

Geoneutrino's onthullen

Het door Nederland geïnitieerde programma *Earth Antineutrino Tomography (EARTH)* is bedoeld om de warmtebronnen in het inwendige van de aarde in kaart te brengen door het meten van antineutrino's met een systeem van richtingsgevoelige detectoren. Het programma bevindt zich in de ontwerpfase en is met beperkte financiering van start gegaan. In dit artikel zullen we trachten een overzicht te geven van wat er op dit gebied nu al mogelijk is en hoe we het onderzoek denken te kunnen vervolgen. R.J. de Meijer, H.J. Wörtche, E.R. van der Graaf,

R.W. Fearick, F.D. Smit en R.G.E. Timmermans



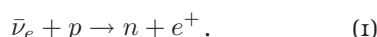
Rob de Meijer
demeijer@kvi.nl

De auteurs van dit artikel maken deel uit van een internationaal samenwerkingsverband. Heinrich Wörtche (KVI) en Ricky Smit (iThemba Labs) zijn beide experimentele kernfysici die werken aan de ontwikkeling van detectoren voor laag-energetische neutronen. Rodger Fearick (UCT) ontwikkelt als experimenteel fysisicus simulatieprogramma's voor de detectorontwikkeling. Emiel van der Graaf (KVI) werkt als nucleair geofysicus aan de

ontwikkeling van het antenneconcept en voor EARTH in het bijzonder aan de radiometrische eigenschappen van de ondergrond van Curaçao. Rob Timmermans is theoretisch fysisicus en ontwikkelt samen met geofysici simulaties voor de tomografische interpretatie van antineutrinodetectie in samenhang met mantelconvectorie. Onlangs hebben de Rijksuniversiteit Groningen, de Stichting ASTRON en de Stichting JADE

gezamenlijk de Stichting EARTH opgericht. De Stichting heeft zich tot doel gesteld het ontwikkelen en bevorderen van de wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen die kunnen leiden tot het in kaart brengen van de radiogene warmtebronnen in het inwendige van de aarde door het detecteren van antineutrino's. Rob de Meijer treedt na zijn emeritaat op als directeur van de Stichting EARTH.

In 1930 postuleerde Wolfgang Pauli het (anti)neutrino om het schijnbare verlies van impuls en energie in het radioactieve β -verval te kunnen verklaren. Bethe en Peierls realiseerden zich dat als het neutrino bestond, ook het inverse β -verval moest bestaan:



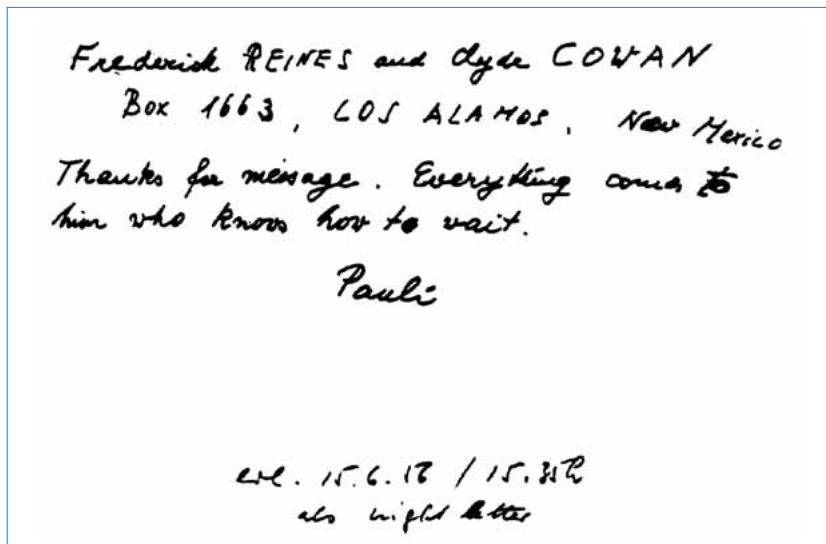
Uit de halveringstijd van het neutron leidde zij in 1934 af dat de werkzame doorsnede van een proton voor de vangst van antineutrino's met een

energie van een paar MeV ongeveer 10^{-44} cm² moest zijn. Deze uitkomst was voor Pauli aanleiding te verzuchten: "Ik heb iets vreselijks gedaan. Ik heb een deeltje gepostuleerd dat niet gemeten kan worden". Opgelucht schreef Pauli in 1956 als reactie op het bericht van Reines en Cowan dat het neutrino experimenteel bevestigd was; "Everything comes to him who knows how to wait", zie het briefje in figuur 1.

Deze woorden zullen ook gelden voor de weg naar het in kaart brengen van de locatie, sterkte en het type van radiogene warmtebronnen van de aarde met behulp van geoneutrino's (antineutrino's geproduceerd door het natuurlijke β -verval in de aarde). Dit is in principe mogelijk maar vereist op een aantal gebieden nog omvangrijke wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen.

GEONEUTRINO'S

Bij het β^- -verval wordt naast een elektron een elektron-antineutrino, $\bar{\nu}_e$, uitgezonden. Antineutrino's die bij dit proces in de aarde worden geproduceerd worden geoneutrino's genoemd. Deze geoneutrino's kunnen dus zowel afkomstig zijn van het β^- -



Figuur 1 Brief van Pauli in 1956 aan Reines en Cowan [1].

het binnenste van de aarde

verval van ^{40}K en de natuurlijke vervalreeksen van uranium en thorium, alsmede van het β^- -verval van splijttingsproducten van een hypothetische georeactor. Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste natuurlijke vervalprocessen, de maximale neutrino-energie en de warmteproductie [9]. De antineutrino's uit de vele splijttingsproducten van uranium en plutonium hebben een klokvormige energieverdeling met een maximum van ongeveer 10 MeV. Deze geoneutrino's zijn op basis van hun energie goed te onderscheiden van die uit de natuurlijke processen, die in tabel 1 zijn weergegeven.

Het idee om (anti)neutrino's te gebruiken voor het in kaart brengen van het inwendige van de aarde is al eerder voorgesteld [10,11]. Om de warmtebronnen te lokaliseren moeten antineutrino's niet alleen worden gedetecteerd, maar ook moet de richting waar ze vandaan komen worden bepaald. Voor deze neutrino's met lage energieën is dat nieuw.

Sinds de experimenten van Reines en Cowan is het duidelijk dat er grote detectoren nodig zijn om (anti)neutrino's te kunnen meten. Het merendeel van de experimenten is uitgevoerd met monolithische, niet-richtingsgevoelige detectoren waarin vangstproducten van antineutrino's in Cl of Ga worden gedetecteerd. De grote detectoren gevuld met water zoals Superkamiokande zijn wel richtingsgevoelig, gebaseerd op de Cerenkov-straling veroorzaakt door leptonen geproduceerd door hoogenergetische (anti)neutrino's. De richtingsgevoeligheid is sterk

energieafhankelijk en heeft als ondergrens circa 10 MeV.

Met het detecteren van laag-energetische antineutrino's is men oorspronkelijk begonnen om de fundamentele eigenschappen van antineutrino's te bestuderen, in het bijzonder de verandering van smaak (het type neutrino, elektronneutrino, muonneutrino of tauneutrino). Deze experimenten vonden plaats in Frankrijk (Bugey en Chooz) en in Japan (KamLAND). In die experimenten vindt de detectie van antineutrino's plaats via het inverse β -verval, zie (1).

Een van de grote uitdagingen voor alle antineutrino-experimenten is de signaal-achtergrondverhouding. Om de achtergrond zoveel mogelijk terug te brengen, heeft men voor vervolgonderzoek experimenten bij Chooz, Borexino (Italië) en KamLAND, gekozen voor monolithische bolvormige detectoren met grote inhoud. In deze opstellingen telt men alle lichtgebeurtenissen in de vloeistof met fotomultiplicatorbuizen. De efficiëntie van deze opstellingen is circa 30% en de positieresolutie voor antineutrinovangst bedraagt voor KamLAND circa 50 cm. Geen van deze detectoren heeft een noemenswaardige richtingsgevoeligheid.

Onlangs zijn met KamLAND geoneutrino's die zijn ontstaan bij het verval van uranium en thorium daadwerkelijk gemeten [12] en konden deze geoneutrino's worden onderscheiden van de hoge achtergrond van reactorantineutrino's afkomstig van de op circa 180 km gelegen Japanse kerncentrales. In Borexino is de reactorachtergrond

een stuk lager en lijken de acht geoneutrino's per jaar voor een detector van 300 ton reëel. Door het ontbreken van richtingsgevoeligheid valt niet te zeggen waar de geoneutrino's vandaan komen.

Warmteproductie van de aarde

Het leven op aarde is afhankelijk van een ongeveer gelijkmatige oppervlaktetemperatuur van de planeet. De geleidelijke daling van de interne warmte door de daling van de natuurlijke radioactiviteit in de tijd wordt gecompenseerd door een stijging van de warmte die ons bereikt van de zon. Ook de aanwezigheid van broeikasgassen maakt dat we hier kunnen zijn. De aarde wordt nog eens extra beschermd door het aardmagnetisch veld dat de dosis kosmische straling reduceert en ervoor zorgt dat onze atmosfeer niet wordt weggeblazen door de zonnewind.

Voor het instandhouden van het aardmagnetisch veld met een energie-inhoud van ongeveer 1 TW zijn in het binnenste van onze planeet warmtebronnen nodig [2,3]. Ook voor het instandhouden van de langzame maar gestage bewegingen, waarbij de continenten worden meegenomen op een circulatie van materiaal in de mantel van de aarde, is warmte nodig.

De warmteproductie van de aarde bedraagt circa 45 TW [4], waarvan minstens de helft en mogelijk zelfs alles [5] afkomstig is van radiogene bronnen. Men schat [2] dat 6 tot 12 TW in de aardkorst wordt geproduceerd door het radioactief verval van ^{40}K , en van kernen in de vervalreeksen van ^{232}Th en ^{238}U . Het is niet mogelijk de radiogene warmteproductie in de mantel en de kern in kaart te brengen, maar er zijn wel verscheidene hypothesen over die warmteproductie ontwikkeld. De meest algemeen aangehangen hypothese voor de mantel is dat de samenstelling overeenkomt met de verdeling van de elementen zoals die in chondritische meteorieten wordt aangetroffen. Voor de ijzer-nikkelkern zijn diverse hypothesen: er zou kalium aanwezig kunnen zijn [6] en er is zelfs de hypothese dat zich in het binnenste van de aarde een kweekreactor (georeactor) bevindt met een diameter van circa 8 km [7,8].

Tabel 1
Maximale antineutrino-energie en warmteproductie in natuurlijke vervalprocessen.

Vervalmodus	E_{max} (MeV)	Warmteproductie (W/kg)
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\ ^4\text{He} + 6\ e + 6\ \bar{\nu}_e$	3,26	$0,95 \cdot 10^{-4}$
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\ ^4\text{He} + 4\ e + 4\ \bar{\nu}_e$	2,25	$0,27 \cdot 10^{-4}$
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e + \bar{\nu}_e$	1,31	$0,38 \cdot 10^{-8}$

Op een aantal plaatsen in de wereld worden plannen voor nieuwe detectoren gemaakt. Een Europees plan is LENA, waarbij in een ondergrondse mijn een 40 kton detector is gepland, zonder wezenlijke richtingsgevoeligheid. Men verwacht met LENA zo'n 1600 geoneutrino's per jaar te kunnen detecteren [13]. Ook voor LENA is de achtergrond het voornaamste obstakel.

EARTH

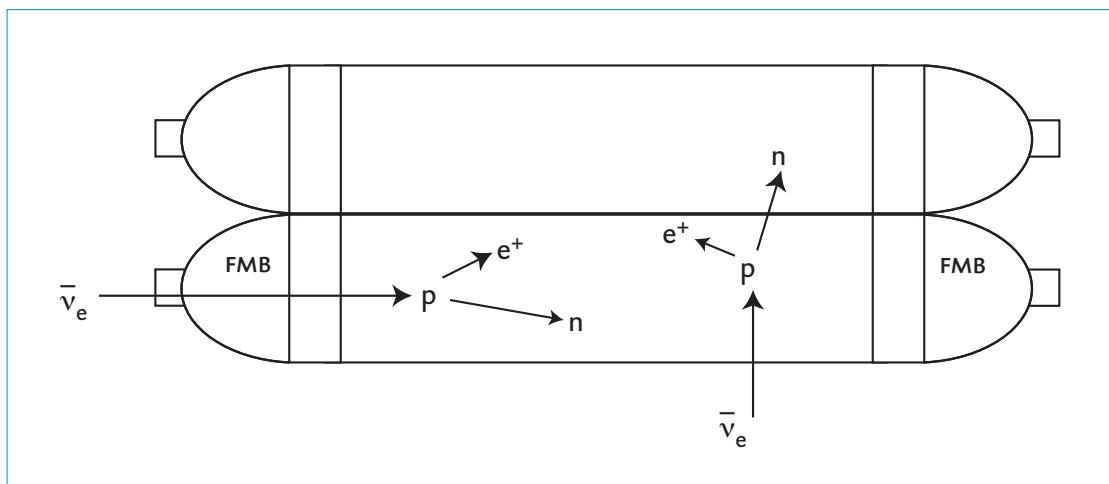
Met het programma *Earth Antineutrino Tomography* (EARTH) willen we de warmtebronnen in het inwendige van de aarde in kaart brengen door het meten van antineutrino's met een modulair systeem van detectoren met een

oplossend vermogen van 300 km voor warmtebronnen in het centrum van de aarde en ongeveer 150 km voor dergelijke bronnen op de grens van kern en mantel. Het volume van één antenne is ongeveer driemaal dat van KamLAND en het totale volume van de tien antennes is even groot als dat van LENA.

De vraag is nu of de doelstelling in principe haalbaar is en zo ja, welke technologische ontwikkelingen daarvoor nodig zijn. Voor LENA worden per jaar zo'n 1600 geoneutrino's verwacht voor een totale homogeen verdeelde radiogene bronsterkte van 20 TW. We veronderstellen gemakshalve dat er naast deze homogene bron een gelokaliseerde bron van 5 TW is op

Wat betreft de technologische ontwikkeling op detectorgebied leert de ervaring van Bugey en die van de grotere detectoren, dat de richtingsgevoelige detectorsystemen samengesteld dienen te zijn uit vele detectoren met een relatief kleine diameter. In een detector zoals wij die voorstellen, is aan het scintillatiemateriaal ^{10}B of ^6Li toegevoegd. Beide nucliden hebben een relatief grote werkzame doorsnede voor vangst van neutronen. In beide nucliden leidt neutronvangst tot uitzending van α -deeltjes die een vrijwel constante energie hebben.

Goed bekeken is de antineutrino-detectie voornamelijk een zaak van neutrontracking en daarmee een typisch laag-energetisch kernfysicaprobleem. In de



Figuur 2 Schematische voorstelling van twee elementen van een richtingsgevoelige antineutrino-detecteur (FMB = fotomultiplicatorbuis).

richtingsgevoeligheid van ongeveer 10° . Vanwege de gunstige ligging ten opzichte van achtergrondbronnen zoals kernreactoren en granietgesteenten, is voor de eerste antenne voorlopig Curaçao (12°N en 69°W) als locatie voor een antenne gekozen. Bij de beslissing speelt ook mee dat Curaçao deel uit maakt van het Koninkrijk der Nederlanden. Een eerdere beschrijving van het idee en de relatie tot het beantwoorden van geofysische vraagstukken is gegeven in [14]. Een zo'n antineutrino-antenne bestaat uit 4 kton scintillator. Met een stuk of tien van deze antennes over de gehele wereld verspreid, moet een richtingsgevoeligheid van circa 3° te behalen zijn. Een dergelijk systeem heeft een

de grens van mantel en kern op 30°Z ; 69°W . Met de veronderstellingen die ook in de LENA-berekeningen worden gebruikt, leidt dit tot een telsnelheid van ongeveer 80 geoneutrino's per jaar uit de richting van de bron plus 160 van de homogene verdeling. Het duurt dus een aantal jaren voordat er voldoende statistiek per antenne is, maar het effect zal duidelijk meetbaar zijn. Het beschikbaar komen van meerdere antennes bespoedigt het meetproces, kan de drempel voor de bronsterkte verlagen en de lokalisatie verbeteren. Qua telsnelheid is het dus in principe mogelijk het doel te verwezenlijken. De vraag of de beoogde richtingsgevoeligheid gehaald kan worden wordt verderop beantwoord.

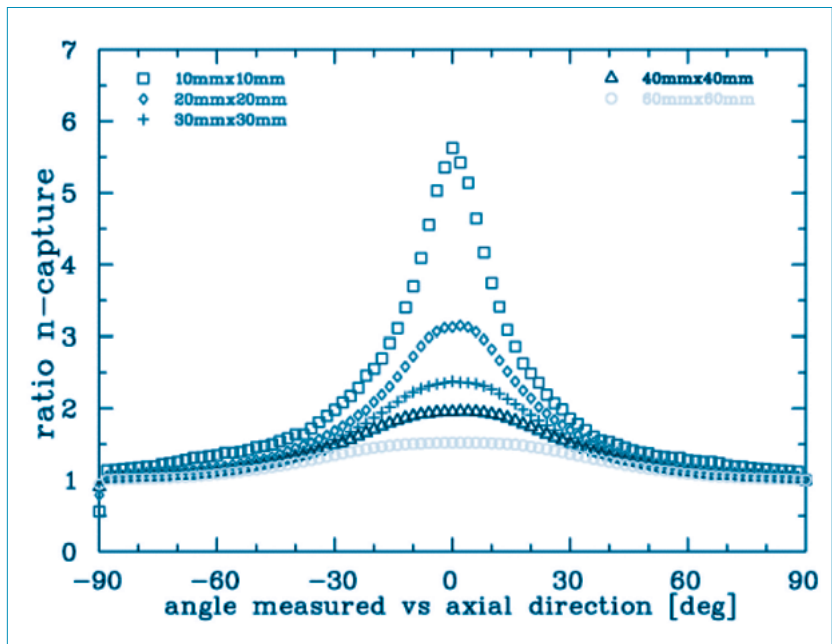
laatste vijf jaar is de neutrontracking weer in opkomst en vinden zeer nuttige ontwikkelingen plaats. Er is onvoldoende ruimte om hier op al deze aspecten in te gaan.

RICHTINGSGEVOELIGHEID

De voorwaarde voor een geldige gebeurtenis die veroorzaakt is door het inverse β -verval is de vertraagde coincidentie tussen de detectie van het positron en het neutron (zie (1)). Het positron wordt praktisch instantaan gestopt, het neutron pas na enige tijd (circa $1 \mu\text{s}$) nadat het enigszins is afgeremd door elastische botsingen met H-kernen en is ingevangen in ^6Li of ^{10}B . Bij dit invangen wordt een α -deeltje gevormd dat ter plekke wordt ge-

stopt. Figuur 2 geeft schematisch een tweetal detectoreenheden aan. Voor axiaal inkomende antineutrino's worden zowel het positron als het neutron in dezelfde detector gemeten. In de radiale richting wordt het neutron niet in dezelfde, maar in een naastgelegen detector gemeten. Uit het looptijdverschil van het licht in de linker en rechter fotomultiplicatorbuizen kan de positie van de twee coïncidente gebeurtenissen worden bepaald. Beide deeltjes moeten binnen een paar centimeter van elkaar gedetecteerd worden. Het tijdraam van ongeveer $2 \mu\text{s}$ voor de vertraagde coïncidentie en de locatie-eis zorgen voor een behoorlijke reductie van de toevallige coïncidenties. De toevallige coïncidenties worden nog verder onderdrukt door de eis dat de pulshoogte van het door de botsing van het neutron met het scintillatormateriaal veroorzaakte α -deeltje constant is en dat de pulsvorm van de twee pulsen overeen moet komen met hun verwachte signatuur. Al met al denken we dat een achtergrondonderdrukking van 10^8 tot 10^{10} haalbaar kan zijn. Ook de keuze van de locatie van de antenne kan de achtergrond reduceren. Omdat de ondergrond van Curaçao bestaat uit een laag-actief gesteente omgeven door water en ver weg van kerncentrales, kozen we voor deze plaats als eerste locatie voor een antenne.

Met computersimulaties zijn we nagegaan welke diameter onze detectoreenheden moeten hebben om een richtingsgevoeligheid van zo'n 10° te krijgen. Daarvoor nemen we een lange detector met een vierkante doorsnede en we berekenen de kans dat het neutron gedetecteerd wordt als een antineutrino is ingevangen. De berekeningen worden uitgevoerd voor een energiespectrum van de antineutrino's zoals die bij een reactor worden geproduceerd en voor een scintillatievloeistof met $5\% \text{ } ^{10}\text{B}$. De kinematica van de reactie [15] is in de simulaties meegenomen. Figuur 3 laat in het bovenpaneel zien dat de richtingsgevoeligheid snel daalt met een groter wordende doorsnede van de detector, maar ook dat een hoge richtingsgevoeligheid (kleinere diameter) ten koste gaat van de

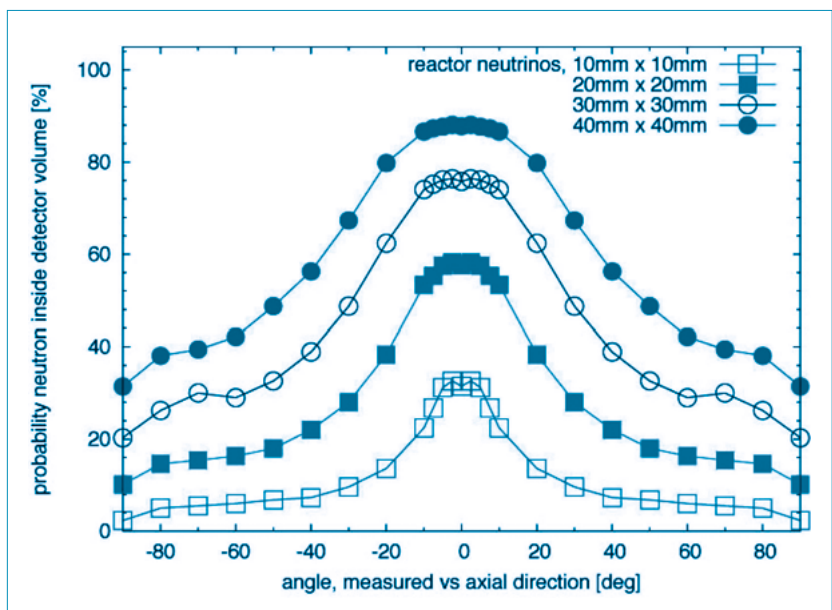


absolute detectiekans (onderpaneel) in een enkele detector. Er zal dus een samengestelde detectormodule nodig zijn om zowel de richtingsgevoeligheid, als de absolute detectiekans hoog te houden. Voor richtingsgevoeligheden van 10° zijn daarom detectoren van 1 cm^2 doorsnede nodig. Een antenne bestaat dus uit enkele tientallen miljoenen detectoreenheden verdeeld over ettelijke modules. Dit zeer grote aantal eenheden stelt onder an-

dere eisen aan het vermogen dat de detectoreenheden vragen.

TECHNOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN

Hoewel de gevraagde richtingsgevoeligheid in principe haalbaar is, wordt de technologische realisering niet eenvoudig. Het gevolg van de geringe absolute detectiekans is dat een samengestelde detector met zeer veel kleine detectoreenheden gebruikt moet worden. Iedere eenheid dient aan beide



Figuur 3 De waarschijnlijkheid om een neutron, in coïncidentie met een positron, in een antineutrinodetector te meten als functie van de radiale doorsnede. Boven de verhouding axiaal/radiaal en onder de waarschijnlijkheid in absolute termen.

kanten te worden uitgelezen. De standaardmethode om dit met fotomultipliatorbuizen te doen is voor een ondergrondse antenne om meerdere redenen (onder andere vermogen) niet haalbaar. Er zullen dus andere fotonconverters moeten worden ontwikkeld (*Avalanche Photo Diodes*, *Multi Channel Plates*, of misschien zelfs wel fibertechnologie met CCD-achtige uitlezing). De uitlezing zal in eerste instantie lijken op die welke in de medische beeldvorming (PET) wordt gebruikt, maar onze eisen zijn hoger. Er wordt op het gebied van fotonconverters samen met de industrie een ontwikkeling in gang gezet waarvan de industrie verwacht dat deze zal leiden tot een doorbraak in de nachtkijkertechnologie. Ook bij de elektronica liggen de nodige uitdagingen, omdat die uiteindelijk op een laag-vermogen chip zal worden gebouwd, waarbij zowel analoge als digitale signaalverwerking wordt gecombineerd.

MARSROUTE

Uit het bovenstaande moge blijken dat we met een ambitieus programma zijn gestart, waar naast hoge ambities ook risico's aan verbonden zijn. Om de risico's hanteerbaar en acceptabel te hou-

den kent het programma dan ook diverse fasen en is het programma ondergebracht in een stichting EARTH, die is opgericht door de Rijksuniversiteit Groningen, de Stichting ASTRON en de particuliere Curaçao-sche Stichting JADE. Onze eerste *go/no-go*-beslissing ligt nu bij de *Proof of Principle*-test, waarin de demonstratie van een proefmodule bij een kernreactor zal plaatsvinden. Als deze test slaagt, levert dit een instrument op waarmee kernreactoren continu kunnen worden gemonitord, zowel voor regulier gebruik als voor controle op de naleving van het Non-Proliferatie Verdrag.

Het driedimensionaal in kaart brengen van de warmtebronnen van de aarde is een lange-termijnprogramma, te vergelijken met een ruimteproject. De uitkomsten kunnen ons beeld over het functioneren van onze planeet drastisch veranderen en wellicht meer inzicht geven in het ontstaan van verschijnselen aan het oppervlak, zoals het aardmagnetisch veld, de verplaatsing van de continenten met hun soms dramatische gevolgen, fenomenen als El Niño en het patroon van de oceanenstromen.

Een Chinees spreekwoord zegt dat als je duizend mijl wil lopen, je een eerste

stap moet zetten. Ook kunnen we Pauli parafraseren door te zeggen dat je geduldig, lang en hard moet werken om iets moois te bereiken.

REFERENTIES

- 1 F. Reines, *Nobel lecture* (1995).
- 2 B.A. Buffett, *Science* **299** (2003), 1675–1677.
- 3 P.H. Roberts, C.A. Jones en A. Calderwood, *In earth's core and lower mantle* (Taylor and Francis London, 2003).
- 4 H.N. Pollack, S.J. Hurter en J.R. Johnson, *Reviews of Geophysics* **31–3** (1993), 267–280.
- 5 J. Verhoogen, *J. Energetics of the Earth* (Nat. Acad. of Sc. 1980).
- 6 V. Rama Murthy, W. van Westrenen en Y. Fei, *Nature* **423** (2003), 163–165.
- 7 J.M. Herndon, *J. Geomag. Geoelectr.* **45** (1993), 423–437.
- 8 D.F. Hollenbach en J.M. Herndon, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98** (2001), 11085–11090.
- 9 G. Fiorentini, F. Mantovani en B. Ricci, *Phys. Lett. B* **577** (2003), 139–146.
- 10 L.M. Krauss, S.L. Glashow en D.N. Schramm, *Nature* **310** (1984), 191–198.
- 11 A. de Rújula, S.L. Glashow, R.R. Wilson en G. Charpak, *Phys. Rep.* **99** (1983), 341–396.
- 12 T. Araki *et al.*, *Nature* **436** (2005), 499–503.
- 13 K.A. Hochmuth, 'Diplomarbeit' (Techn. Univ. München 2005).
- 14 R.J. de Meijer, E.R. van der Graaf en K.P. Jungmann, *Nucl. Phys. News Int.* **14–2** (2004), 20–25; *Rad. Phys. and Chem.* **71** (2004), 769–774.
- 15 J.F. Beacom en P. Vogel, *Phys. Rev. D* **60** (1999), 053003.