

## Elementaire Deeltjes

*Elementaire Deeltjes*, de serie boekjes van Amsterdam University Press (AUP), maakt kennis toegankelijk voor een breed publiek. *Elementaire Deeltjes* is dé manier om snel alles te weten te komen over de onderwerpen die je interesseren.

Experts nemen je mee op een ontdekkingsreis waarbij elk thema in de meest beknopte vorm volledig uitgediept wordt. Een serie handige en handzame boekjes, met altijd het antwoord op de vraag: 'Hoe zit dat nou eigenlijk?'

# De Aarde

*Martin Redfern*

AUP

Oorspronkelijke uitgave: Martin Redfern, *The Earth: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2003 [ISBN 978-0-19-280307-8]

Vertaling: Cornelis van Ginneken

Ontwerp omslag: Michel van Duyvenbode, Amsterdam

Ontwerp binnenwerk: Crius Group, Hulshout

ISBN 978 90 8964 608 8

e-ISBN 978 90 4852 245 3

NUR 930

© M. Redfern / AUP, Amsterdam 2014

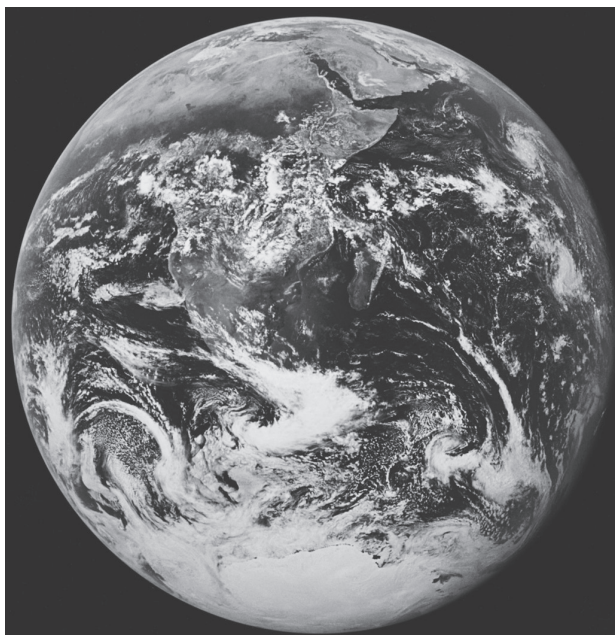
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j<sup>o</sup> het Besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

Er is alle moeite gedaan om de rechthebbenden van de afbeeldingen te achterhalen, maar in sommige gevallen is dat mogelijk niet gelukt. We verontschuldigen ons voor eventuele omissies.

# Inhoud

1. Een dynamische planeet	7
2. 'Diepe tijd'	28
3. Diepe aarde	44
4. Onder de zee	64
5. Drijvende continenten	86
6. Vulkanen	109
7. Als de grond trilt	126
Epiloog	142
Verder lezen	145
Dankwoord	147
Index	148



1. De aarde, gezien vanuit Apollo 17, december 1972. © Corbis

# 1. Een dynamische planeet

‘Op het moment dat er een foto van de aarde bestaat die vanuit de ruimte is genomen, zullen we een geheel nieuwe voorstelling hebben van een zelden geëvenaarde kracht.’

– sir Fred Hoyle, 1948

Hoe kun je een grote ronde planeet in een klein plat boekje stoppen? Het lijkt onmogelijk, maar er zijn twee verschillende manieren waarop je het kunt proberen. De ene manier is via de *bottom-up*-benadering van de geologie. Deze komt in feite neer op het kijken naar stenen. Eeuwenlang scharrelden geologen met hun hamertjes over het oppervlak van onze planeet, op zoek naar de verschillende steensoorten en minerale korrels waaruit het aardoppervlak bestaat. Met het blote oog, de microscoop, de elektronensonde en de massaspectrometer plozen ze de aardkorst tot in de details uit, om vervolgens in kaart te brengen hoe de verschillende steensoorten zich tot elkaar verhouden. Met behulp van theorie, observatie en experiment bedachten ze hoe dat materiaal daar terecht kon komen. Deze enorme onderneming heeft belangrijke inzichten opgeleverd. Gezamenlijk hebben al die geologen met hun inspanningen een enorm fundament gelegd waarop aardwetenschappers verder konden bouwen. Dankzij deze *bottom-up*-aanpak kan ik ook dit boek schrijven. Maar het is niet de aanpak die ik hier zal gebruiken. Dit is geen gidsje voor het onderzoeken van stenen en mineralen en het maken van geologische kaarten. Dit boek biedt een portret van een planeet.

De nieuwe kijk op onze oude planeet is de *top-down*-benadering van de aardwetenschappen: kijken naar de aarde als geheel en niet slechts als bevroren in de tijd, als momentopname van het heden. Als we onze planeet bekijken

over de hele geologische tijdschaal, zien we een dynamisch systeem, een hele reeks van processen en cycli, en kunnen we achterhalen hoe onze aarde in elkaar steekt.

### **Het zicht van boven**

De voorspelling aan het begin van dit hoofdstuk werd in 1948 gedaan door astronoom sir Fred Hoyle, een decennium vóór de komst van de ruimtevaart. De voorspelling van Hoyle kwam uit toen onbemande raketten de eerste ruimtetoelichtingen van de aarde namen en de eerste generatie astronauten onze wereld in zijn geheel kon bekijken. Het is niet zo dat die eerste bliken ons veel nieuws over de aarde vertelden, maar ze gaven ons wel een nieuw icoon. En veel astronauten die rechtstreeks getuige waren van de schoonheid en ogenschijnlijke breekbaarheid van onze wereld, vergaten die emotionele ervaring nooit meer. Het is waarschijnlijk geen toeval dat de aardwetenschappen in dezelfde tijd hun eigen revolutie doormaakten. Vijftig jaar nadat Alfred Wegener het idee oorspronkelijk had geopperd, werd namelijk het theorie van de platen tektoniek eindelijk aanvaard. Uit onderzoek van de zeebodem bleek dat deze bodem zich uitspreidde vanuit een systeem van zogenaamde 'midoceanische ruggen'. En die expanderende zeebodem duwde ook de continenten uit of tegen elkaar. De onvoorstelbare massa's van continentale steenplaten bleken te bewegen in een complexe en oeroude wals.

In dezelfde tijd, met dat zelfde icoon – dat kleine blauwe juweel zwevend in de zwarte ruimte – in gedachten ontstond er in die tijd ook een wereldwijde milieubeweging. Deze beweging bestond uit een mix van mensen die een emotionele band voelden met bedreigde soorten en regenwouden en van wetenschappers die een nieuwe kijk op complexe, interactieve ecologische systemen ontwikkelden. Veel universiteiten, faculteiten en onderzoekers hanteren tegenwoordig de term 'aardwetenschappen' in plaats van geologie, omdat de discipline inmiddels meer inhoudt dan de studie naar gesteente.

De term 'aardwetenschappen' raakt steeds meer ingeburgerd en staat niet meer alleen voor de studie naar de interactie tussen en dynamische aard van processen die zich afspelen in en op de stenen aardkorst. Ook de processen in de oceanen, in de kwetsbare dampkringsluiser en in het dunne laagje leven op het oppervlak zijn nu onderwerp van studie. Je kunt de wereld zien als een ui, als een reeks concentrische bollen, van magnetosfeer en atmosfeer, via biosfeer en hydrosfeer, naar de lagen van de vaste aarde. Ze zijn niet allemaal bolvormig en sommige lagen zijn beduidend minder dik dan andere, maar elke laag handhaaft zich in een delicaat evenwicht met de andere lagen. En elke component van dit systeem wordt niet gezien als gefixeerd en onveranderlijk, maar eerder als een fontein, die wel zijn algehele structuur vasthoudt, maar constant verandert als er materiaal en energie doorheen stromen.

### **Als stenen konden praten**

Rotsen en stenen zijn niet de meest toeschietelijke verhalenvertellers. Meestal liggen ze maar wat, al dan niet onder het mos, en ze bewegen alleen als je tegen ze duwt. Maar geologen weten ze toch aan de praat te krijgen. Ze slaan, splijten, persen en pletten ze en ze rukken en trekken eraan tot de stenen – soms bijna aletterlijk – meegeven. Als je weet waar je op moet letten, geven stenen hun geschiedenis prijs. De veelzeggende sporen van wind, water en ijs op gesteente aan het oppervlak tonen de geschiedenis van verwerking en erosie. Er kunnen ook dieper liggende littekens zijn, die getuigen van periodes van hitte, druk en vervorming toen het gesteente zich onder het oppervlak bevond. Als die veranderingen extreem zijn, noemt men die stenen 'metamorf'. Stenen vertonen ook aanwijzingen die duiden op hun oorsprong. Aan sommige stenen is te zien dat ze ooit gesmolten waren en diep vanuit de aarde zijn opgestoten om uit vulkanen te barsten of binnen te dringen in bestaand ander gesteente. Dit is zogenaamd



stollingsgesteente. Aan het formaat van de minerale korrels in gesteente kun je aflezen hoe snel het is afgekoeld. Een grote massa graniet koelt langzaam, zodat de kristallen erin groot zijn. Vulkanisch basalt stolt snel en is daarom fijnkorrelig. Stenen kunnen ook bestaan uit de vermorzelde resten van eerdere stenen. Het formaat van de fragmenten geeft dan vaak aan in welke energetische omgeving ze zijn ontstaan: van fijne schalie en kleisteen, afgezet in stilstaand water, via door water of wind meegevoerd zandsteen, tot grove brokstukken die werden weggespoeld door heftige stromen. Andere gesteenten, zoals krijt en kalksteen, zijn chemische afzettingen: levende organismen nemen kooldioxide op uit de atmosfeer en laten die als kalk neerslaan in zeewater, waardoor lucht als het ware wordt omgezet in steen.

Zelfs individuele minerale korrels hebben een eigen verhaal. Mineralogen kunnen ze atoom voor atoom uit elkaar halen in massaspectrometers, die zo gevoelig zijn dat ze de verschillende isotoopverhoudingen tonen (de verhoudingen van verschillende atomaire vormen van hetzelfde element), zelfs bij sporelementen. Soms kan dit helpen om de korrels te dateren, zodat we weten of ze eventueel afkomstig zijn uit nog ouder gesteente. Ze kunnen ook de groeistadia van een kristal laten zien, zoals van diamant, die zich een weg heeft gebaan door de aardmantel. In het geval van koolstof- en zuurstofisotopen in van zeeorganismen afkomstige mineralen is het zelfs mogelijk om de temperatuur van de zee en het wereldklimaat te schatten waarin ze zijn ontstaan.

### **Andere werelden**

Het probleem met de wereld is dat het de enige is die we hebben. We kunnen hem alleen zien zoals hij nu is en we weten niet of hij hier puur toevallig is. Aardwetenschappers vertonen daarom hernieuwde interesse in astronomie. Krachtige nieuwe telescopen, die gevoelig zijn voor infraroodstraling en golflengtes van minder dan een millimeter,

kunnen diep in stervormende regio's turen om te zien wat er mogelijk gebeurde toen ons eigen zonnestelsel ontstond. Rond sommige jonge sterren zijn stoffige halo's waargenomen, zogenaamde protoplanetaire schijven, wat wellicht nieuwe zonnestelsels in wording zijn. Maar de speurtocht naar volledig gevormde, aardeachtige planeten is lastiger. Het is net zo moeilijk om zo'n planeet direct waar te nemen in een baan rond een verre ster, als om een kleine mot te ontdekken vlakbij een krachtige schijnwerper. Maar via indirecte methodes zijn er in recente jaren wel planeten gevonden. Die planeten zijn ontdekt na de detectie van lichte fluctuaties in de beweging van hun moederster, als gevolg van zwaartekrachteffecten. De duidelijkste effecten – die daarom ook als eerste werden ontdekt – lijken veroorzaakt te worden door planeten die veel groter zijn dan Jupiter en veel dichter rond hun ster cirkelen dan de aarde rond de zon, zodat je ze niet echt 'aardeachtig' kunt noemen. Er zijn echter steeds meer aanwijzingen die duiden op het bestaan van zonnestelsels die op het onze lijken en meerdere planeten hebben. Al blijven kleine en gastvrije planeten als de aarde vooralsnog moeilijk te detecteren.

Om dergelijke planeten direct waar te nemen, hebben we ruimtetelescopen nodig waarvan we nu nog slechts kunnen dromen. Er zijn in zowel de VS als in Europa ambitieuze plannen voor een netwerk van infraroodtelescopen. Elk van die telescopen moet veel groter zijn dan de Hubble-ruimtetelescoop en vier of vijf ervan zouden in dichte formatie moeten vliegen om hun signalen te combineren voor de benodigde resolutie. Ze moeten zich bovendien helemaal ter hoogte van Jupiter bevinden om te ontsnappen aan de stoffige infraroodgloed van ons eigen planetaire systeem. Onder die voorwaarden is het wellicht mogelijk dat ze levenstekens opvangen van verre planetaire atmosferen en, in het bijzonder, dat ze ozon detecteren. Dit laatste zou kunnen wijzen op aardeachtige klimaat- en chemiecondities, plus de aanwezigheid van vrije

zuurstof, iets wat, voor zover we weten, alleen door het leven in stand kan worden gehouden.

### **Tekens van leven**

In februari 1990 zond de *Voyager 1*-ruimtesonde, na bezoeken aan Jupiter en Saturnus en op weg om het zonnestelsel te verlaten, het eerste beeld uit van ons hele zonnestelsel zoals bewoners van een andere ster het zouden zien. Het beeld wordt gedomineerd door één enkele heldere ster, de zon, gezien vanaf zes miljard kilometer, veertig keer de afstand waarop wij gewend zijn hem te zien. De planeten zijn amper zichtbaar. De aarde zelf is kleiner dan één pixel in het *Voyager*-beeld en zijn zwakke licht is gevangen in wat een zonnestraal lijkt. Dit is onze hele wereld; veel meer dan een stofje lijkt het niet. Maar die kleine blauwe planeet zou wel direct de aandacht trekken van iedere *alien* met de juiste meetapparatuur. Op aarde klopt namelijk alles precies, wat je niet kunt zeggen van de enorm stormachtige gasbuilen van de buitenplaneten, de kou en droogte van Mars of het zure stoombad van Venus. Er komt water voor in alle drie de fasen: vloeibaar, ijs en damp. De atmosferische compositie is niet die van een dode wereld die een status quo heeft bereikt, maar van een actieve, die continu moet worden vernieuwd. Er is zuurstof en ozon en er zijn sporen van koolwaterstoffen; substanties die niet lang samen bestaan als ze niet constant worden vernieuwd door levende processen. Dit alleen al zou de aandacht trekken van buitenaardse bezoekers, zelfs nog vóór ze het constante gekeuvel van onze communicatie, radio en televisie op zouden vangen.

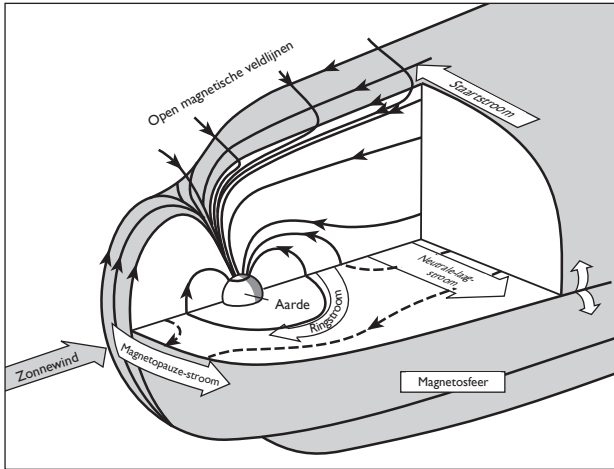
### **Magnetische bel**

Het terrein van de geofysica reikt verder dan de aarde zelf. De fysische invloed van onze planeet reikt namelijk veel verder dan alleen tot het oppervlak. Die invloed strekt zich ook uit tot wat we als lege ruimte zien. Die ruimte is echter niet leeg.

We leven in een reeks bellen die in elkaar zijn genesteld als Russische poppetjes. De invloedssfeer van de aarde wordt ingekapseld door een grotere, door onze zon gedomineerde bel. Deze ligt op zijn beurt in diverse overlappende bellen die heel lang geleden zijn ontstaan uit het uitdijende puin van exploderende sterren of supernova's. Al die bellen bevinden zich in ons melkwegstelsel, dat zich op zijn beurt in een supercluster van stelsels in het gekende heelal bevindt, wat dan mogelijk weer een bel in een kwantumschuim van werelden is.

De aardatmosfeer en het magnetische veld beschermen ons, grotendeels, tegen de stralingsgevaaren uit de ruimte. Zonder die bescherming zou het leven op het aardoppervlak niet alleen worden bedreigd door ultraviolet- en röntgenstraling van de zon maar ook door kosmische straling: hoogenergetische deeltjes van gewelddadige gebeurtenissen in het hele sterrenstelsel. Ook waait er vanaf de zon permanent een orkaan van deeltjes, vooral waterstofkernen of protonen. Deze zonnwind raast doorgaans langs de aarde met snelheden van zo'n 400 kilometer per seconde, maar kan tijdens een zonnestorm wel tot drie keer die snelheid bereiken. Hij strekt zich miljarden kilometers uit in de ruimte, voorbij alle planeten en wellicht zelfs voorbij de baan van kometen, die vele duizenden malen verder van de zon cirkelen dan de aarde. De zonnwind is ragfijn maar sterk om genoeg een staart aan kometen te blazen als ze het hart van het zonnestelsel naderen. Daarom wijzen deze staarten altijd van de zon af. De zonnwind figureert ook in fantasievolle voorstellen voor de aandrijving van ruimteschepen met sluierdunne zonnwindzeilen.

De aarde wordt door zijn magnetische veld, de magnetosfeer, beschermd tegen de zonnwind. Omdat de zonnwind elektrisch geladen is, vormt hij een elektrische stroom, die geen magnetische veldlijnen kan kruisen. In plaats daarvan comprimeert hij de aardatmosfeer aan de zonzijde, als de boeg golf van een schip op zee, en rekt hij hem aan de andere zijde uit tot een lange staart, die bijna tot de baan van de



2. Diagram van de magnetosfeer, het magnetische omhulsel van de aarde, dat in een komeetachtige structuur wordt geblazen door de zonnwind. Pijltjes tonen de richting van elektrische stromen

maan reikt. Geladen deeltjes die in de magnetosfeer worden gevangen, klonteren samen in gordels tussen de veldlijnen, waar ze gedwongen worden in een spiraal te bewegen en straling genereren. Deze stralingsgordels werden in 1958 ontdekt nadat James van Allen de eerste geigerteller de ruimte in had gestuurd met de Amerikaanse *Explorer 1*-satelliet. Het zijn zones die schade aan ruimteschepen veroorzaken en dodelijk zijn voor onbeschermden astronauten.

Daar waar de magnetische veldlijnen van de aarde neerbui- gen naar de polen, kunnen zonnwinddeeltjes de atmosfeer binnendringen. Deze laten atomen naar beneden kaatsen, die de spectaculaire poollichteffecten veroorzaken. Bovenin de atmosfeer produceren de waterstofionen van de zonne- wind zelf een roze waas. Verder naar beneden produceren zuurstofionen een robijnrode gloed, terwijl stikstofionen in

de stratosfeer paarsblauwe en rode lichtstralen veroorzaken. Soms worden magnetische veldlijnen in de zonnewind dicht tegen die van de aarde gedrukt, waardoor ze zich aaneensluiten, met een vaak spectaculaire uitstoot van energie, die het poollicht versterkt.

### **De kwetsbare sluier**

Er is geen duidelijk afgebakende hoogte die de top van de atmosfeer markeert. Op 260 kilometer boven de grond, in de lage baan om de aarde waar de spaceshuttle vliegt, ben je boven vrijwel alle lucht en is de druk een miljard keer minder dan op de grond. Maar er zijn hier nog steeds zo'n miljard atomen per kubieke centimeter. Deze zijn heet en elektrisch geladen en kunnen een schadelijk effect hebben op ruimtevaartuigen. In periodes van maximale zonneactiviteit dijt de atmosfeer iets uit en oefent hij meer wrijvingsweerstand uit op lager vliegende ruimteschepen. Die moeten dan worden versneld om ze in hun baan te houden. De bovenste atmosfeer, boven de 80 kilometer, wordt vanwege de hitte ook wel 'thermosfeer' genoemd, al is hij zo ijl dat je je huid er niet aan zou verbranden.

Deze zone van de atmosfeer absorbeert ook gevaarlijke röntgenstralen en enige uv-straling van de zon. Hierdoor raken veel atomen 'geïoniseerd', dat wil zeggen dat ze een elektron verliezen. Daarom wordt de thermosfeer ook wel 'ionosfeer' genoemd. Omdat de ionosfeer elektrisch geleidend is, reflecteert hij bepaalde frequenties van radiogolven, zodat het mogelijk is om, ver voorbij de horizon van een zender, kortegolfradiosignalen over de hele wereld te zenden,.

Onder de thermosfeer, in de mesosfeer en het grootste deel van de stratosfeer, op slechts 20 kilometer hoogte, bevinden we ons nog altijd boven 90% van de lucht in de atmosfeer. Rond deze hoogte vinden we de dunne ozonlaag, bestaande uit zuurstofmoleculen met drie atomen. Ozon ontstaat als gewone zuurstofmoleculen van twee atomen door zonnestra-

ling worden gesplitst en sommige atomen zich herschikken in drietallen. Ozon is een zeer effectief zonnescherm voor de planeet. Als alle ozon in de aardatmosfeer werd geconcentreerd op grondniveau, zou het een laag van slechts 3 mm dik vormen. Maar toch filtert deze laag de gevaarlijkste uv-straling van de zon (de uv C) vrijwel geheel uit en ook het meeste van de uv B (middellange-golfstraling). Op die manier beschermt de ozonlaag het leven tegen zonnebrand en huidkanker. De ozonlaag is ernstig aangetast door chemicaliën als cfk's (chloorfluorkoolstofverbindingen), die vrijkomen bij menselijke activiteiten. Deze leiden tot een algehele verdunning van de laag en zelfs tot gaten boven de poolstreken. Door internationale verdragen is de uitstoot van cfk's verminderd en zou de ozonlaag zich moeten herstellen, maar de chemicaliën zijn taai en het zal nog enige tijd duren voor het zover is.

### **Cirkels en cycli**

In de laagste 15 kilometer van de atmosfeer, de troposfeer, vindt de meeste activiteit plaats. Hier wordt het weer bepaald. Hier vormen en verspreiden zich wolken en waait de wind, waardoor warmte en vocht over de planeet worden verplaatst. Bij een dynamische planeet als de onze blijkt alles in cirkels en energiestromen te verlopen. En hier, dicht bij het oppervlak, worden die cycli gedreven door zonnekracht. Je hebt de duidelijke cycli van dag en nacht, als de aarde rond zijn as wentelt en de grond afwisselend opwarmt en afkoelt, en je hebt de jaarlijkse cyclus van de seizoenen, als de aarde om de zon draait en eerst het ene halfmond meer zonlicht ontvangt en vervolgens het andere. Maar er zijn ook langere cycli, zoals de schommeling van de aardas in een periode van tienduizenden jaren.

Zoals de aarde om de zon draait, zo draait de maan om de aarde. Hij doet daar circa 28 dagen over, wat ons onze maanden oplevert. Terwijl de aarde rond zijn as wentelt, trekt de zwaartekracht van de maan aan de watermassa in

de zeeën op aarde en ontstaan de getijden. Die zwaartekracht werkt ook als een rem op de draaiing van de aarde en laat de daglengte geleidelijk toenemen. Dagelijkse groeibanden in koraalfossielen van 400 miljoen jaar oud suggereren dat de dagen destijds enkele uren korter waren dan nu.

De maan helpt om de baan van de aarde, en dus ook het klimaat, te stabiliseren. Maar er zijn ook veel langere cycli aan het werk. De baan van de aarde om de zon is geen perfecte cirkel maar een ellips, met de zon op een van de twee focuspunten. Dat betekent dat de afstand van de aarde tot de zon tijdens die baan varieert. En de graad van die variatie zelf (de excentriciteit) verandert en doorloopt een cyclus van 95.800 jaar. De draaias van de aarde vertoont een lichte schommeling (precessie), als een tol die uit balans is, en beschrijft in een periode van 21.700 jaar een complete kegel. Op dit moment is de aarde het dichtst bij de zon gedurende de winter op het noordelijke halfrond. Ook de hellingshoek van de aardas ten opzichte van zijn baan om de zon (de obliquiteit) verandert, en wel in een cyclus van 41.000 jaar. De effecten van al deze zogenaamde Milanković-parameters stapelen zich in tien- of honderdduizenden jaren op en beïnvloeden het klimaat. Ze zijn wel gezien als de oorzaak van fenomenen als de ijstijden die de aarde in de laatste drie en een kwart miljoen jaar hebben geteisterd. Maar waarschijnlijk is de realiteit nog complexer en worden die cyclische effecten versterkt of afgezwakt door factoren als oceaanstromen, wolkenvorming, atmosferische samenstelling, vulkanische aerosols, het verwerken van gesteente, biologische productiviteit, enzovoort.

### Zonnecycli

Niet alleen de aarde is onderhevig aan cycli van verandering. Ook de zon verandert. In de 5 miljard jaar dat de zon bestaat, is hij steeds warmer geworden. De oppervlaktetemperatuur op aarde is echter min of meer constant gebleven omdat de hoeveelheid broeikasgassen in dezelfde periode daalde.