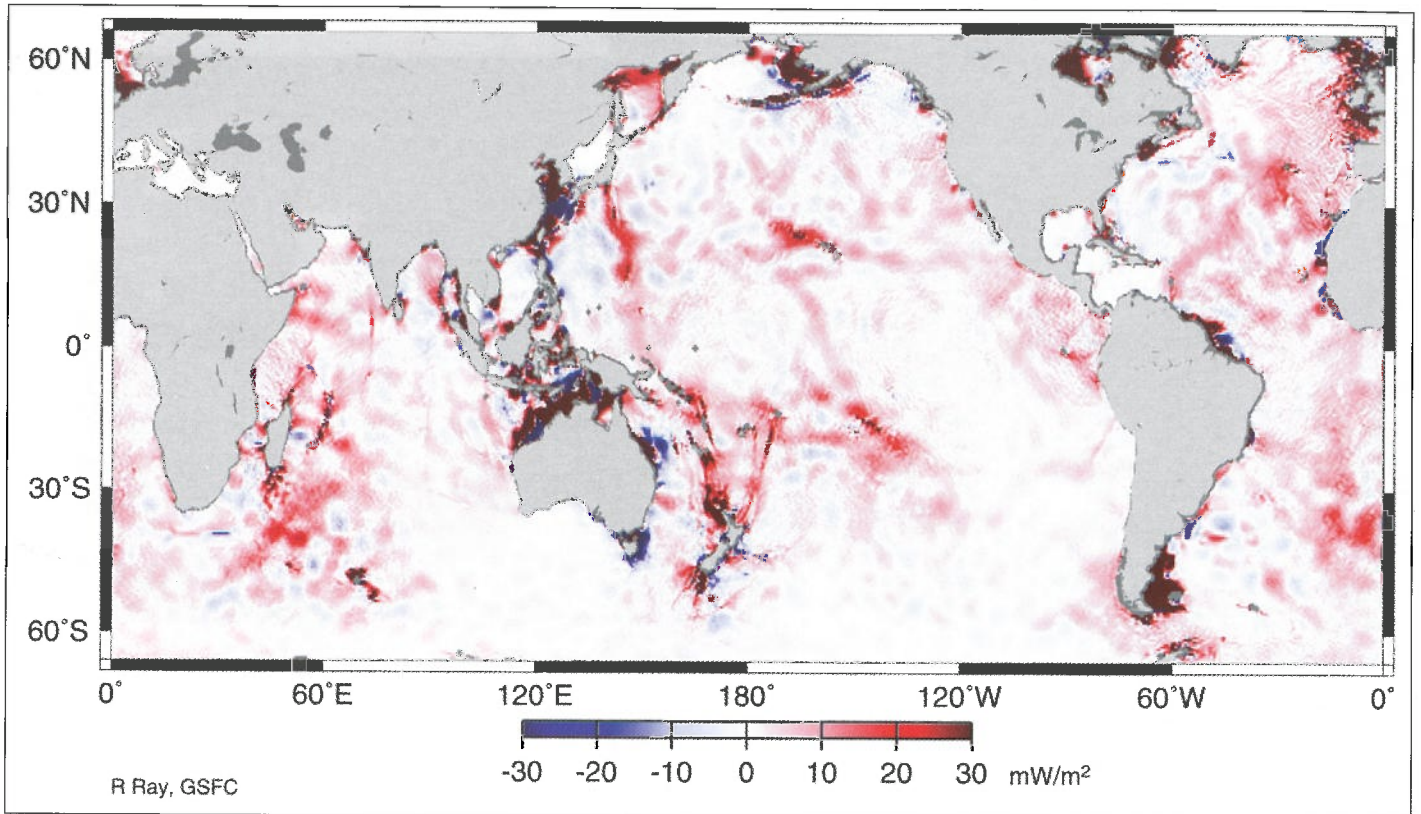
De getijdencatastrofe

De in het vorige hoofdstuk geschetste geschiedenis van de maanbaan en van de rotatie van de aarde is in grote lijnen ongetwijfeld correct, maar moet langer hebben geduurd dan 1,2 miljard jaar. De overdracht van impulsmoment van de aardrotatie naar de maanbaan gaat namelijk gepaard met omzetting van rotatie-energie van de aarde in warmte. Uit een eenvoudige berekening volgt dat er 3,5 terawatt, dat is 3,5 miljard maal een miljard watt, bewegingsenergie in warmte moet worden omgezet, of zoals de natuurkundige term luidt: gedissi-

peerd, om de maan elk jaar 3,82 cm verder van de aarde te krijgen. Het is voornamelijk de beweging van het water in de oceanen die gedissipeerd wordt; door de moderne goede metingen van oceaanstromingen weten we zelfs vrij nauwkeurig waar dit gebeurt. De meeste dissipatie vindt plaats in ondiepe zeeën nabij de kusten van Noordwest-Europa, Groenland en Labrador, Oost-China en in de zee van Timor. Ongeveer een kwart van de dissipatie gebeurt in diepe oceanen.

Die 3,5 terawatt lijkt heel veel, maar heeft op de temperatuur van de aarde een verwaarloosbaar effect: de hoeveelheid warmte die de aarde van de zon opvangt is honderdduizend keer zo groot.

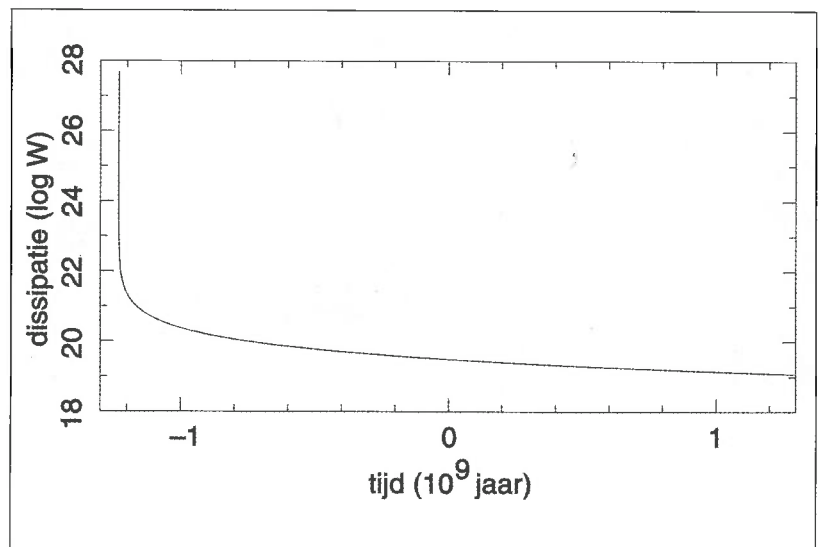
We zagen boven al dat de verandering in de maanbaan veel sneller ging toen de maan dichterbij de aarde bewoog. Dit betekent dat het tempo van de warmteontwikkeling toen ook veel groter was. Volgens het boven beschreven model zou de dissipatie van de oceaantijden 1,2 miljard jaar geleden duizend keer zo veel warmte hebben ontwikkeld als de energie die de aarde van de zon krijgt. Deze enorme energieontwikkeling zou de aard-



4. Rechts: de energie die uit wrijving in de oceanen wordt vrijgemaakt door de verandering in de afstand tot de maan, in het model van George Darwin. De verticale schaal is logaritmisch, zodat 20 staat voor een één met twintig nullen. Boven: kaart die laat zien waar die energie – door dissipatie (zie hoofdttekst) – naartoe gaat. (Ill. NASA/Richard Gray)

korst een temperatuur van ruim 1300 °C hebben gegeven, en alle gesteenten zouden zijn gesmolten. Er zijn echter op aarde gesteenten gevonden die veel ouder zijn, tot ongeveer vier miljard jaar toe. Het bestaan van deze gesteenten betekent dat het minstens vier miljard jaar geleden moet zijn dat de maan heel dicht bij de aarde stond.

Er is nog een andere manier om tot deze conclusie te komen. Net zoals de maan voor getijdenbergen op de aarde zorgt, zo zorgt de aarde voor getijdenbergen op de maan. Naarmate de maan dicht bij de



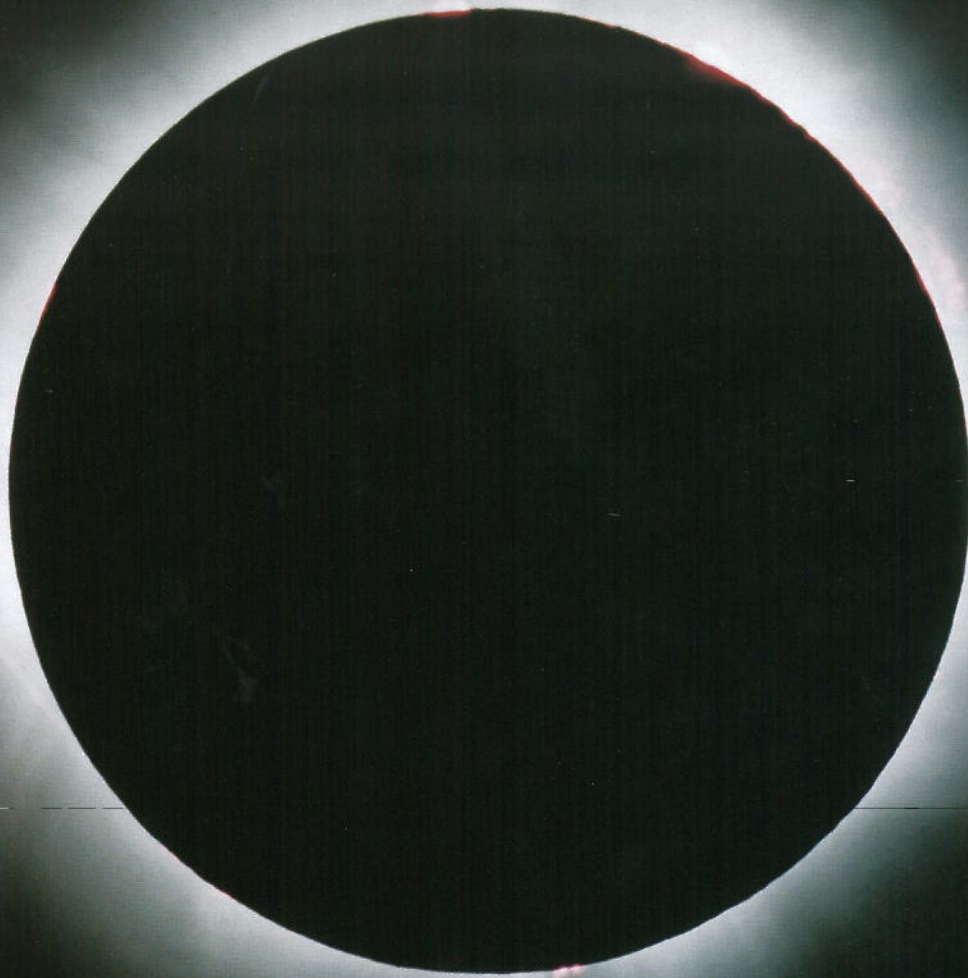
aarde komt, worden die getijdenbergen groter, en als de maan ongeveer op een twintigste van de huidige afstand zou staan (ongeveer 16.500 km van de aarde), zou de aarde de getijdenbergen zelfs

lostrekken van de maan: de maan wordt dan volledig uit elkaar getrokken. Analyse van de gesteenten van de maan, zoals verzameld door de Apollo-astronauten, laat echter zien dat de maan ongeveer 4,5 miljard jaar oud is. Het moet dus minstens 4,5 miljard jaar geleden zijn dat de maan voldoende ver van de aarde kwam om aan vernietiging te ontsnappen.

Kortom: er is iets mis met de eenvoudige versie van de getidentheorie van Darwin. Om er achter te komen wat er precies mis is, zal ik in een volgend artikel bespreken hoe metingen van de rotatie van de aarde – moderne en tot 900 miljoen jaar geleden – ons kunnen helpen het simpele model te verbeteren.

Het aarde-maanstelsel in getallen

	aarde	maan	baan
massa	5,9734 10^{24} kg	0,0735 10^{24} kg	
straal	6371 km	1738 km	
huidig impulsmoment	$0,585 \times 10^{34}$	$0,233 \times 10^{29}$	$2,85 \times 10^{34}$ kg $m^2 s^{-1}$
siderische dag:	86164,1 seconde		
siderische maand:	27,32166 dag		
afstand aarde-maan	$3,8440 \times 10^5$ km		
verandering hierin:	3,82 cm per jaar		
excentriciteit maanbaan:		0,05490	



*De totale zonsverduistering van 1999.
(Foto: Andy Benjamins, Emmen)*

Frank Verbunt
Sterrenkundig Instituut
Universiteit Utrecht

De geschiedenis van onze dubbelplaneet (2)

VLBI, zonsverduisteringen, schelpjes en modder

In het vorige artikel (Zenit april) zagen we dat het behoud van draaiing in het aarde-maansysteem – meer precies: het behoud van impulsmoment – de rotatie van de aarde om de eigen as koppelt aan de baanbeweging van de maan om de aarde. Metingen met door spiegels op de maan teruggekaatste laserstralen laten zien dat de maan zich van de aarde verwijdert met een snelheid van 3,82 cm per jaar. Uit een eenvoudige theorie volgt dan dat de maan 1,2 miljard jaar geleden zo dicht bij de aarde zou hebben gestaan dat ze door de aantrekking van de aarde in stukken zou worden gereten. In werkelijkheid is de maan minstens 4,5 miljard jaar oud... Om te zien wat er mis kan zijn met de theorie, bekijken we in dit artikel de metingen aan de rotatie van de aarde. Behalve de lengte van de dag in de laatste jaren zullen we ook onderzoeken hoe snel de aarde vroeger roteerde, zoals afgeleid uit zons- en maansverduisteringen tot 2700 jaar geleden, uit regelmatige variaties in de dikte van opeenvolgende kalklaagjes in schelpen en koralen tot 400 miljoen jaar geleden, en in de dikte van modderlaagjes in getijdenafzettingen tot 900 miljoen jaar geleden.

Vergroting van de maanbaan met 3,82 cm per jaar betekent dat de lengte van de dag elke honderd jaar ongeveer 2 milliseconde langer zou moeten worden. De rotatie van de aarde is ook gekoppeld aan de afstand tot de zon – in het eerste artikel hebben we dit verwaarloosd – maar het effect hiervan op de aardrotatie is ongeveer zeven keer kleiner. Maan en zon samen zorgen er daarom voor dat de lengte van de dag elke eeuw met 2,3 milliseconde toeneemt... Volgens de theorie, maar wat zeggen de metingen?

Moderne metingen van de aardrotatie

Door de draaiing van de aarde om haar eigen as lijken de sterren langs de hemel te bewegen. Als we de duur meten van het interval tussen twee momenten dat een ster voor de waarnemer precies in het zuiden staat (in het jargon: tussen twee zuidelijke meridiaandoorgangen) kunnen we de lengte van de dag precies bepalen. Meer algemeen kan de lengte van de dag worden bepaald uit metingen van de snelheid waarmee sterren lijken te bewegen. Hoe groter de telescoop, des te nauwkeuriger men kan meten. Alle hemelobjecten kunnen worden gebruikt, met name ook quasars, (zwarte gaten in kernen van zeer ver verwijderde sterstelsels, die heldere bronnen van radiostraling zijn). De meest nauwkeurige metingen van de daglengte voert men uit door radiotelescopie uit Europa en de Verenigde Staten als één instrument te gebruiken (Zeer Lange Basislijn Interferometrie, of VLBI) om de positie van quasars te meten. Het voordeel van zulke ver gelegen objecten is dat men geen rekening hoeft te houden met de verplaatsing van de objecten aan de hemel: die is op zo'n grote afstand verwaarloosbaar klein.

Ook de van de maan geëmitteerde laserstralen kunnen voor de meting van de lengte van een dag gebruikt worden, zij het dat men dan rekening moet houden met de beweging van de maan om de aarde. Wat men dan meet is de som van de maansbeweging en de rotatie van de aarde. Op soortgelijke wijze worden laserstralen ook van kunstmatige satellieten geëmitteerd om de lengte van de dag te bepalen.

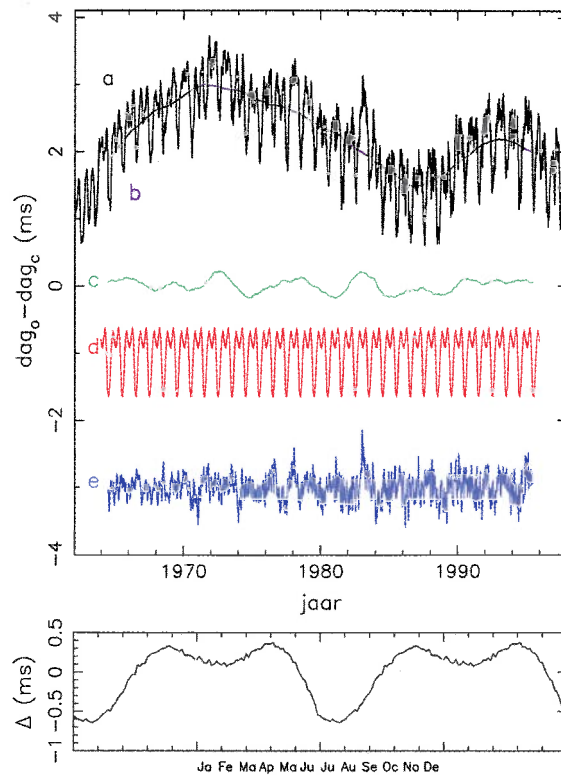
Met deze drie methoden samen is sinds 1963 nauwkeurig de rotatiesnelheid van de aarde bijgehouden. De resultaten zijn in figuur 1 te zien.

Wanneer we aannemen dat de lengte van de dag elke honderd jaar 1,7 milliseconde langer wordt, kunnen we voor elke dag uitrekenen hoe lang hij is. Het verschil met de werkelijk gemeten lengte van de dag is in figuur 1 als lijn *a* getoond. We zien dat dit verschil heel onregelmatig varieert, van iets minder dan één milliseconde tot iets meer dan drie milliseconde! (Dat het gemiddeld over de laatste twintig jaar op ongeveer twee milliseconde ligt, is het gevolg van de afspraak dat het verschil in 1820 nul was.)

Wanneer we het over vijf jaar gemiddelde verschil bekijken (lijn *b* in de figuur), zien we dat dit tussen het begin van de metingen en 1972 toenam, vervolgens daalde tot in 1986, steeg tot 1993 en daarna weer daalde. Lijn *c* laat de gemiddelde verandering van jaar tot jaar zien. Wanneer we de lange-termijntrend (b) en de verandering van jaar tot jaar (c) aftrekken van de gemeten verschillen, zien we in wat overblijft veranderingen die elk jaar hetzelfde zijn: de seizoenseffecten in lijn *d*. Die zijn uitvergroot in het aparte kader. De dan nog overblijvende verschillen zijn geheel onregelmatige veranderingen, weergegeven met lijn *e*.

Al deze veranderingen in de rotatie van de aarde verhinderen dat we uit de moderne, zeer nauwkeurige metingen de gemiddelde verandering in de aardrotatie over langere tijd kunnen afleiden. Anders gezegd: figuur 1 zou er niet erg anders hebben uitgezien als we voor het tekenen ervan hadden aangenomen dat de lengte van de dag elke honderd jaar 1,5 of 1,9 milliseconde langer wordt. Dit teleurstellende resultaat wordt echter meer dan goedge maakt door wat we allemaal wél uit deze metingen kunnen leren.

We zijn daarbij genooddaakt ons eenvoudige model van een als een enkele vaste bol draaiende aarde te laten vallen. In werkelijkheid bestaat de aarde uit verschillende delen, die elk met een eigen snelheid kunnen roteren. Van binnen naar buiten hebben we de vaste binnenkern, de vloeibare buitenkern, de halfvloeibare mantel, de vaste korst, de oceanen en de atmosfeer. Ongeveer negentig procent van het impulsmoment van de aarde zit in de vaste korst, en ongeveer tien procent in de mantel; de kern bezit een twaalfhonderdste, het oceaanwater een drieduizendste en de atmosfeer slechts een mil-



1. Het verschil tussen de berekende lengte van de dag – aannemend dat die elke eeuw 1,7 milliseconde langer wordt – en de werkelijk gemeten lengte van de dag, tussen 1963 en 1995. Het totale verschil (lijn *a*) is opgebouwd uit een langzame verandering (*b*), veranderingen van jaar tot jaar (*c*), elk jaar terugkerende veranderingen (*d*) en onregelmatige veranderingen van dag tot dag (*e*). De jaarlijks terugkerende veranderingen worden in het onderste kader uitvergroot weergegeven.

joenste deel van het impulsmoment. De metingen van de aardrotatie in figuur 1 betreffen de rotatie van de vaste korst. De langzame veranderingen weergegeven met lijn *b* worden veroorzaakt doordat impulsmoment wordt uitgewisseld tussen de korst en de mantel: tussen 1963 en 1972 werd de vloeibare mantel tot snellere rotatie gebracht door de korst, die zelf ter compensatie langzamer ging draaien. Na 1972 keerde het proces om. De uitwisseling van draaiing is mogelijk doordat de onderkant van de vaste korst onregelmatig is, zodat de stroming van de mantel op sommige plaatsen tegen de korst duwt. Overigens kunnen we de snelheden van het magma in de mantel niet meten, en daarom kan niet worden bevestigd dat alle met lijn *b* weergegeven veranderingen door uitwisseling tussen mantel en korst worden veroorzaakt.

De korte-termijnveranderingen in de rotatie van de aardkorst worden veroorzaakt door uitwisseling van rotatie met de atmosfeer, en in mindere mate (ongeveer 10%) met de oceanen. Dankzij het dichte meteorologische netwerk op de aarde

Erratum

In het eerste deel van dit artikel (Zenit april) is een kleine, maar storende fout geslopen. In figuur 4 is de energieschaal in erg/s, dus niet in watt.

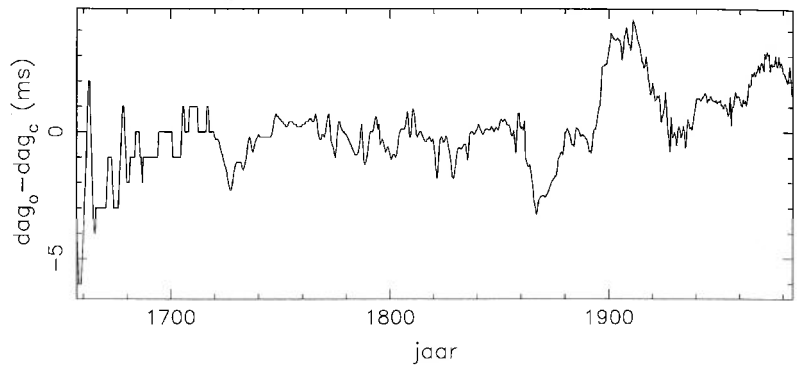
kan men op elke dag voor alle plaatsen op de wereld de dichtheid en de snelheid van de atmosfeer meten, en hieruit de totale hoeveelheid draaiing van de atmosfeer berekenen. Daarmee is direct bevestigd dat afname van de rotatie van de aardkorst gepaard gaat met een toename van de rotatie van de atmosfeer, en vice versa. Op soortgelijke wijze is de samenhang tussen de sterkte en richting van de oceaanaanstromen met de rotatiesnelheid van de korst aangetoond.

De seizoensveranderingen in de rotatie van de aarde (lijn *d* in fig. 1) komen voor een flink deel voor rekening van seizoensafhankelijke winden. Men kan zich dat zo voorstellen dat die winden de ene helft van het jaar tegen de ene kant van een bergmassief blazen, en daarmee de aardrotatie afremmen, terwijl ze de andere helft tegen de andere kant blazen, en de rotatie weer versnellen! De jaar-tot-jaar veranderingen komen door de verschillen in het weer van jaar tot jaar, en de onregelmatige veranderingen door de onregelmatige weersgesteldheden. Zo is bekend dat het el Niño-verschijnsel het weer op het zuidelijk halfrond sterk beïnvloedt, en het effect van de weersverandering op de aardrotatie is duidelijk zichtbaar in lijn *e* van figuur 1 voor de el Niño's van 1977-78 en 1982-83. Tijdens de el Niño van 1982-83 werd zelfs de snelste verandering ooit in de rotatie van de aardkorst gemeten.

Zons- en maansverduisteringen

Keren we nu terug naar het (verzonnen) voorbeeld uit het eerste artikel, waarin Halley – uit het feit dat een eclips in Bagdad werd waargenomen en niet in Alexandrië – afleidde dat de maand vroeger langer was dan nu. Dezelfde waarneming kan ook op een andere manier worden verklaard, namelijk dat de dag vroeger korter was dan nu. In het algemeen is het verschil tussen berekende en werkelijke plaats waar een verduistering wordt waargenomen te wijten aan een combinatie van veranderingen in de rotatie van de aarde en in de maanbaan.

Bij het analyseren van vroegere eclipswaarnemingen is het gebruikelijk aan te nemen dat de verandering in de maanbaan constant is, met de moderne gemeten waarde van 3,82 cm per jaar. Men berekent de plaats en tijd waarop een eclips zou moeten optreden, rekening



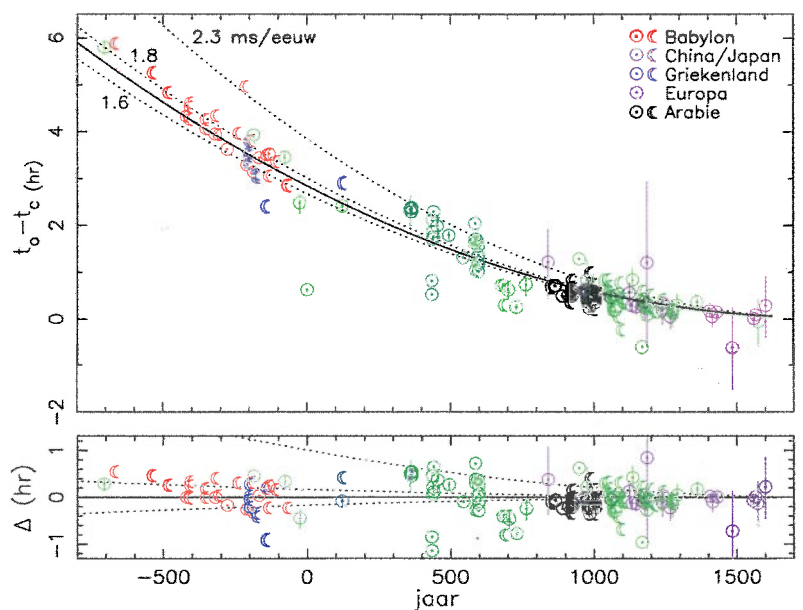
2. Het verschil tussen de berekende lengte van de dag – aannemend dat die elke eeuw 0,73 milliseconde langer wordt – en de werkelijk gemeten lengte van de dag, zoals afgeleid uit waarnemingen van sterbedekkingen door de maan.

houdend met de verandering van de maanbaan. Het overblijvende verschil met de waarneming is dan enkel het gevolg van verandering van de lengte van de dag.

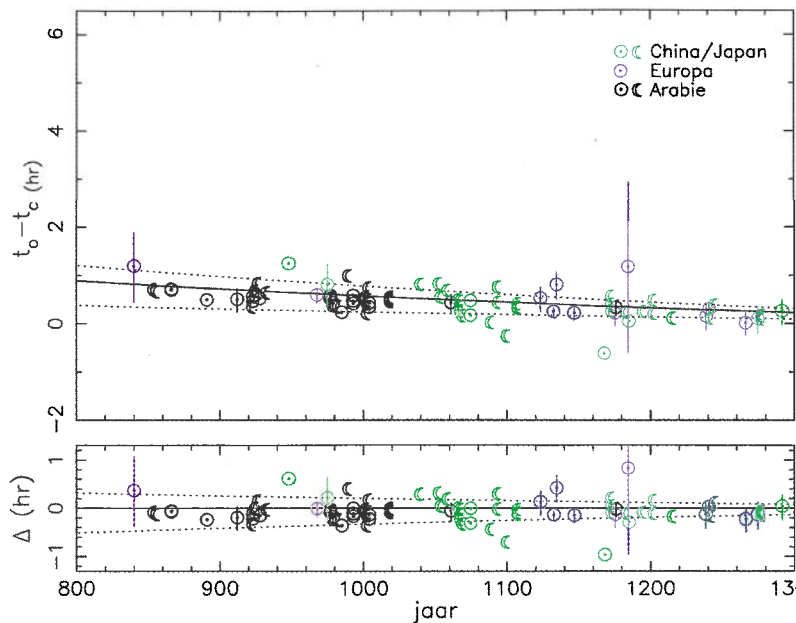
Dankzij de telescoop hebben sterrenkundigen variaties in de aardrotatie de laatste paar honderd jaar nauwkeurig kunnen meten (fig. 2). De gemiddelde verandering tussen 1660 en 1980 is langzamer dan de 2,3 milliseconde per eeuw die we uit de theorie verwachten, namelijk slechts 0,73 milliseconde per eeuw. Bovenop deze gemiddelde verandering zien we nog flinke onregelmatige variaties. Tussen 1860 en 1900, in nauwelijks veertig jaar, varieerde de lengte van de dag met 7 milliseconde ten opzichte van de gemiddelde verandering, van 3 milliseconde korter

tot 4 milliseconde langer. Zulke snelle variaties zijn sterker dan we tijdens de nauwkeurige metingen van de laatste jaren (in fig. 1) zien. Het zou interessant zijn te weten of ze door extreme weersveranderingen zijn veroorzaakt.

Zonsverduisteringen, en in mindere mate maansverduisteringen, behoren tot de meest spectaculaire hemelverschijnselen, en in de geschriften van vele vroegere beschavingen zijn dan ook beschrijvingen van deze gebeurtenissen te vinden. Richard Stephenson heeft zulke beschrijvingen systematisch verzameld en geanalyseerd – in oude Chinese geschiedenissen, in kleitabletten met astronomische data van de Babyloniërs, in de boeken van Griekse sterrenkundigen, in mid-



3. Boven: Het verschil tussen de berekende en waargenomen tijdstippen van historische zons- en maansverduisteringen, wanneer men doet alsof de lengte van de dag constant is. Als de lengte van de dag in werkelijkheid elke honderd jaar met 1,7 milliseconde zou toenemen, zouden de verschillen langs de doorgetrokken lijn moeten liggen; de stippellijnen geven de voorspelde verschillen voor 1,6, 1,8 en 2,3 milliseconde per eeuw. Onder: Het verschil tussen de berekende en waargenomen tijdstippen van historische zons- en maansverduisteringen, wanneer men aanneemt dat de dag 1,7 milliseconde per eeuw langer wordt.



4. Het verschil tussen de berekende en waargenomen tijdstippen van historische zons- en maansverduisteringen uit de late middeleeuwen. De doorgetrokken lijn is voor 1,7 milliseconde per eeuw; de stippellijnen zijn voor 0,73 en 2,3 milliseconden per eeuw. Verder als vorige figuur.

deleeuwse Arabische sterrenkundige geschriften en in middeleeuwse Europese kronieken. Figuur 3 toont het resultaat van zijn werk: de verschillen tussen de waargenomen tijden van verduisteringen en de berekende tijden. Bij de berekende tijden is ondersteld dat de aardrotatie niet verandert. We zien dat de oudste dateerbare Chinese zonsverduistering en Babylonische maansverduistering, van 708 en 665 voor onze jaartelling, bijna zes uur later werden waargenomen dan het geval zou zijn geweest als de aardrotatie constant was. Hieruit leiden we af dat de gemiddelde verandering in de lengte van de dag over de laatste 2700 jaar 1,7 milliseconde per eeuw is. Het tijdsverschil tussen waargenomen en berekend tijdstip van de verduisteringen is in de figuur weergegeven voor deze gemiddelde verandering van 1,7 milliseconde per eeuw, en ook voor 1,6, 1,8 en 2,3 milliseconde per eeuw. We zien dat de gemiddelde verandering vrij nauwkeurig volgt uit de metingen: 1,6 en 1,8 milliseconde per eeuw zijn duidelijk te klein en te groot.

Sommige punten liggen vrij ver van de verwachte lijn. Voorbeelden hiervan zijn de maansverduistering waargenomen door de Babyloniërs in 214 voor Christus, en de door de oude Chinezen opgetekende zonsverduistering uit 1 voor Christus. Deze punten lijken te ver van de andere waarnemingen te liggen om

met onregelmatige veranderingen in de aardrotatie – zoals die tussen 1860 en 1900 in figuur 2 – verklaard te kunnen worden. Het ligt meer voor de hand dat er toch iets met de analyse van de verduistering mis is: de waarneming kan verkeerd zijn gedaan, of verkeerd zijn op- of overgeschreven, dan wel is er iets misgegaan bij de identificatie van de verduistering.

De uit de theorie – dat is: uit het behoud van impulsmoment en de gemeten verwijdering van de maan met 3,82 cm per jaar – afgeleide waarde van 2,3 milliseconde per jaar is duidelijk niet in overeenstemming met de waarnemingen. Stephenson suggereert dat het verschil een gevolg is van de laatste ijstijd! Tijdens de ijstijd drukt een grote hoeveelheid ijs op de polen van de aarde. Het gevolg hiervan is dat de aarde bij de evenaar wat uitstulpt, zodat het oppervlak daar wat verder van de aardas verwijderd is. Door deze grotere afstand roteert de korst ietwat langzamer om de aardas. Als de ijstijd voorbij is, verdwijnt het ijs langzaam van de polen, en daardoor gaat de aarde weer wat sneller roteren. De suggestie van Stephenson houdt in dat de lengte van de dag ten gevolge van de getijden met maan en zon inderdaad 2,3 milliseconde per eeuw langer wordt, maar dat het smelten van het poolijs en de bijbehorende verandering van de vorm van de aarde dit langer worden voor 0,6 milliseconde per eeuw compenseren.

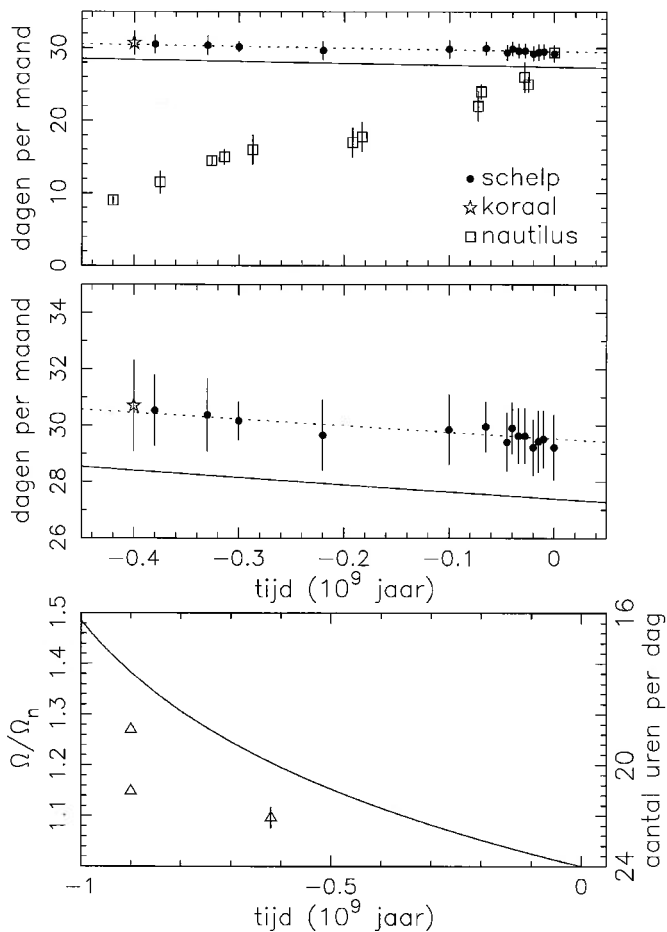
Het is zeker waar dat het opkomen en verdwijnen van grote hoeveelheden landijs bij de polen een weerslag op de aardrotatie heeft, zoals ook met metingen van geodetische satellieten is bevestigd, maar ik twijfel toch of de verklaring van Stephenson de juiste is. In figuur 4 laat ik de middeleeuwse Chinese, Arabische en Europese tijden van de zonsverduisteringen zien. Het verschil tussen de waargenomen en berekende tijden is kleiner dan men zou verwachten als de rotatie elke eeuw 1,7 milliseconde langzamer zou worden, en groter dan een verandering van 0,73 milliseconde per eeuw, zoals gevonden in figuur 2. Gedurende de laatste duizend jaar verandert de aardrotatie dus langzamer dan in de 1700 jaar daarvoor, en niet zo'n beetje ook! Het is duidelijk dat hier andere effecten dan smeltend poolijs een dominerende rol spelen. Maar welke? Er is mij geen verklaring bekend, maar als ik zou moeten raden zou ik veranderingen in de grote golfstromen in de oceanen als eerste nader te onderzoeken mogelijkheid suggereren. Dat zulke veranderingen optreden weten we uit het feit dat de grote golfstroom die de wintertemperaturen in Noord-Europa draagelijk houdt, tijdens de zogenaamde mini-ijstijd van 1645 tot 1715 duidelijk anders liep. (Deze mini-ijstijd gaf ons de fraaie schilderijen van winterpret uit de tweede helft van de 17de eeuw.)

Schelpen, koralen en modder

Schelpen en koralen groeien door het toevoegen van nieuwe laagjes kalk. Elke dag wordt een nieuw laagje toegevoegd, wellicht onder invloed van het licht. Omdat de hoeveelheid licht 's nachts verandert met de fase van de maan, is het voorstelbaar dat ook de dikte van de laagjes met de fase van de maan verandert. In fossiele schelpen en koralen zijn zulke maandelijkse variaties inderdaad gevonden, evenals jaarlijkse variaties. Door nauwkeurig het aantal groeiringen te tellen, kunnen we zo het aantal dagen per maand en per jaar in vroegere geologische tijdperken vaststellen. Het onderzoek van deze ringen kent nogal wat problemen. Lang niet alle koralen vertonen jaarlijkse variatie, en het is nogal vreemd dat families van koralen die in paleontologische tijden duidelijke jaarlijkse variaties vertonen, huidige afstammelingen hebben die dit niet doen. Bovendien is niet bekend of

de laagjes in de winters dikker zijn, of juist in de zomers. Onderzoek van schelpen leert dat het aantal laagjes dat per maand wordt afgezet afhangt van de positie op aarde, meer in het bijzonder van het lokale verloop van eb en vloed. Als er een keer een dag met buitengewoon donker weer is, wordt er wellicht geen laagje afgezet, en in dat geval levert onze telling voor de betreffende maand een dag minder op. Zolang de details van de groei van schelpen en koralen niet goed begrepen zijn, zullen we heel voorzichtig moeten zijn met de interpretatie van de tellingen.

Verschillende auteurs hebben uit onderzoek van de groeilaagjes in schelpen en koralen het aantal dagen per maand en per jaar tot 400 miljoen jaar geleden bepaald. Ik heb geprobeerd hieruit de meer betrouwbare te selecteren (namelijk de bepalingen waarvan ook een nauwkeurigheid gegeven wordt), en deze in figuur 6 getekend.

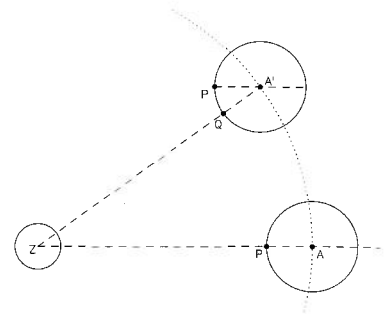


6. Boven: het aantal (zonne)dagen per (zonne)maand zoals afgeleid uit dagelijkse ringen in schelpen, koraal en de nautilus. De stippellijn geeft de theoretische waarde; de getrokken lijn het aantal siderische dagen per maand. Midden: uitvergroting van de bovenste figuur. Onder: de rotatiesnelheid van de aarde zoals afgeleid uit dikte van opeenvolgende modderlaagjes. De twee punten bij 900 miljoen jaar geleden laten het verschil van mening zien tussen onderzoekers die dezelfde data bestudeerd hebben.

Hierbij komt een subtiliteit te voorschijn die ik tot nu toe heb verzwegen: het verschil tussen een sterrendag (in de sterrenkundige vaktaal: siderische dag) en een zonnedag (synodische dag). Beschouw een plaats op aarde voor welke de zon precies in het zenit staat, op het hoogste punt van haar dagelijkse beweging aan de hemel. In de tijd die deze plaats nodig heeft om ten opzichte van de sterren precies een volle rotatie om de aardas te maken – de sterrendag – heeft de aarde een stukje in haar baan om de zon afgelegd. Daardoor moet de aarde nog een stukje doordraaien voor de plaats de zon opnieuw in het zenit heeft, en er een zonnedag voorbij is. De tijdsduur tussen twee hoogste posities van de zon (of tussen twee zuidelijke meridiaandoorgangen van de zon), is de zonnedag, wat we in het gewone leven *de* dag noemen, en is dus iets langer dan de sterrendag. In een jaar is er precies één sterrendag extra ten opzichte van het

aantal zonnedagen. Een dag duurt 24 uur, een sterrendag ongeveer vier minuten korter. Op geheel analoge manier is er elk jaar precies één sterrenmaand meer dan dat er zonnemaanden zijn. Een (zonne)maand duurt 29,5 (zonne)dagen, een sterrenmaand 27,3.

Alle dagen waar ik het tot hier toe over heb gehad, zijn sterrendagen, alle maanden sterrenmaanden. Als de groeiringen afhangen van de hoeveelheid licht, dan wel van met de dag-en-nachtcyclus verbonden temperatuurswisselingen, moeten we het aantal groeiringsdagen per maand vergelijken met het aantal zonnedagen per zonnemaand. Dit wordt gedaan in figuur 6. De doorlopende lijn geeft het aantal sterrendagen per sterrenmaand weer (zoals in figuur 3 van het eerste artikel), de stippellijn het aantal zonnedagen per zonnemaand. De meeste punten voor de schelpen en de ene nauwkeurige meting van koralen blijken vrij aardig langs de theoretische voorspelde lijn te liggen, maar de fouten in de me-



5. Schema ter verklaring van zonne- en sterrendagen (niet op schaal). Als het centrum van de aarde zich in A bevindt, is het in P midden op de (zonne)dag; Z is het centrum van de zon. P draait tegen de klok in om A, en tegelijkertijd beweegt A zich tegen de klok in om Z. Na een sterrendag heeft P precies één omwenteling gemaakt, en is het centrum van de aarde in A' gekomen. Het is dan midden op de dag in Q; in P is het nog vóór het midden van de dag. Pas als P nog wat verder is gedraaid zal het in P weer midden op de dag zijn: de zonnedag is dus langer dan de sterrendag.

tingen zijn vrij groot. De metingen van de groeiringen zijn daarom wel in overeenstemming met de theoretische voorspelling, maar men kan niet zeggen dat ze overtuigend onafhankelijk bewijs geven van de verandering in het aantal dagen per maand.

Vrijwel alle tellingen van schelpringen zijn met het oog gedaan, en daardoor rijst de vraag hoe objectief ze zijn. Deze vraag krijgt nog meer nadruk door het gebrek aan detail in de publicaties, waarin zelden wordt vermeld hoe en hoeveel ringen er precies geteld zijn in hoeveel schelpen. Het lijkt er sterk op dat het gebruik van schelpen voor de bepaling van het aantal dagen per maand, na een veelbelovend begin in de jaren zeventig, geheel is vastgelopen. Na 1980 is er nauwelijks nieuws over dit onderwerp gepubliceerd. Merkwaardig is verder dat een dier waarvan de ringen wel degelijk gemakkelijk en ondubbelzinnig geteld kunnen worden, de nautilus, resultaten geeft die helemaal niet kloppen met die van de andere schelpdieren. De nautilus van nu voegt elke dag een ring toe aan zijn schelp, en elke maand een tussenschot. Door in fossielen van de nautilus het aantal ringen tussen tussenschotten te tellen zou het aantal dagen per maand kunnen worden vastgesteld. De resultaten zijn eveneens in figuur 6 weergegeven, en we zien dat de fossiele nautilus 400 miljoen jaar geleden negen ringen per tussenschot produceerde. Als we dit zo interpreteren

dat er negen dagen per maand zijn, zien we uit figuur 1 in het vorige artikel dat de maan 400 miljoen jaar geleden op een vijfde van de huidige afstand tot de aarde zou hebben gestaan. Dat kan echt niet kloppen. Het blijkt dus dat het feit dat de huidige nautilus eens per maand een tussenschot aanmaakt toeval is, en niets met de maan te maken heeft!

De oudste onderzochte schelpen en koralen dateren van ongeveer 400 miljoen jaar geleden. Oudere gegevens kunnen worden verkregen uit de veranderlijke dikte van modderafzettingen in oude gesteenten. In sommige zee-inhammen wordt bij elke vloedoverstroming een dun laagje modder afgezet: het terugtrekkende water bij eb neemt modder mee en deponert dat in iets dieper water. Bij springvloed (als zon en maan in een lijn staan, d.w.z. bij nieuwe of volle maan) kan er een sterkere stroming komen, en kan het modderlaagje dikker zijn. Deze gedachtegang geeft een verklaring voor de regelmatige wisselingen in de dikte van afgezette modderlagen in oude gesteentes, zoals die in gesteente vlakbij Adelaide in Australië, 600 miljoen jaar oud, en in de Big Cottonwood Canyon in Utah (VS), 900 miljoen jaar oud. Telling van het aantal lagen tussen twee dikke lagen geeft het aantal dagen per maand. Als er een jaarlijkse variatie is in de hoogte van het tij, door

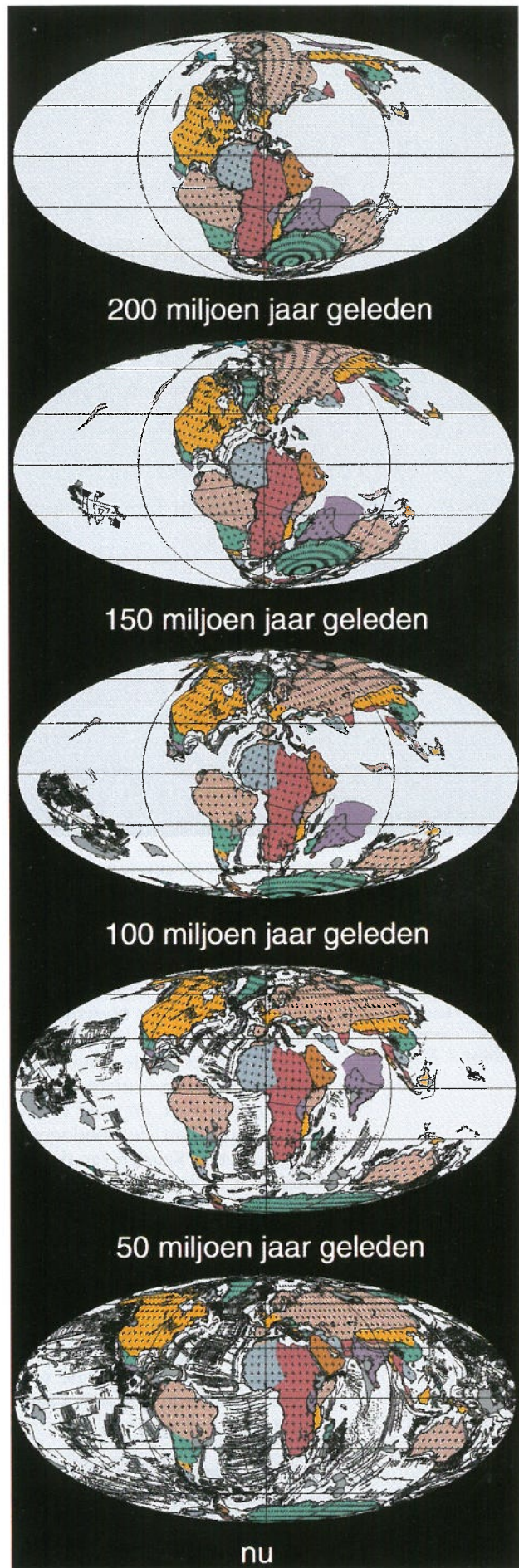
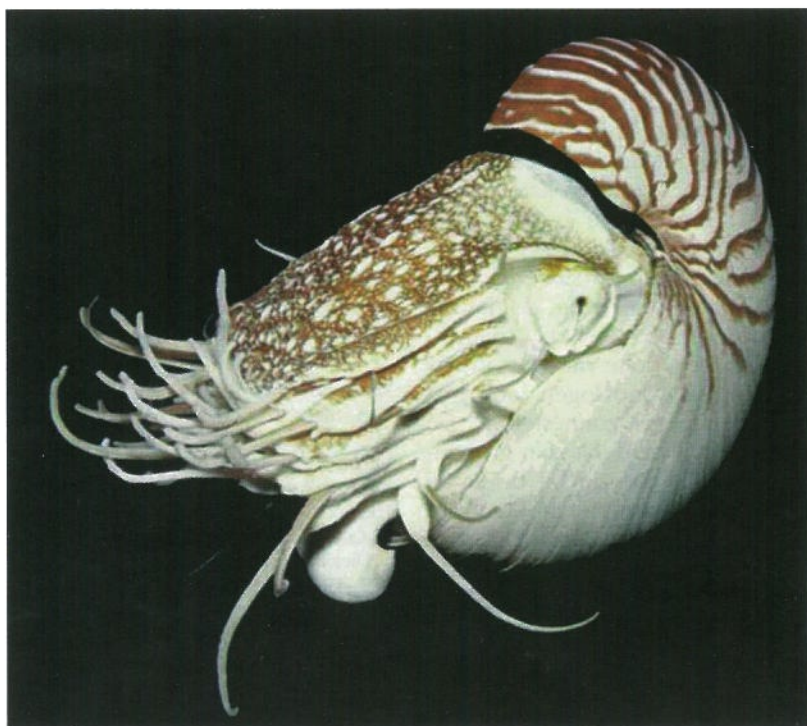
jaarlijkse variatie in de lokale zee-stroming, kan men direct het aantal dagen per jaar bepalen.

Omdat de lengte van het jaar ook in geologische tijden niet significant is veranderd, volgt de rotatiesnelheid van de aarde direct uit het aantal dagen per jaar. Overigens blijkt – net als bij de schelpen – dat de interpretatie van de lagen niet onduidelijk is; twee verschillende onderzoekers komen op basis van precies dezelfde data tot twee verschillende waarden van de lengte van de dag 900 miljoen jaar geleden! Deze resultaten en die voor 600 miljoen jaar geleden zijn getekend in figuur 6. We zien dat beide metingen onder de theoretische lijn liggen.

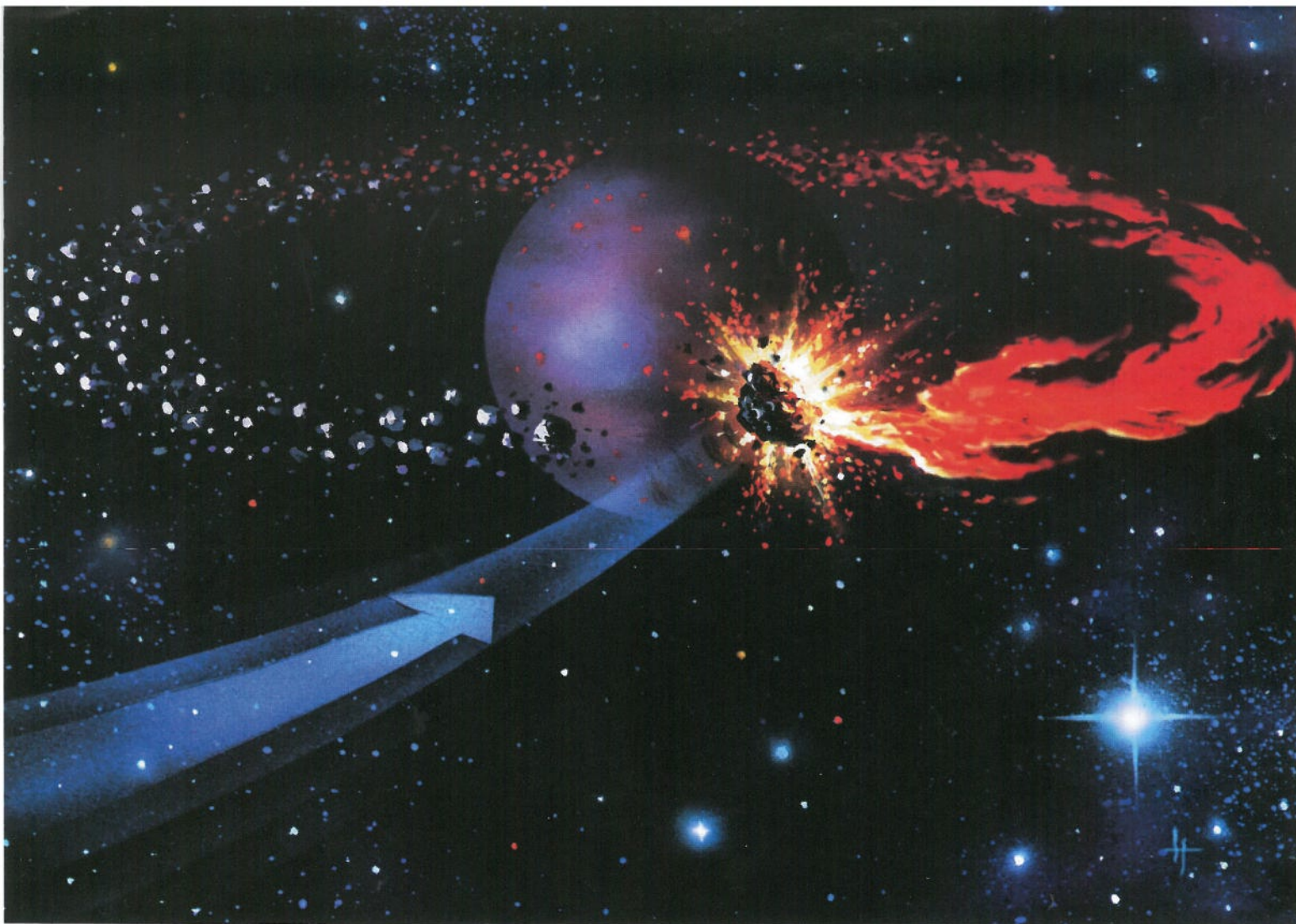
Het lijkt er op dat de verandering een miljard jaar geleden minder groot was dan berekend op grond van de huidige verwijderingsnelheid van de maan van 3,82 cm per jaar. Dat betekent dat het langer dan 1,2 miljard jaar geleden is dat de maan vlakbij de aarde stond, en zoals in het begin van dit artikel uitgelegd moet dat ook. Het is duidelijk dat meer en betere metingen nodig zijn om de precieze rotatie van de aarde 1 miljard jaar geleden vast te stellen, en er is hoop want er zijn meer geschikte steenlagen gevonden.

Hoe komt het dat de verandering in de rotatie van de aarde in vervlogen geologische tijden anders was dan nu? Ik denk dat de hoofdoorzaak de verandering is van de dis-

De voorouders van deze nautilus spelen een kleine, maar opvallende rol in de discussie over het aantal dagen dat vroeger in een maand zat.



Het veranderende aanzien van onze planeet door de verschuiving van de continentale platen. (Kaarten: Plate Project, universiteit van Texas)



Artist's impression van het ontstaan van de maan. Onze naaste begeleider zou zijn ontstaan na de botsing van de aarde met een andere kleine planeet. (Tekening: David A. Hardy)

sipatie van bewegingsenergie in de oceanen. Het tempo van deze dissipatie bepaalt het tempo waarmee de aardrotatie afremt en de maan zich van de aarde verwijderd. De hoeveelheid dissipatie hangt af van de stromingen in het oceanwater. In het begin van de eeuw suggereerde Wegener dat de continenten vroeger anders ten opzichte van elkaar lagen dan nu, en rond 1960 is de beweging van de continenten direct gemeten. Kaarten van de verdeling van de landmassa op aarde in geologische tijden laten zien dat de oceanen er in de in figuur 6 voorkomende tijden inderdaad heel anders uitzagen dan nu, en dit heeft ongetwijfeld ook tot een ander tempo van energiedissipatie geleid. De door mij besproken eenvoudigste vorm van Darwins theorie voor de getijden houdt met zo'n verandering geen rekening.

De oorsprong van de maan

De laatste jaren lijkt men het erover eens te zijn geworden dat de maan is ontstaan na de botsing van een tamelijk groot hemellichaam – wellicht zo groot als Mars – met de aarde. In deze botsing werd het hemellichaam geheel kapot geslagen,

evenals een deel van de aardkorst. De brokstukken kwamen in een baan om de aarde terecht, en terwijl een deel geleidelijk op aarde terugviel, klonterde een ander deel samen tot de maan, op net voldoende afstand om niet door de getijdenkrachten van de aarde te worden stukgetrokken, dat wil zeggen: net buiten de Roche-limiet.

Het aantrekkelijke van deze theorie is dat ze verklaart hoe het komt dat de maan geen ijzerkern bevat. Na de botsing vielen de zware ijzerbrokken snel terug op aarde, maar konden de lichtere brokken silicium (kiezel) makkelijker in een baan blijven tot ze samenklonterden. Een probleem van de theorie is dat er niet zo heel veel hemellichamen ter grootte van Mars in ons zonnestelsel rondvlogen, ook niet in het vroege zonnestelsel. De waarschijnlijkheid dat zo'n groot lichaam dicht genoeg bij de aarde kwam lijkt daarom klein. De maan is veel kleiner dan Mars. Dat men toch denkt dat het botsende hemellichaam de grootte van Mars moet hebben gehad, komt dan ook voornamelijk omdat er zoveel impulsmoment in het aarde-maansysteem zit, waarvan men denkt dat het zijn

oorsprong in de botsing moet hebben gevonden: onmiddellijk na de botsing roteerde de aarde zeer snel. Het is de afremming van die snelle rotatie van de aarde die de maan in staat stelde van de oorspronkelijke afstand van ongeveer 17.000 km de huidige afstand van 384.000 km te bereiken. Het tempo waarmee dat gebeurde zal zeer onregelmatig zijn geweest: in het begin waren er nog geen oceanen op aarde. Pas na de vorming van de oceanen – toen de aarde voldoende gekoeld was – is de dissipatie van getijden op gang gekomen, en elke verandering in grootte en diepte van de oceanen zal een verandering in het tempo van het weglopen van de maan met zich hebben meegebracht.

Bronnen

Een meer technische beschrijving van het bovenstaande is te vinden op <http://www.astro.uu.nl/~verbunt/aarde.html> met meer verwijzingen naar de literatuur. Hier noem ik:
A. Cook, *Edmond Halley*, 1998
J. Dickey en medewerkers, *Science*: **253**, 629 (1991); **265**, 482 (1994) en **281**, 1656 (1998).
F.R. Stephenson, *Historical eclipses and the Earth's rotation*, 1997.
G. Williams, *Sedimentary Geology* **120**, 55 (1998).