



De kernreactor onder onze voeten

Onderzoekers hebben nog geen zekerheid welke warmtebron het aardmagneetveld aandrijft dat ons beschermt tegen kosmische straling. In navolging van een sceptisch bekeken Amerikaanse wetenschapper, denkt de Groningse kernfysicus Rob de Meijer dat er een nucleaire reactor in het centrum van de Aarde zit. Om dat te bewijzen wil hij een antineutrino-detector bouwen onder Curaçao.

Marcel Crok



Onder onze voeten De Sudbury Neutrino Observatory, ruim twee kilometer onder de grond in Ontario, detecteert neutrino's afkomstig van de Zon. Soortgelijke detectoren moeten in de toekomst ook antineutrino's uit het binnenste van de Aarde opvangen. Het zou het bewijs kunnen leveren voor de aanwezigheid van een kernreactor aldaar.

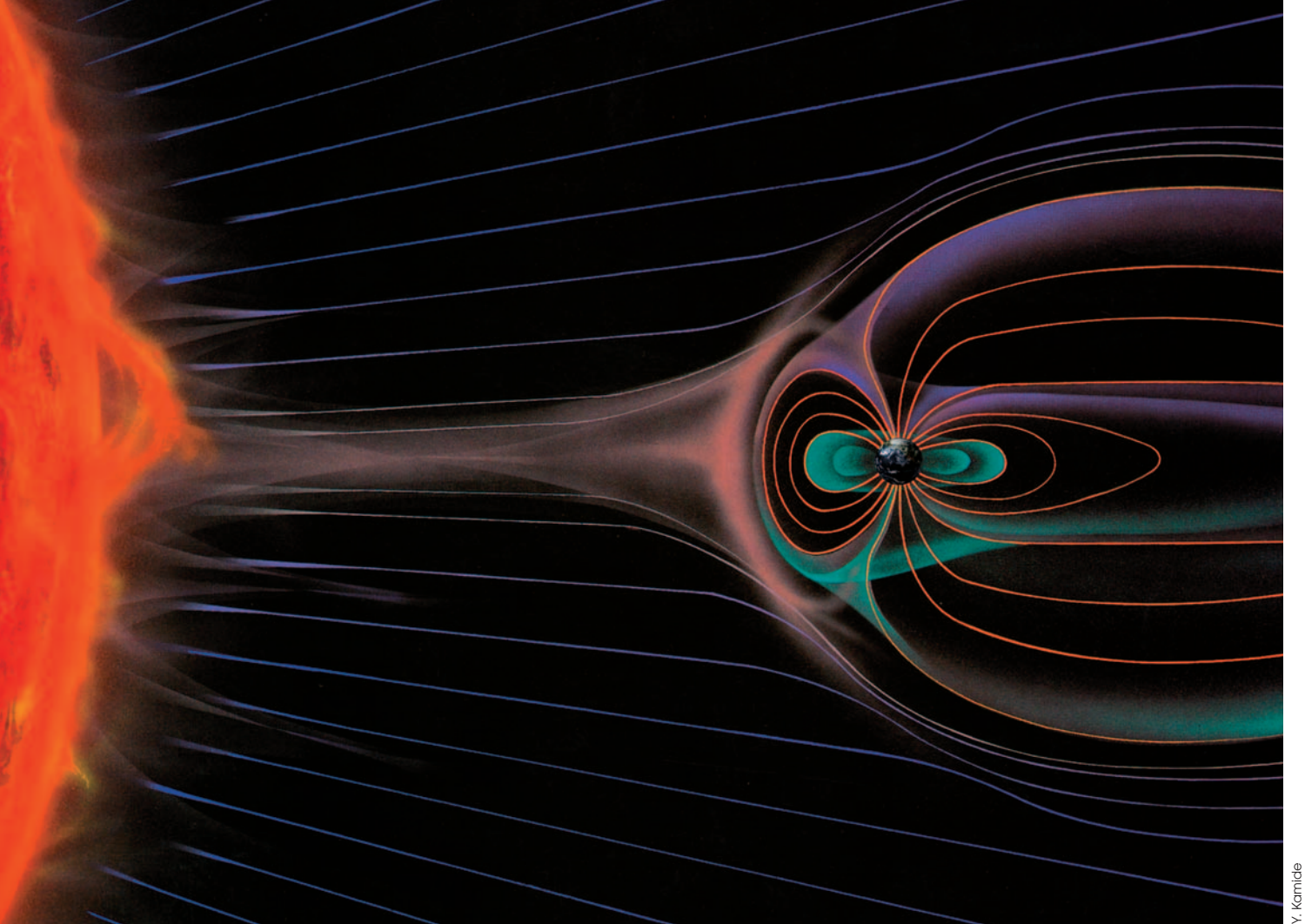
Dertig mensen in een Amerikaanse stad vallen zomaar dood neer. Hun pacemaker heeft het begeven. In het centrum van Londen vliegen duizenden duiven dwars door winkelramen en belemmeren automobilisten het zicht. Chaos en paniek alom. Een ruimteveer raakt bij het binnenvliegen van de dampkring honderden kilometers uit koers. De bemanning weet zich te redden door te landen in een drooggevalle rivier in Los Angeles.

Na een paar minuten is duidelijk dat de Hollywoodproductie *The Core* een niet al te denderende sciencefictionfilm is. De held van het verhaal, een geofysicus, legt aan de Amerikaanse legertop uit dat het binnenste van de Aarde tot stilstand moet zijn gekomen, waardoor het aardmagneetveld aan het verdwijnen is. Met een spuitbus, een aansteker en een perzik laat hij zien wat er dan gebeurt: microgolven en radioactieve straling afkomstig van de Zon zullen de Aarde totaal verschoeien.

Gewapend met atoombommen ondernemen 'terranauten' – die in tegengestelde richting reizen van kosmonauten – een tocht naar het binnenste van de Aarde waar ze met kernexplosies het vloeibare deel van de kern weer in beweging brengen en daarmee het aardmagneetveld weer opwekken. Eind goed al goed. Het is tenslotte Hollywood.

Omklappen Weinig filmkijkers zullen het in *The Core* geschetste scenario erg serieus nemen. Toch kan het wetenschappelijk gezien niet zo gemakkelijk worden afgeschoten. Desondanks zat geofysicus Gary Glatzmaier van de University of California vorig jaar tandenknarsend in de bioscoop. “Paramount Pictures liet mij vooraf het script lezen, maar mijn aanmerkingen hebben ze niet meegenomen”, laat hij telefonisch weten. “In de film suggereert de hoofdpersoon dat de vaste binnenkern van de Aarde tot stilstand is gekomen en dat daardoor het aardmagneetveld verdwijnt. In werkelijkheid denken geofysici juist dat het precies andersom werkt. Het aardmagneetveld wordt opgewekt door bewegingen in het vloeibare deel van de kern, de buitenkern, en sleept de binnenkern mee. De binnenkern draait hierdoor zelfs een fractie sneller dan de rest van de Aarde. Pas als de vloeistofstromen in de buitenkern tot stilstand komen, zal het aardmagneetveld verdwijnen. Maar dat proces zou duizenden jaren duren en niet – zoals in de film – slechts een jaar.”

Wat wel klopt in het verhaal is dat het aardmagneetveld onze planeet beschermt tegen zogenaamde zonnewinden, wolken van hoogenergetische deeltjes afkomstig van de Zon. Vooral de elektronica van satellieten, radioverbindingen en energiecentrales is gevoelig voor deze straling. Eind oktober 2003 werd de Aarde nog getroffen door een flinke zonnestorm.



Y. Kamide

Obstakel Het aardmagneetveld oefent krachten uit op elektrisch geladen deeltjes afkomstig van de Zon. Op een afstand van ongeveer tien maal de straal van de Aarde worden zonnestormen afgebogen als water om de romp van een schip.

Radioverbindingen raakten verstoord en in sommige landen moest daardoor het vliegverkeer worden beperkt. Tot ver buiten de polaire streken (ook in Nederland) was het noorderlicht te zien dat ontstaat door botsing van het magneetveld van de zonnewolk met het aardmagneetveld.

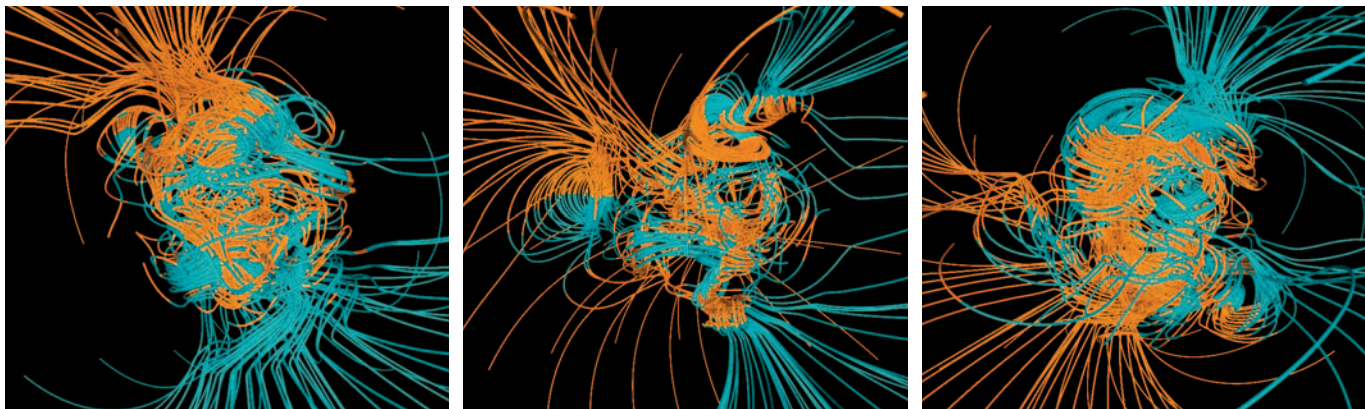
Glatzmaier: “Het belang van het aardmagneetveld wordt vaak flink overdreven, in de film zelfs tot in het absurde, maar ook in de media gebeurt het regelmatig. De atmosfeer beschermt ons namelijk ook tegen zonnestraling. Verder is het niet waar – wat wordt beweerd en niet alleen in de film – dat onze atmosfeer zou verdampen zonder aardmagneetveld. De planeet Venus heeft bijvoorbeeld geen eigen, beschermend magneetveld maar wel een atmosfeer.”

Geofysici maakten in december 2003 tijdens de jaarlijkse bijeenkomst van de *American Geophysical Union* in San Francisco wel bekend dat het aardmagneetveld de afgelopen 150 jaar tien procent in kracht is afgenomen. Veel Amerikaanse kranten besloten tot het plaatsen van sensationele koppen als ‘*Earth’s magnetic field is collapsing*’. Wetenschappers lieten zich verleiden tot gewaagde uitspraken als “in dit tempo zal het aardmagneetveld over 1500 tot 2000 jaar helemaal verdwenen zijn.”

Maar zo’n vaart zal het volgens Glatzmaier niet lopen. “Het aardmagneetveld fluctueert continu en klapt bij tijd en wijlen zelfs helemaal om. We weten dat uit de bestudering van gesteenten. Tijdens het ontstaansproces van gesteente richten magnetische ijzeroxide deeltjes zich namelijk naar het magneetveld. We zijn tot de conclusie gekomen dat de polen gemiddeld ongeveer iedere 300.000 jaar omklappen”, aldus de Amerikaanse geofysicus. “Die perioden zijn echter onregelmatig. De laatste keer dat het aardmagneetveld omklapte, is alweer 780.000 jaar geleden. Op dit moment is het aardmagneetveld juist vrij krachtig, ongeveer twee keer zo sterk als het gemiddelde over de afgelopen miljoen jaar.”

Het aardmagneetveld is vrij goed in kaart gebracht door enkele honderden meetstations op Aarde en satellieten rondom de Aarde. Maar veranderingen voorspellen is een ander verhaal. Daarvoor is nog veel te weinig bekend van het gebied waar het magneetveld wordt opgewekt: de buitenkern van het binnenste van de aarde.

Oceaan van ijzer Dankzij seismologisch onderzoek weten we dat de Aarde een soort ui is met diverse schillen. De bovenste – relatief dunne – laag van enkele tientallen kilometers heet de korst. Daaronder ligt de bijna 3000 kilometer dikke mantel. Daaronder bevindt zich de kern die een straal heeft van ruim 3480 kilometer (iets kleiner dan de Maan) en een temperatuur die overeenkomt met het oppervlak van de Zon.



Gary Glatzmaier

Door wereldwijd op duizenden plaatsen aardbevingsgolven op te vangen, ontdekten seismologen dat de kern moest bestaan uit een vaste binnenkern en een vloeibare buitenkern. Aardbevingstrillingen hebben namelijk twee componenten: p-golven, de drukgolven die in dezelfde richting trillen als ze zich voortbewegen, en de wat langzamere s-golven, die loodrecht op de voortplantingsrichting trillen. Deze s-golven planten zich niet voort in vloeistoffen. Bij aardbevingen werden er vaak wel p-golven geregistreerd maar geen s-golven. De trillingen moesten dus door een vloeistof zijn gegaan.

De meeste wetenschappers gaan ervan uit dat zowel het vaste als het vloeibare deel van de kern voor ongeveer 90% uit ijzer (met een beetje nikkel) bestaat en voor 10% uit lichtere elementen als silicium en zwavel. Over de exacte samenstelling van de lichtere elementen wordt nog volop getwist. De stroperigheid (viscositeit) van de vloeibare buitenkern is vergelijkbaar met die van water, en de dichtheid is ongeveer tien tot twaalf keer zo groot als die van water. Deze vloeibare oceaan van ijzer, met een temperatuur van zo'n vierduizend graden Celsius, is continu in beweging. Onderzoekers schatten dat de vloeistofsnelheid zo'n tien kilometer per jaar bedraagt. Deze stroming vormt de basis voor het aardmagneetveld.

Glatzmaier: "Omdat de buitenkern te vergelijken is met een dynamo, spreken we van een geodynamo. Bij een dynamo beweeg je een spoel door een magneetveld waardoor er een elektrische stroom gaat lopen. In het geval van de Aarde moet er in de buitenkern een klein magneetveld aanwezig zijn geweest om de boel op te starten. Dit veld heeft elektrische stromen opgewekt in het vloeibare ijzer en die stromen wekten op hun beurt weer een magneetveld op. Dit heeft zich doorgezet tot er een stabiele situatie ontstond. Relatief gesproken dan, want het aardmagneetveld is dus niet constant. Het wordt dan weer sterker en dan weer zwakker en verandert ook van oriëntatie."

Glatzmaier en zijn collega Paul Roberts hebben een computermodel gemaakt dat de situatie in de buitenkern zo goed mogelijk benadert. Op basis van dit model moet een supercomputer een jaar rekenen om te simuleren hoe het magneetveld in een periode van honderdduizenden jaren verandert. Glatzmaier: "De resultaten komen sterk overeen met wat we terugvinden in de geologische geschiedenis van de Aarde. De sterkte van het aardmagneetveld gaat op en neer, de magnetische polen verplaatsen zich en klappen zo nu en dan volledig om. Het omklappen van de polen neemt een paar duizend jaar in beslag en het veld verdwijnt nooit helemaal. Het wordt

Ommakeer Het computermodel van de Amerikaanse geofysicus Gary Glatzmaier simuleert veranderingen van het aardmagneetveld. De afbeelding links komt overeen met het huidige aardmagneetveld. Als het veld omklapt (midden) ontstaat er een chaotisch beeld. Op de rechter afbeelding is het omklappen voltooid.

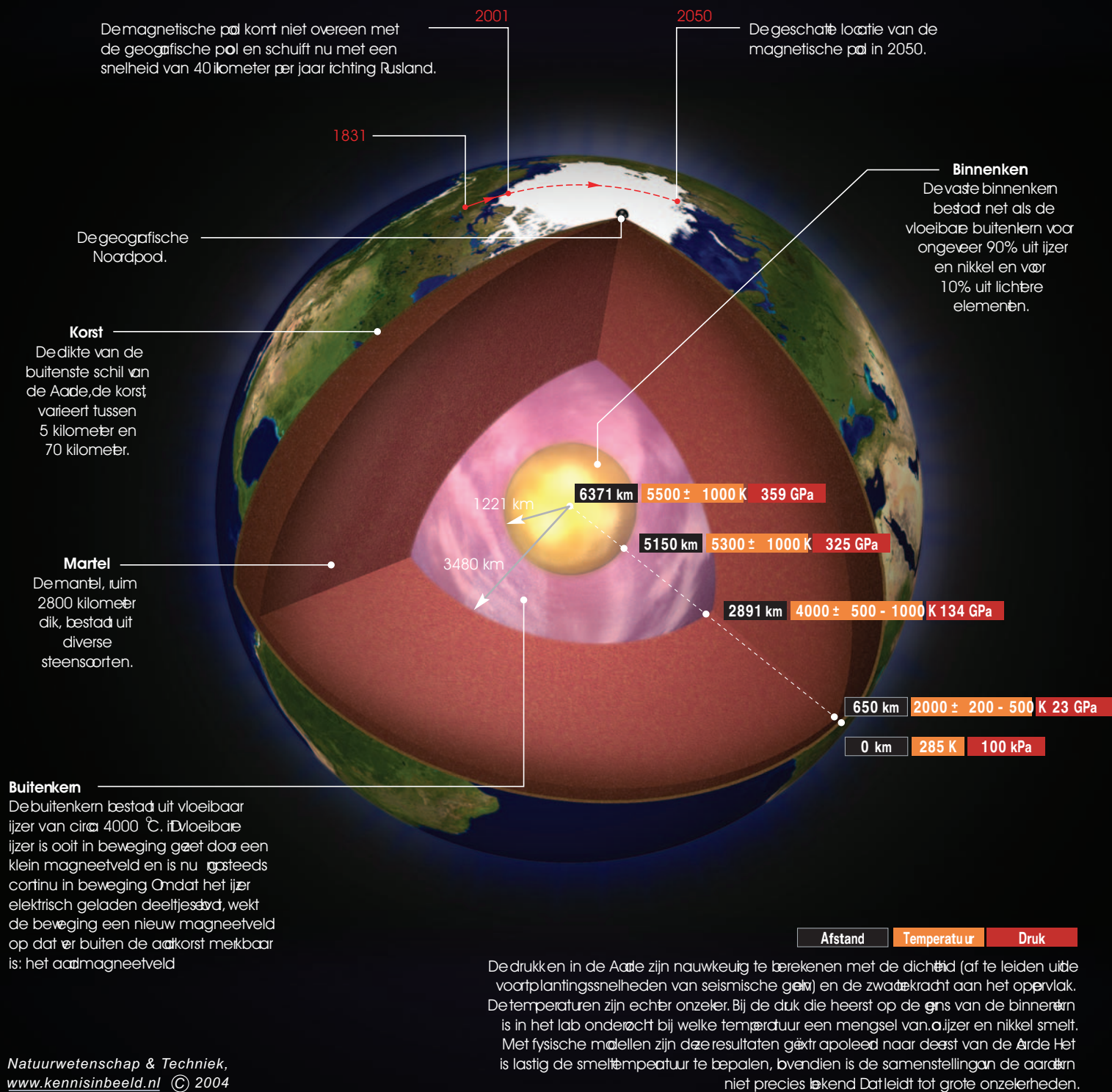
vooral complexer. Er kunnen polen verschijnen op de meest vreemde plaatsen. Een zuidpool kan opduiken boven Afrika en een noordpool boven Tahiti. Het magneetveld is dan tijdelijk een chaos, maar het is ook dan nog steeds een aardmagneetveld dat ons beschermt tegen de straling van de Zon."

Het verrast zelfs Glatzmaier en Roberts dat hun berekeningen zo goed overeenkomen met het patroon dat in gesteenten is terug te vinden. "We zijn namelijk gedwongen om met veel hogere waarden voor de viscositeit van het vloeibare ijzer te rekenen dan in werkelijkheid het geval is. We moeten het ijzer stroperiger maken omdat we anders veel meer roosterpunten nodig hebben, waardoor zelfs de krachtigste supercomputer er niet meer mee uit de voeten kan. Wij simuleren een laminaire stroming, maar in werkelijkheid zal de stroming in de vloeibare kern turbulent zijn."

Glatzmaier trekt een vergelijking met een tyfoon. "In de tyfoon heerst complete chaos, maar vanuit een satelliet zie je een grote bal rustig over de oceaan bewegen. Het lijkt erop dat de relatief rustige, macroscopische stroming van ijzer uit ons model volstaat om het aardmagneetveld te beschrijven."

Nucleaire georeactor De Aarde is zo'n viereneenhalf miljard jaar geleden – gelijk met de Zon – ontstaan door samenklontering van stofdeeltjes die waarschijnlijk niet warmer waren dan zo'n 700°C. De samenklontering die later de Aarde zou vormen, warmde op omdat er veel kortlevende, warmte producerende radioactieve deeltjes in zaten. Het werd zelfs zo warm dat de Aarde smolt. Onder invloed van dichtheidsverschillen trad er een scheiding op: de zware ijzersmelt (metalen) zakte naar beneden en de lichtere silicaatsmelt (gesteente) kwam boven drijven. Door die scheiding werd de kern van de Aarde metallisch, terwijl de mantel en de korst ook nu nog voornamelijk uit gesteente bestaan.

In het binnenste van de Aarde, waar de druk en de temperatuur het hoogst is, begon het ijzer na de scheiding langzaam te stollen. Bij een druk van ruim drie miljoen atmosfeer (1 atmosfeer = 100 kPa) in het centrum van de Aarde is



een temperatuur van zo'n 4000 à 5000°C laag genoeg om het ijzer te laten stollen. En dat stollingsproces gaat nog steeds door. Op de grens tussen de vloeibare buitenkern en de vaste binnenkern gaat ijzer over van de vloeibare naar de kristallijne fase. Daarbij komt – net als bij de overgang van water naar ijs – stollingsenergie vrij. De lichtere elementen in de ijzersmelt, zoals zwavel, gaan moeilijk mee naar de vaste fase. In de ijzersmelt ontstaat daardoor een oververzadiging van lichtere elementen die zich een weg omhoog banen. Deze opwaartse beweging in combinatie met de stollingsenergie is volgens de meeste geofysici voldoende om de geodynamo gaande te houden.

De vaste kern van de Aarde groeit nu nog met naar schatting 0,3 tot 1,0 millimeter per jaar. In dat tempo duurt het nog enkele miljarden jaren voordat de vloeibare kern helemaal gestold is. Pas dan zal het aardmagnetisch veld verdwijnen. Het leven op Aarde zal daardoor onder druk komen te staan, maar het betekent niet dat de Aarde direct een koude, dode planeet zal worden zoals de Maan. Ook op dit moment draagt de kern van de Aarde maar in bescheiden mate, zo'n 10%, bij aan de totale warmteproductie. Er zal voldoende warmte overblijven in de mantel om de Aarde nog een tijd lang geologisch actief te houden.

Het idee over de samenstelling van de Aarde is gebaseerd op slechts vijf meteorieten

De Amerikaanse geofysicus Marvin Herndon denkt echter dat er veel meer warmte vanuit de kern nodig is om het aardmagneetveld op te wekken. Hij lanceerde begin jaren negentig een afwijkende visie over het binnenste van de Aarde. Volgens Herndon zijn veel onbegrepen verschijnselen waaronder het aardmagneetveld te verklaren door aan te nemen dat er een kernreactor in het centrum van de Aarde zit. Deze georeactor zou een doorsnede hebben van acht kilometer en ongeveer 80% van het in de Aarde aanwezige uraan bevatten. “Deze reactor produceert zo’n drie tot zes terawatt (een miljoen keer een miljoen watt, red.) aan warmte. Dat is veel, maar ook weer niet krankzinnig veel, want het is ongeveer duizend keer het energieverbruik van Tokio”, laat de 59-jarige Herndon telefonisch vanuit zijn woonplaats San Diego weten.

Herndon had erop gerekend dat zijn theorie op veel verzet zou stuiten en dat er een wereldwijd debat onder geofysici zou losbarsten. Zijn visie werd echter totaal genegeerd. Herndon is daar zeer verontwaardigd over. “Zo zou het niet moeten gaan in dit vak. Wetenschap is te vergelijken met researchewerk. Als er een nieuwe verdachte is van een misdaad moet je checken of die de dader geweest kan zijn.” Al in 1979 schreef de Amerikaan een artikel waarin hij stelde dat de vaste kern van de Aarde niet uit ijzer en nikkel, maar uit nikkelsilicium-verbindingen bestaat. Inge Lehmann, de beroemde Deense geofysicus die in 1936 ontdekte dat de binnenkern van de Aarde vast is, liet Herndon per brief weten dat zij zijn argumenten overtuigend vindt. Maar verder namen weinig onderzoekers zijn theorie serieus.

Herndon besloot de academische wereld, waar volgens hem je vijanden je onderzoeksvoorstellen moeten beoordelen, de rug toe te keren en verdiende zijn geld als consultant in de mijnbouw. Ondertussen werkte hij op eigen kosten door aan zijn theorie over het binnenste van de Aarde. In de jaren negentig publiceerde hij enkele artikelen in het vrij prestigieuze tijdschrift *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS). In kleine lettertjes onder de artikelen staat echter dat het officieel om advertenties gaat. De auteur heeft betaald voor publicatie.

Het warme zuiden Het balletje gaat eigenlijk pas weer rollen voor Herndon als hij in 2002 in contact komt met redacteur Brad Lemley van het populair-wetenschappelijke tijdschrift *Discover Magazine*. Het leidt tot een omslagartikel over het levenswerk van Herndon in het nummer van augustus van dat jaar. Herndon: “Daardoor zijn ook wetenschappers buiten het vakgebied op de hoogte geraakt van mijn werk. Dat heeft een stroom aan nieuwe ideeën opgeleverd.”

Ook de Nederlandse hoogleraar prof dr Rob de Meijer

van het Kernfysisch Versneller Instituut in Groningen raakte geïnteresseerd in de theorie van Herndon. Met een flink kleurtje teruggekeerd uit Zuid-Afrika, waar hij gasthoogleraar is, komt De Meijer met de verrassende opmerking dat Herndon in 2003 een week lang te gast is geweest in Groningen. “We hebben hem stevig onder vuur genomen. Tot nu toe hebben we nog geen argumenten gevonden waarmee we zijn idee over de georeactor definitief naar het rijk der fabelen kunnen verwijzen”, aldus De Meijer. “Daarom willen wij de aanwezigheid van die georeactor experimenteel proberen aan te tonen.”

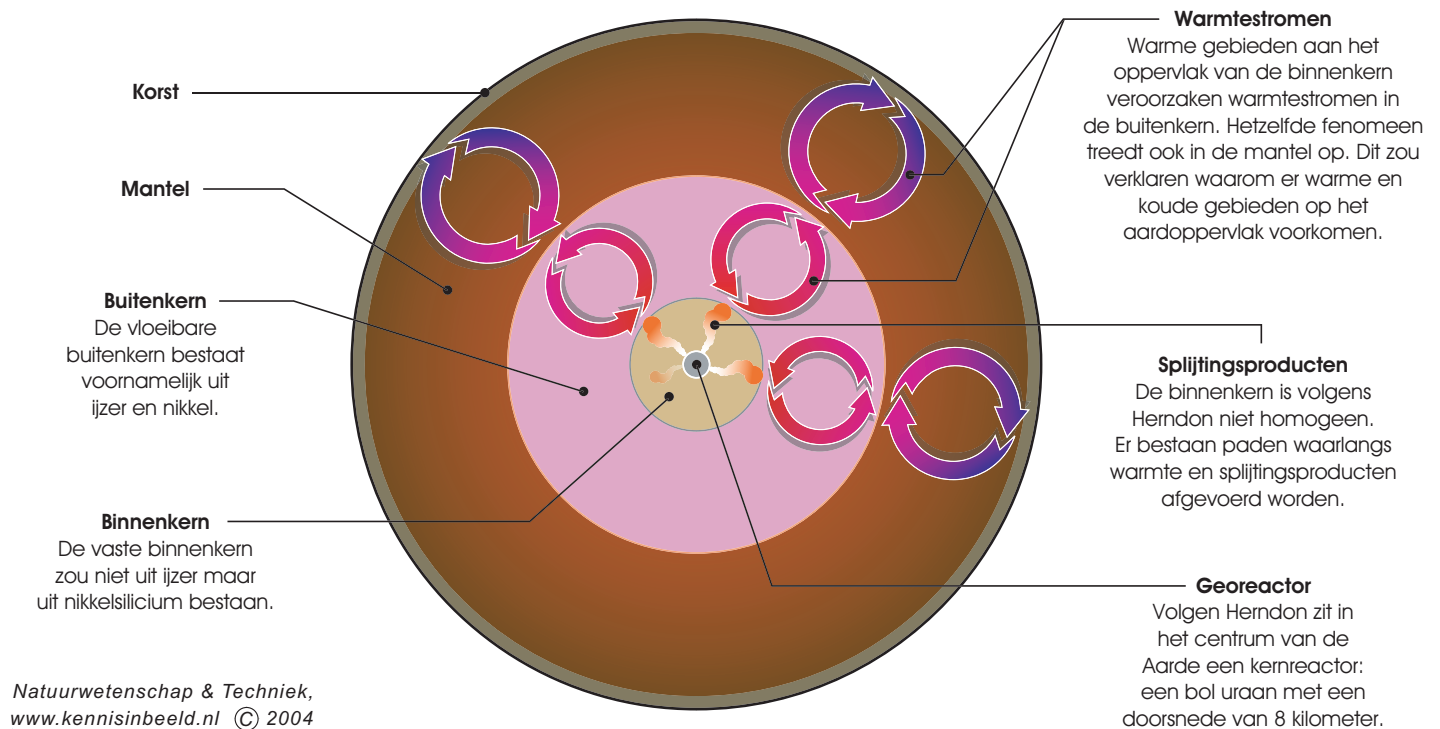
Maar dat is het probleem met het binnenste van de Aarde: probeer daar maar eens iets te meten. We weten eigenlijk heel weinig over onze eigen planeet. Terwijl we ruimtemissies miljarden kilometers op ontdekkingsreis het heelal insturen, zijn we onder onze eigen voeten fysiek niet verder gekomen dan zo’n vijftien kilometer. Dankzij seismologie die bestudeert hoe aardbevingsgolven zich voortplanten, hebben we een vrij helder beeld gekregen van de gelaagdheid van de Aarde. We kennen daarnaast de samenstelling van de korst en de pakweg bovenste tweehonderd kilometer van de mantel vrij goed, omdat de mantel op sommige plekken op Aarde omhoog is gekomen. Maar daaronder nemen de vraagtekens snel toe. De onzekerheidsmarge in de temperatuur loopt op tot circa duizend graden voor de kern. De exacte samenstelling van grote delen van de mantel en van de kern zijn niet bekend. Ook weten we niet welke structuur verbindingen zullen aannemen bij de veronderstelde druk van meer dan drie miljoen atmosfeer.

De totale warmtestroom uit de Aarde is aan het oppervlak goed te meten en is dan ook in kaart gebracht. Er komt zo’n veertig tot vijftig terawatt aan warmte uit de Aarde omhoog. Het zuidelijk halfrond blijkt veel meer ‘warme’ gebieden te tellen dan het noordelijk halfrond, en het verschil tussen de warmste en koudste gebieden bedraagt een factor tien. Hoe je de grote warmteverschillen aan het aardoppervlak kunt verklaren is nog niet duidelijk.

Enstatieten Een belangrijke bron van warmte in de Aarde vormen radioactieve elementen. De belangrijkste zijn uraan, thorium en kalium. Bij het natuurlijke verval van deze elementen komt warmte vrij. De concentratie uraan is het grootst in de aardkorst, namelijk in de orde van *parts per million* (ppm, wat neerkomt op milligram per kilogram). In de mantel neemt de concentratie af tot *parts per billion* (ppb, microgram per kilogram). In de kern is de hoeveelheid verwaarloosbaar, menen de meeste onderzoekers.

Hoe komt Herndon dan in hemelsnaam aan het idee

De Aarde volgens Herndon



van een bol uraan in het centrum van de Aarde? De Meijer: “De primitiefste meteorieten die wij op Aarde hebben gevonden zijn de zogenaamde C1-meteorieten. Zij behoren tot de grote groep koolstofrijke chondrieten. Er zijn vijf C1-meteorieten gevonden met een totaal gewicht van 17 kilogram, een verwaarloosbare hoeveelheid op het totale aantal meteorieten dat gevonden is. De samenstelling van deze stenen is echter nagenoeg gelijk aan die van de Zon. Omdat de Zon meer dan 99% van alle massa in ons zonnestelsel uitmaakt zijn onderzoekers er altijd vanuit gegaan dat de Aarde ook bestaat uit dit materiaal. Herndon vindt het bewijs voor deze hypothese echter niet overtuigend. Hij gaat ervan uit dat de Aarde voornamelijk gevormd is uit enstatieten, een andere zeldzame meteorietsoort, die nog niet bekend was toen de theorie van de chondritische Aarde werd opgesteld. De massaverhoudingen van de elementen in enstatiet komen volgens Herndon veel beter overeen met de massaverhoudingen van de Aarde.”

Daarna loopt het verhaal van Herndon volgens De Meijer als een trein. “Als het binnenste van de Aarde voornamelijk enstatitisch is, dan bestaat de vaste kern volgens Herndon niet uit ijzer, maar vooral uit nikkel en silicium. Uraan, dat zwaar is, zal tijdens het scheidingsproces van de jonge Aarde, meegegaan zijn met nikkel en silicium en zich dus nu in het centrum van de Aarde bevinden. Een sterk punt in de theorie van Herndon is dat het een mogelijke verklaring geeft voor het regelmatig omklappen van het aardmagnetisch veld”, meent De Meijer. “Bij de kernsplijting die zou optreden in de georeactor die Herndon veronderstelt, komen splijtingsproducten vrij. Die producten vangen neutronen in waardoor de reactor tot stilstand komt. Deze splijtingsproducten zijn lichter dan uraan en

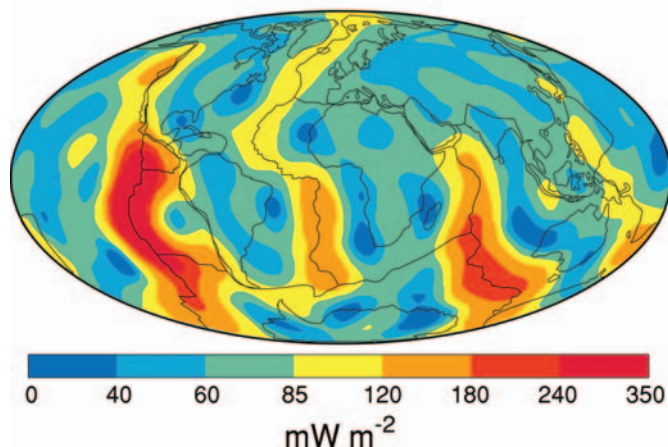
zullen daardoor langzaam van de kern weg drijven. Zijn ze eenmaal ver genoeg verwijderd, dan kan de reactor weer op gang komen. Dat kan het alternerende karakter van het aardmagnetisch veld verklaren.”

De Meijer heeft zitten rekenen aan de diffusie van de splijtingsproducten, maar komt nog niet tot een bevredigend antwoord. De Meijer: “Onder de veronderstelde druk in de kern duurt het ongeveer een miljoen jaar voordat de reactor weer op gang komt. Dat is te lang, want het aardmagnetisch veld klappt gemiddeld iedere 200.000 jaar om.” De Meijer denkt dat de kern mogelijk niet homogeen is, zodat er paden zijn waarlangs zowel de warmte als de splijtingsproducten sneller afgevoerd worden. “Er ontstaan dan warmtepluimen in de binnenkeren die zorgen voor relatief hete plekken op de grens van de binnen- en buitenkeren. Door die hete plekken ontstaan er convectiepatronen in de vloeibare kern en die leveren dan het aardmagnetisch veld op.”

Maar volgens Gary Glatzmaier en ook de Utrechtse geofysicus dr Arie van den Berg heb je helemaal geen temperatuurverschillen nodig op de grens van de binnenkeren en buitenkeren om convectie in de buitenkeren te krijgen. Van den Berg: “De vloeibare kern heeft een vrij lage viscositeit. Er is weinig voor nodig om daarin heftige convectiestromingen op gang te houden. Kleine lokale variaties in temperatuur of chemische samenstelling zijn daarvoor al voldoende.”

Gabon Ook geochemici hebben grote bezwaren tegen het wereldbeeld van Herndon en De Meijer. Volgens emeritus hoogleraar geochemie prof dr Olaf Schilling van de Universiteit Utrecht is het uitgesloten dat de kern van de Aarde een niet-homogene bol is, waarin geleidende paden bestaan voor

Heat Flow



Pollack, H.N., Hurter S.J. and Johnson, J.R.: *Reviews of Geophysics*, 1993.

Volgens Herndon en De Meijer kan een kernreactor in het centrum van de Aarde verklaren waarom er zulke grote warmteverschillen aan het aardoppervlak voorkomen. De meeste geofysici geloven echter niet in warmtestromen die vanuit de kern helemaal doorlopen naar het aardoppervlak. Arie van den Berg is een van die criticasters: "De warmtestromen in het vloeibare deel van de kern zijn zeer heftig in vergelijking met die in de mantel. De twee warmtestromen zijn daarom naar mijn mening niet gekoppeld zoals de tekening suggereert."

splijtingsproducten en warmte. Hij gelooft bovendien niet dat – zelfs als je ervan uitgaat dat de Aarde enstatitisch is – silicium in metallische vorm in de kern zou kunnen voorkomen. Schuiling: "De kern van de Aarde is metallisch en de mantel en de korst bestaan vooral uit silicaten, ofwel gesteenten. In meteorieten komt ijzer niet in de pure vorm voor, maar het kost niet veel energie om er ijzer uit vrij te maken. Enstatiet bestaat vooral uit MgSiO_3 en is dus een magnesiumsilicaat. Het is energetisch helemaal niet gunstig om silicium hieruit vrij te maken. Het is geochemisch gezien een bijna onmogelijk scenario om silicium in ongebonden vorm in de kern te krijgen." Ook de Franse geochemicus Francis Albarède uit Lyon heeft bezwaren tegen de georeactor. "Als je zoveel uraan in de kern zou hebben, dan komen er ook andere nog zwaardere elementen voor, zoals lood en bismut. Lood vangt neutronen in, wat de reactor tot stilstand zou brengen."

Maar Herndon voelt zich gesteund door vondsten uit 1972 in het Afrikaanse Gabon. Franse onderzoekers ontdekten er splijtingsproducten in een laag uraan. Zij kwamen tot de conclusie dat het uraan een natuurlijke kernreactor gevormd moest hebben. Twee miljard jaar geleden werd de reactor vermoedelijk uitgedoofd door een tekort aan water. "Allemaal leuk en aardig", zegt Albarède, "maar voor een werkzame kernreactor gebruiken we tegenwoordig verrijkt uraan, dat wil zeggen uraan dat voor 4% uit ^{235}U bestaat en voor de rest uit ^{238}U . Van nature bestaat echter nog maar 0,7% van het uraan uit ^{235}U . Lang geleden is dit percentage wel hoger geweest, maar ^{235}U vervalft vijf keer sneller dan ^{238}U . Drie miljard jaar geleden was de concentratie ^{235}U wellicht groot genoeg voor een na-

tuurlijke kernreactor, maar de vraag is hoe je nu in de kern van de Aarde nog aan voldoende ^{235}U kan komen."

De Meijer heeft tegen dit laatste argument wel weer wat in te brengen: "Herndon gaat ervan uit dat de reactor een zogenaamde kweekreactor is. In zo'n reactor wordt ^{238}U continu omgezet in ^{235}U door het invangen van neutronen. Uit simulaties van Herndon blijkt dat de concentratie ^{235}U dan wel degelijk in de buurt van die 4% kan liggen."

Dr Wim van Westrenen, die ooit colleges volgde bij Schuiling in Utrecht, en tegenwoordig onderzoeker is bij het *Institut für Mineralogie und Petrographie* in Zürich, acht het ook erg onwaarschijnlijk dat er hoge concentraties uraan of thorium in de kern zitten. De komende maanden gaat hij met hoge-drukexperimenten onderzoeken of die scepsis juist is. Van Westrenen was na zijn promotie twee jaar lang postdoc in het geofysische laboratorium van het *Carnegie Institution of Washington*, de bakermat voor hoge-drukexperimenten in de geologie. Bij hoge-drukexperimenten persen onderzoekers een kleine hoeveelheden kunststeen samen tussen twee diamantjes. Van Westrenen: "De kern van de Aarde nabouwen in het lab lukt niet omdat het tegelijkertijd bereiken van hoge drukken en hoge temperaturen erg lastig is. We komen niet verder dan halverwege de mantel. De drukken en temperaturen in de kern, meer dan drie miljoen atmosfeer bij duizenden graden Celsius, kunnen we in het lab nog niet nabootsen."

In Washington onderzocht Van Westrenen de oplosbaarheid van kalium in ijzerlegeringen bij hoge druk en temperatuur. Kalium is naast uraan en thorium het derde belangrijke radioactieve element dat in de Aarde warmte produceert. "Uit die experimenten bleek dat kalium wel degelijk in de ijzer-smelt kan zitten en dus ook kan voorkomen in de kern. We denken daarmee zo'n 10% van de warmte uit de kern te kunnen verklaren. Op dit moment zijn we bezig soortgelijke experimenten te doen met uraan en thorium, maar deze elementen hebben een nog grotere voorkeur voor silicaten dan kalium, en ik verwacht dus niet dat we veel uraan en thorium in ijzer zullen aantreffen." Herndon schiet met deze experimenten naar eigen zeggen weinig op. "Ik ga er juist van uit dat de vaste kern uit nikkel en silicium bestaat en wil dus dat ze gaan meten in hoeverre radioactieve elementen onder hoge druk kunnen oplossen in een nikkelsilicium-verbinding. Er is echter geen enkel hoge-druklab dat dat lijkt te willen testen."

Van Westrenen is het echter wel eens met Herndon dat het onwaarschijnlijk is dat de Aarde alleen maar uit koolstofrijke chondrieten bestaat. "Van Venus en Mars weten we in-



Detector De detectie van neutrino's vindt plaats in gigantische bollen die gevuld zijn met zwaar water, chloor of gallium. De detector die Rob de Meijer voor ogen heeft is niet bolvormig maar langwerpig. Alleen antineutrino's die er in de lengterichting invallen worden gedetecteerd.

ONS

middels dat ze niet uit koolstofrijke chondrieten bestaan. Ook voor de Aarde vormen koolstofrijke chondrieten geen sluitende verklaring. De verhoudingen van stabiele isotopen van zuurstof, het meest voorkomende element op Aarde, komen bijvoorbeeld niet overeen met die in koolstofrijke chondrieten, maar wel met die in enstatieten. Ook bevatten koolstofrijke chondrieten geen metaalfase, terwijl de kern van de Aarde metallisch is. Maar ook enstatieten bestaan grotendeels uit ijzerverbindingen. Er zijn wel enstatieten gevonden met nikkel-silicium-verbindingen, maar het gehalte aan nikkel-silicium daarin is erg klein. We moeten eerst meer weten over de werkelijke samenstelling van de kern voordat we naar de specifieke eigenschappen van nikkel-silicium-verbindingen gaan kijken."

Antineutrino's "Er is maar één conclusie mogelijk", zegt Rob de Meijer naar aanleiding van de discussies. "We moeten een detectiemethode ontwikkelen waarmee we het al dan niet bestaan van de georeactor experimenteel kunnen aantonen. Sinds kort hebben we een aanknopingspunt: bij kernsplijting komen namelijk zogenaamde antineutrino's vrij, spookachtige deeltjes die dwars door de Aarde vliegen en nauwelijks reageren met materie. Een georeactor in het centrum van de Aarde zal grote hoeveelheden antineutrino's produceren."

Antineutrino's hebben de afgelopen decennia in de schaduw gestaan van neutrino's. De komende twintig jaar gaat dat veranderen, als het aan De Meijer ligt. Zowel neutrino's als

antineutrino's zijn elementaire deeltjes zonder lading. Neutrino's komen vrij bij kernfusie in het binnenste van een ster. Antineutrino's ontstaan bij kernsplijting en ook bij verval van radioactieve elementen. De Meijer: "Aardwetenschappers zijn erg geïnteresseerd in de verdeling van de radioactieve elementen uraan, thorium en kalium in de Aarde. Het spectrum van antineutrino's die het gevolg zijn van radioactief verval verschilt van dat van antineutrino's afkomstig van een eventuele georeactor. Met een antineutrinodetector kunnen we beide detecteren."

De Aarde wordt aan de zonzijde continu gebombardeerd door neutrino's afkomstig van de Zon. Het zijn er iedere seconde naar schatting zo'n 70 miljard per vierkante centimeter. De meeste verlaten ongehinderd weer de achterzijde van onze planeet. Er zijn echter enkele verbindingen – water, chloor en gallium, die heel af en toe reageren met een neutrino. Neutrinodetectoren bestaan daarom uit enorme bollen gevuld met deze vloeistoffen. Er zijn momenteel ondergrondse neutrinodetectoren in gebruik in Japan, Italië, Canada en Rusland. Ze staan onder de grond om geen last te hebben van andere kosmische straling. "Met de KamLAND neutrinodetector in Japan hebben ze ook antineutrino's gemeten", aldus De Meijer. "Probleem is alleen dat er veel kerncentrales in de buurt zijn, zowel in Japan als in Zuid-Korea, die antineutrino's produceren. De antineutrino's uit de Aarde, ook wel geoneutrino's genoemd, worden overstemd door deze kunstmatige stroom antineutrino's. Met de huidige detectoren is het bovendien niet mogelijk om te bepalen uit welke richting een antineutrino komt."

Toch moet dit met een aanpassing van de detectoren wel mogelijk zijn. De reactie die het antineutrino aangaat met een proton in de vloeistof verloopt namelijk in twee stappen. Bij de eerste stap komt er een lichtflits vrij van een positron, een positief geladen elektron. Zo'n 0,2 milliseconde later volgt een tweede lichtflits, afkomstig van een neutron. De Meijer: "De lichtflitsen komen zo'n vijf à tien centimeter uit elkaar te liggen. In principe kun je dan bepalen op welke lijn ze liggen." In principe dus, maar de bolvormige neutrinodetectoren die tot nu toe gebouwd zijn, zijn hier niet geschikt voor.

Het Beverwijkse onderzoeksbureau *Focus Oil & Gas Group* kwam echter met een originele oplossing. De Meijer: "Zij stellen een detectoropstelling voor die lijkt op een paraplu die door de harde wind is omgeklapt. De steel van de paraplu is de centrale gang naar beneden, de Aarde in. Vanaf een geschikte diepte, waar we geen last meer hebben van kosmische straling, worden onder diverse hoeken zijgangen naar beneden geboord. In die gangen komen geen bolvormige, maar meer

langwerpige detectoren te hangen. Alleen antineutrino's die in de lengterichting van de gang aankomen worden door de detector gemeten. Van antineutrino's die van de zijkant binnenkomen zien we misschien wel de eerste lichtflits, maar de tweede lichtflits valt dan buiten de detector."

De Meijer verwacht dat de bouw van zo'n ondergrondse antenne vijf tot tien jaar in beslag kan nemen. Hij heeft wel al een geschikte locatie gevonden: Curaçao. De Meijer: "Het eiland is geologisch gezien geschikt om een schacht van een paar kilometer te boren. Het ligt bovendien ver verwijderd van de Amerikaanse kerncentrales, zodat je weinig last hebt van kunstmatig geproduceerde antineutrino's." Wat ook meespeelt is dat Curaçao Nederlands grondgebied is, wat noodzakelijk is voor financiering van een project door de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM), de belangrijkste geldschietster van natuurkundig onderzoek in Nederland.

Onlangs leverde De Meijer het projectvoorstel *Quest for a nuclear georeactor* af bij FOM. De Meijer zal echter geduld moeten hebben. Volgens woordvoerder Huub Eggen van FOM is voor de rest van 2004 geen geld meer beschikbaar voor nieuwe onderzoeksprogramma's. De Meijer hoopt dat zijn voorstel besproken zal worden in het meer-jarenoverleg van FOM. Maar ondertussen wil hij al wel starten met de eerste fase van het project, namelijk de bouw van een prototype van de detector. Voor dergelijke projecten moet FOM volgens hem nog wel geld hebben dit jaar.

Aanvankelijk dacht De Meijer dat de ondergrondse antenne op Curaçao wel een miljard euro zou gaan kosten, een budget dat in de buurt komt van dat van een ruimtemissie. Met de originele aanpak van de *Focus Oil & Gas Group* is dat bedrag echter teruggebracht tot zo'n 50 à 70 miljoen euro. De Meijer: "Uiteindelijk zal dat bedrag door meerdere landen opgebracht moeten worden, maar het zou mooi zijn als Nederland een voortrekkersrol krijgt. De focus zal liggen op de bepaling van de verdeling van radioactieve elementen in de Aarde. Het aantonen van de georeactor zou een schitterende bonus zijn." ■

Informatie

De site van Marvin Herndon
<http://nuclearplanet.com>

Gary Glatzmaier legt op zijn site uit hoe de geodynamo werkt.
<http://www.es.ucsc.edu/~glatz/geodynamo.html>