

Neutrino's vangen op de zeebodem

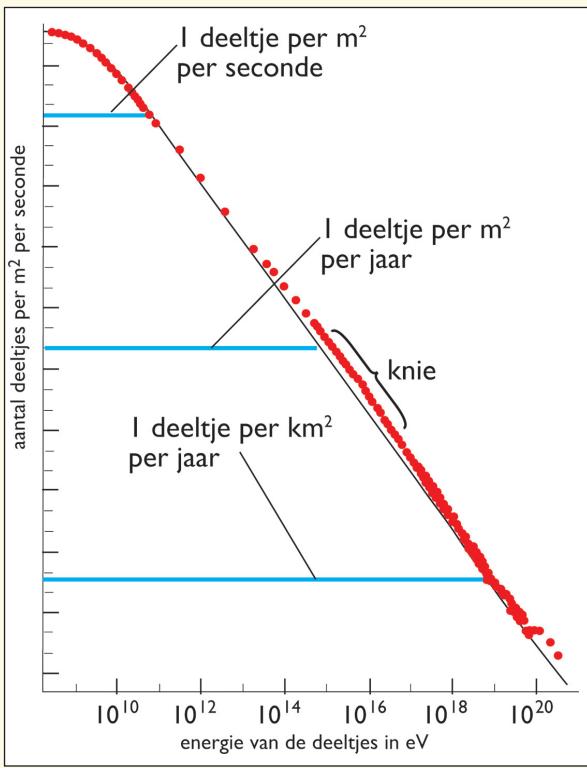
Artistieke schets van de deeltjeslawine, die ontstaat wanneer een kosmisch deeltje met een zeer hoge energie de buitenste lagen van de atmosfeer raakt. Kosmische straling werd onverwacht ontdekt in 1912. Kosmische stralen van lage energie ontstaan in de zon. (Illustratie: Simon Swordy, Univ. Chicago en NASA).

Momenteel wordt de laatste hand gelegd aan een telescoop waarmee gezocht gaat worden naar mogelijke bronnen van energierijke neutrino's uit het heelal. Deze telescoop is gebouwd op de bodem van de Middellandse Zee op een diepte van bijna 2500 meter en gebruikt de aarde als filter: alleen neutrino's zijn namelijk in staat de gehele aarde te passeren zonder geabsorbeerd te worden. De telescoop kijkt daarom naar beneden om deeltjessporen, die uit de bodem van de zee omhoog komen, te kunnen waarnemen. Waarom zijn wetenschappers geïnteresseerd in kosmische neutrino's en waarom moet een neutrino-telescoop op zo'n exotische locatie worden gebouwd?

Gerard van der Steenhoven

Gerard van der Steenhoven promoveerde in 1987 aan de Vrije Universiteit. Momenteel werkt hij als programmleider astrodeeltjesfysica bij het FOM-instituut voor subatomaire fysica bij Nikhef in Amsterdam en is als hoogleraar verbonden aan het Kernfysisch Versnellerinstituut (KVI) van de Rijksuniversiteit Groningen. Van der Steenhoven is tevens voorzitter van de Commissie voor de Astrodeeltjesfysica in Nederland (CAN) en de Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV).

Van alle elementaire deeltjes, zoals quarks en elektronen, zijn neutrino's misschien wel de meest raadselachtige. Nog maar kort geleden is vast komen te staan dat ze een zeer geringe massa hebben. Het is al langer bekend dat ze ongeladen zijn (vandaar de naam) en maar een heel kleine kans hebben om met andere deeltjes te reageren. In de praktijk betekent dit dat neutrino's vrijwel overal doorheen vliegen. Zo vliegen er, terwijl u dit artikel leest, talloze neutrino's door uw lichaam die enige tijd daarvoor tijdens kernreacties in de zon zijn geproduceerd. Daar merken wij niets van. Dat betekent ook dat neutrino's vrijwel ongestoord kosmologische afstanden kunnen overbruggen en dat ze – wanneer wij erin slagen ze waar te nemen – ons informatie kunnen geven over de astrofysische bronnen waarin zij geproduceerd zijn. En dat is precies de belangrijkste reden om neutrino-telescopen te willen bouwen. De informatie die neutrino's ons zouden kunnen verschaffen, is namelijk heel anders dan en volledig onafhankelijk van de informatie die wij tot nog toe in de sterrenkunde verkregen hebben. De huidige kennis is immers vrijwel uitsluitend gebaseerd op de waarneming van elektromagnetische golven, die geabsorbeerd of verstrooid kunnen worden door tussenliggende materie, zoals gaswolken of gehele sterrenstelsels. Neutrino's daarentegen worden niet of nauwelijks geabsorbeerd en komen vrij in subatomaire processen waarvan vermoed wordt dat zij een rol spelen bij de meest energierijke explosies in het heelal. Die bijzondere rol van neutrino's kan nader uitgelegd worden aan de hand van twee voorbeelden. Door hoogenergetische neutrino's uit de kosmos waar te nemen kan de mysterieuze oorsprong van de kosmische straling worden opge-



Door het aantal secundaire deeltjes te meten, dat ontstaat wanneer een kosmisch deeltje de atmosfeer van de aarde raakt, kan de oorspronkelijke energie van dat deeltje bepaald worden. In de figuur is het aantal waargenomen kosmische deeltjes (per oppervlakte en per tijdseenheid) weergegeven als functie van de energie. De kosmische deeltjes met de hoogste energie worden maar zeer zelden waargenomen: een enkele treffer per vierkante kilometer per jaar. (Illustratie: Scientific American 1998/<http://hires.phys.columbia.edu/images/crspectrum.gif>).

helderd en informatie worden verkregen over de onbekende samenstelling van donkere materie. Deze twee voorbeelden gaan we nader bekijken.

Kosmische straling

De aarde staat bloot aan een niet aflatend bombardement van kosmische straling. Dat zijn protonen of kernen van zwaardere atomen die met hoge snelheid in botsing komen met de buitenste lagen van de atmosfeer. Daarbij ontstaan lawines van secundaire deeltjes, die op het aardoppervlak kunnen worden gedetecteerd. De zon is een bekende bron van kosmische straling, maar boven een energie van 10^{12} eV is er geen duidelijkheid over de herkomst van deze zeer energierijke deeltjes. Er zijn wel vermoedens. Zo worden supernova-explosies, micro-quasars, actieve galactische kernen en uitbarstingen van gammastraling genoemd als mogelijke bronnen van de hoog-energetische kosmische straling. Om deze vermoedens te bevestigen danwel te ontkrachten moet er een verband gevonden worden tussen de bronnen van deze straling en de bekende posities van supernovae of één van de andere mogelijke bronnen. Daarbij duikt een ingewikkeld probleem op.

De (geladen) protonen of zwaardere atoomkernen die bij dergelijke explosies mogelijk worden uitgezonden zullen op weg naar de aarde worden afgebogen door de groot-schalige magnetische velden rondom de verschillende sterrenstelsels. Hierdoor zal een mogelijk verband worden uitgewist. Hier brengen neutrino's uitkomst omdat deze neutrale deeltjes niet beïnvloed kunnen worden door de (extra-)galactische magnetische velden. We moeten er dan wel vanuit gaan dat er zowel protonen als neutrino's geproduceerd worden in dit soort energierijke astrofysische

bronnen. Dit is echter zeer waarschijnlijk omdat het gangbare schokgolf-versnellingsmechanisme voorziet dat er bij de botsingen tussen de versnelde deeltjes en de opvolgende massaschillen noodzakelijkerwijs neutrino's geproduceerd zullen worden.

De nieuwe neutrino-telescopen zullen moeten vaststellen of deze ideeën juist zijn en in welke mate de supernovae, micro-quasars, actieve galactische kernen en uitbarstingen van gammastraling hierbij een rol spelen.

Er is nog een reden waarom het van belang is om de oorsprong van hoog-energetische kosmische straling te achterhalen. De hoogste waargenomen energie van kosmische deeltjes is circa 10^{20} eV en deze waarde ligt vele malen boven de hoogste energiewaarde die in de grootste deeltjesversneller op aarde (de Large Hadron Collider - LHC) geproduceerd kan worden. Kosmische deeltjes met dit soort energieën geven ons dus de mogelijkheid een energiegebied te exploreren dat in de komende decennia nog niet met deeltjesversnellers bestudeerd kan worden. Met andere woorden, ook vanuit de deeltjesfysica is er grote belangstelling voor dit soort experimenten, waarbij zich immers geheel nieuwe fysische verschijnselen zouden kunnen voordoen. Het is niet voor niets dat het vakgebied waarbinnen het hier beschreven onderzoek valt meestal wordt aangeduid als *astrodeeltjesfysica*.

Donkere materie

De eerste aanwijzingen voor het bestaan van een nieuwe vorm van materie stammen uit de jaren dertig van de vorige eeuw. De relatieve bewegingen van sterrenstelsels gaven aan dat er een grote hoeveelheid materie moet bestaan, wel gevoelig voor de zwaartekracht, maar niet zichtbaar voor de optische of radiowaarnemingen. De bewijzen voor het bestaan van deze zogeheten donkere materie zijn sindsdien alleen maar sterker geworden. Op basis van metingen aan de baansnelheden van individuele sterren in sterrenstelsels, maar ook op basis van metingen aan de kosmische achtergrondstraling (met bijvoorbeeld de WMAP-satelliet) wordt momenteel algemeen aangenomen



Om de Antares-neutrino telescoop te construeren, moeten de detectorlijnen één voor één afgezonken worden naar de bodem van Middellandse Zee. Op de foto is te zien hoe de eerste detectorlijn (een prefab-constructie op een platform) aan dek van het zeeschip Castor wordt geladen. De helft van de 25 verdiepingen met steeds een drietal lichtgevoelige sensoren (PMT's) is goed zichtbaar. De PMT's zijn te herkennen aan hun bolvormige glazen behuizing waarvan de achterkant zwart is. Aan de voorzijde van het platform is de gele boei zichtbaar, die er voor zorgt dat de detectorlijn rechtop in het water blijft staan. (Foto: Gordon Lim, NIKHEF)



Op de foto is te zien hoe één verdieping van een detectorlijn van de Antares-neutrino telescoop te water wordt gelaten. Elke verdieping bestaat uit drie lichtgevoelige sensoren, de zogeheten foto-multiplicatorbuizen (PMTs). De elektronica die gebruikt wordt voor de uitlezing van de PMTs is geplaatst in de verticale titanium cylinder. (Foto: Durk Gardenier)

dat circa 25% van de massa-energie inhoud van het heelal uit donkere materie bestaat.

De samenstelling van de donkere materie is vooraansnog onbekend. Het lijkt waarschijnlijk dat donkere materie – net zoals de gewone *baryonische*¹ materie – uit deeltjes bestaat, maar dan wel van een tot nog toe onbekend type. Indien dat waar is, kunnen twee van die donkere-materiedeeltjes bij een botsing annihielen, waarbij dan andere deeltjes kunnen ontstaan zoals de bekende fotonen, quarks of neutrino's. Alleen neutrino's zijn in staat te ontsnappen aan de ophopingen van materie waarin deze botsingen plaats zouden kunnen vinden. Door de neutrino's waar te nemen die bij de annihilaties ontstaan kan informatie verkregen worden over de massa van de donkere-materiedeeltjes.

Het idee is nu om met de nieuwe neutrino telescopen te gaan speuren naar dit soort neutrino's. Er zal gekeken moeten worden naar die plaatsen in het heelal waar een ophoping van donkere materiedeeltjes te verwachten is. Dat zal het geval zijn waar grote massa's aanwezig zijn, bijvoorbeeld in het centrum van de zon of het centrum van ons Melkwegstelsel. Indien er een verhoogd aantal neutrino's met een bepaalde energie wordt waargenomen (en afkomstig van dit soort nabijgelegen bronnen) is het zeer waarschijnlijk dat daarmee aanwijzingen gevonden zijn voor de voorspelde annihilatie van donkere materiedeeltjes. Deze waarneming wordt echt spectaculair als op hetzelfde moment bij de LHC-versneller in hetzelfde gebied nieuwe deeltjes ontdekt worden. Beide waarnemingen zijn nodig om op deze manier de samenstelling van donkere materie te ontrafelen.

Detectieprincipe

Er is een grote hoeveelheid materie nodig om met een redelijke kans een neutrino te laten botsen met een atoomkern. Zo'n botsing is nodig om een neutrino zichtbaar te maken: bij een botsing tussen een neutrino en een proton komt een geladen *muon*² vrij, waarvan bekend is hoe deze gedetecteerd moeten worden. Met deze wetenschap in het achterhoofd bedacht de Russische wiskundige Andrej Andrejevitsj Markov in de jaren zestig een doeltreffende methode voor de waarneming van hoge-energie

neutrinos uit het heelal: hij stelde namelijk voor de aarde te gebruiken als trefplaats én als filter voor neutrino's. Markov beredeneerde dat alle andere deeltjessoorten vastlopen in de aarde en de aarde tegelijkertijd de gewenste grote hoeveelheid materie bevat, dus moeten deeltjes sporen die uit de aarde tevoorschijn komen geassocieerd worden met hoogenergetische neutrino's. De geladen muonen die bij de neutrino botsingen geproduceerd worden, kunnen het gemakkelijkste in water waargenomen worden, omdat zij daarin *Cerenkov-licht*³ uitzenden. Dat gebeurt doordat de muonen zich voortbewegen met de snelheid van het licht (c), die hoger is dan de voortplantings-snelheid van licht in water (die gegeven wordt door c/n , met n de brekingsindex van water; $n=1,33$). Hierdoor ontstaat een schokgolf van Cerenkov-licht die bijvoorbeeld ook te zien is in het waterbasin van een kernreactor. Het idee is dus om een grote hoeveelheid water met lichtgevoelige detectoren te bekijken, om zodoende de uit de aardbodem omhoogbewegende muonsporen te kunnen detecteren. Dat betekent ook dat er geen storend licht van andere bronnen mag zijn. De oplossing is gebruik te maken van zeewater op grote diepte. De waterlagen (van enige kilometers) boven de detectoren houden het daglicht tegen en zorgen ook voor de afscherming van andere (van bovenaf) binnenvallende deeltjes. De lichtgevoelige detectoren moeten zo nauwkeurig zijn dat het verschil in aankomsttijd van een Cerenkov-foton vlak bij de bodem en op kleinere diepten goed gemeten wordt. Daarmee kan de richting van het muon nauwkeurig bepaald worden. Dat is niet alleen van belang om onderscheid te maken tussen omhoog en omlaag bewegende muonen, maar ook om de oorspronkelijke neutrino-richting vast te kunnen stellen: bij zeer hoge energieën is de voortplantingsrichting van het muon na de botsing vrijwel identiek aan die van het oorspronkelijke neutrino. Het meten van de muonrichting levert dus ook de gewenste informatie over de richting van het neutrino-deeltje.

Het Antares-project

Het hierboven beschreven detectorconcept vormt de basis voor de vrijwel voltooide Antares-neutrino telescoop. Deze neutrino telescoop is gebouwd op de bodem van de Middellandse Zee, op een diepte van 2480 meter en zo'n 40 kilometer uit de kust van Toulon (Zuid-Frankrijk). De telescoop bestaat uit twaalf kabels van circa 450 meter lengte die verankerd zijn in de zeebodem. Aan elk van de kabels zijn 75 lichtgevoelige detectoren gemonteerd, de zogeheten *photomultiplier tubes* (PMT's). Voor elk drietal PMT's is er één titanium cylinder waarin zich de uitlees-elektronica bevindt. Deze elektronica omvat ook een kleine processor, zodat de gedigitaliseerde meetgegevens via een internetprotocol getransporteerd kunnen worden naar het kuststation. Hiervoor wordt geen gebruik gemaakt van de gebruikelijke elektrische signalen, maar van glasvezelkabels en fotonische signalen. Deze fotonische technieken, die ontleend zijn aan de telecommunicatie, bieden het voordeel dat er met een veel grotere informatiedichtheid gewerkt kan worden. Hierdoor is het mogelijk om de signalen van alle 900 detectoren naar het kuststation te sturen; pas dan wordt de data aan allerhande filterprocessen onderworpen. Hierdoor kan men de filterprocessen

³ Cerenkov-licht is een verschijnsel dat sterk lijkt op de schokgolf van geluid die ontstaat wanneer een vliegtuig de geluidsbarrière doorbreekt: het toestel kijgt dan een snelheid die groter is dan die van het geluid. Als een geladen elementair deeltje zich voortbeweegt door water met een snelheid die groter is dan de (gereduceerde) lichtsnelheid in water, ontstaat er ook een schokgolf, maar nu van licht. Dit wordt Cerenkov-licht genoemd.

¹ Baryonen zijn subatomaire deeltjes die bestaan uit drie quarks

² Muonen zijn elementaire deeltjes die sterk lijken op elektronen. Muonen zijn echter ongeveer 200 keer zo zwaar.

voortdurend aanpassen en verbeteren. Het is zelfs mogelijk om de ruwe meetgegevens tegelijkertijd aan verschillende filterprocessen te onderwerpen, mits er genoeg computers beschikbaar zijn. In de praktijk betekent dit dat er naast het gewone detectorbedrijf simultaan naar neutrino's uit een speciale richting (de zon, het centrum van ons Melkwegstelsel of een kort daarvoor waargenomen gammaflits) gespeurd kan worden met een speciaal daarvoor verlaagde detectiedempel. Deze manier van uitlezen betekent ook dat Antares één van de eerste voorbeelden is van een pure 'softwaretelescoop', waarbij de waarnemering en de detectedempel continu met behulp van computerprogrammatuur aangepast kunnen worden. Dit innovatieve uitleessysteem is ontwikkeld op het FOM-instituut NIKHEF in Amsterdam onder leiding van prof. Maarten de Jong.

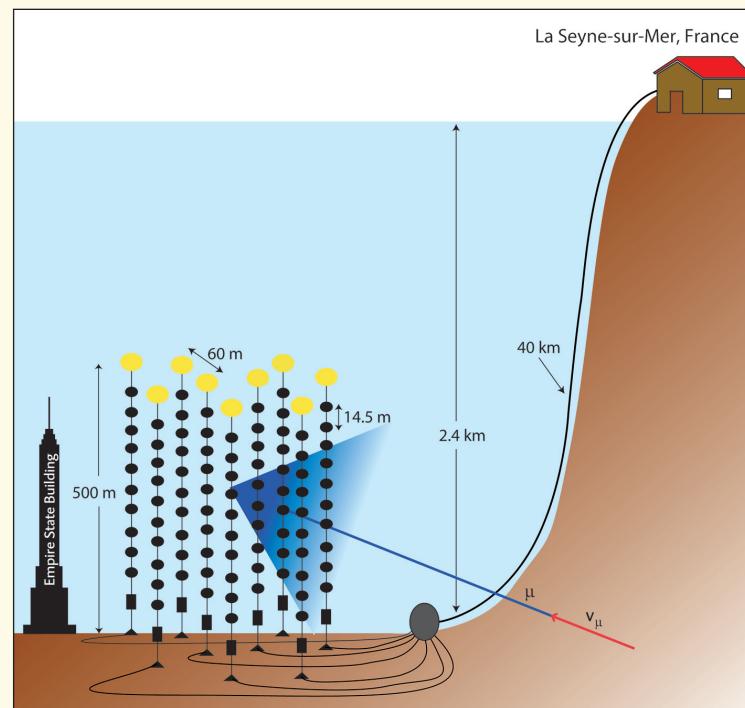
De realisatie van de Antares-neutrino telescoop heeft vele jaren gekost. Er moest worden nagegaan of de eigenschappen van het diepzeewater wel geschikt waren en er moesten prototypes afgezonken worden. Er waren ook tegenvalers en de onderzeesboot, die nodig was om de kabels aan te sluiten op het kuststation, was niet altijd beschikbaar. Deze grote operatie, waaraan wetenschappers en ingenieurs uit zeven Europese landen meewerkten, is ondanks al dit soort moeilijkheden bekroond met succes. Sinds begin 2007 produceert de Antares-neutrino telescoop meetgegevens, eerst met vijf detectorkabels en sinds eind 2007 met tien. De rest volgt in 2008.

Eerste resultaten

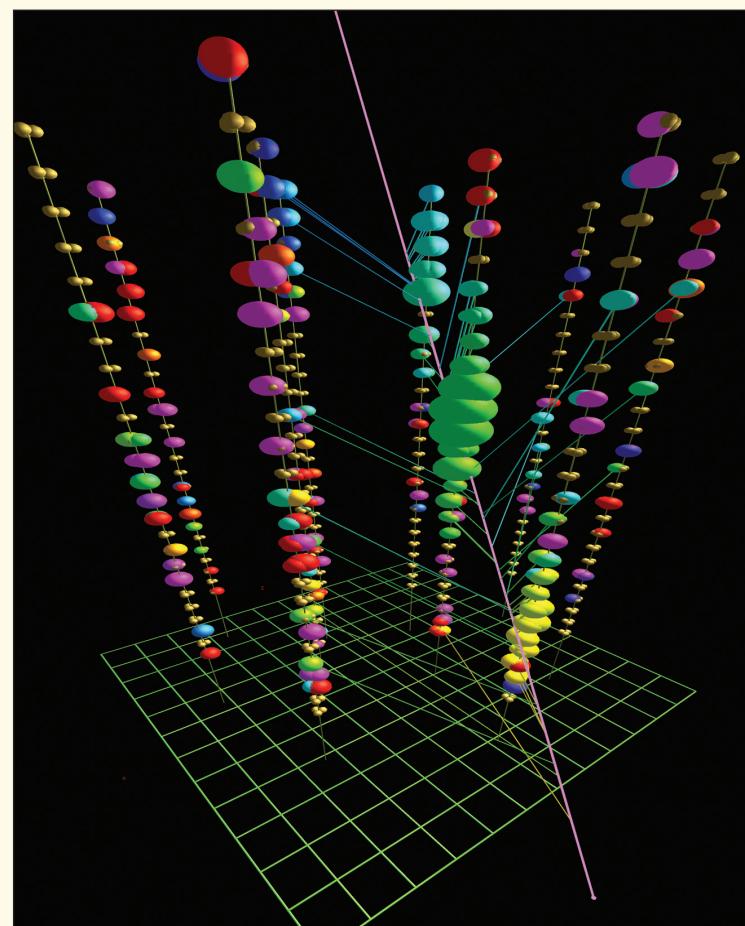
Eén van de eerste resultaten van de Antaresneutrino telescoop had niets te maken met de astrodeeltjessphysica. De snelheid waarmee de lichtgevoelige detectoren fotonen registreerden, bleek sterk af te hangen van het seizoen en zelfs van jaar tot jaar waren er sterke verschillen meetbaar. Bovendien registreerde men korte uitbarstingen van enige seconden, waarin zeer veel fotonen gedetecteerd werden. Dit alles bleek veroorzaakt te worden door bacteriën en dieren die in de diepzee leven. Deze levensvormen communiceren met elkaar door het uitzenden van licht in hetzelfde golflengtegebied als het Cerenkov-licht. Dit bekende verschijnsel wordt *bioluminescentie* genoemd en kan nu voor het eerst ter plaatse en continu bestudeerd worden. Niet eerder hadden marine-biologen, oceanografen of geochemici een meetstation ter beschikking dat permanent verbonden is met de kust en gebruikt kan worden voor langdurige metingen aan dit verschijnsel.

De eerste deeltjessporen die door Antares zijn waargenomen bleken, zoals verwacht, afkomstig van kosmische straling waarvan de secondaire muonen doordringen tot de bodem van de zee. Deze *atmosferische muonen* kunnen niet alleen gebruikt worden voor de ontwikkeling en verbetering van *reconstructie-algoritmes*⁴, maar bewijzen ook dat de telescoop goed werkt. Vervolgens werd de speurtocht naar neutrino's gestart. Gebruik makend van algoritmes die eerder ontwikkeld waren (onder meer door Nederlandse onderzoekers) aan de hand van computersimulaties, bleek het mogelijk omhooggaande muonsporen te identificeren die afkomstig moeten zijn van neutrino's die dwars door de aarde zijn gevlogen.

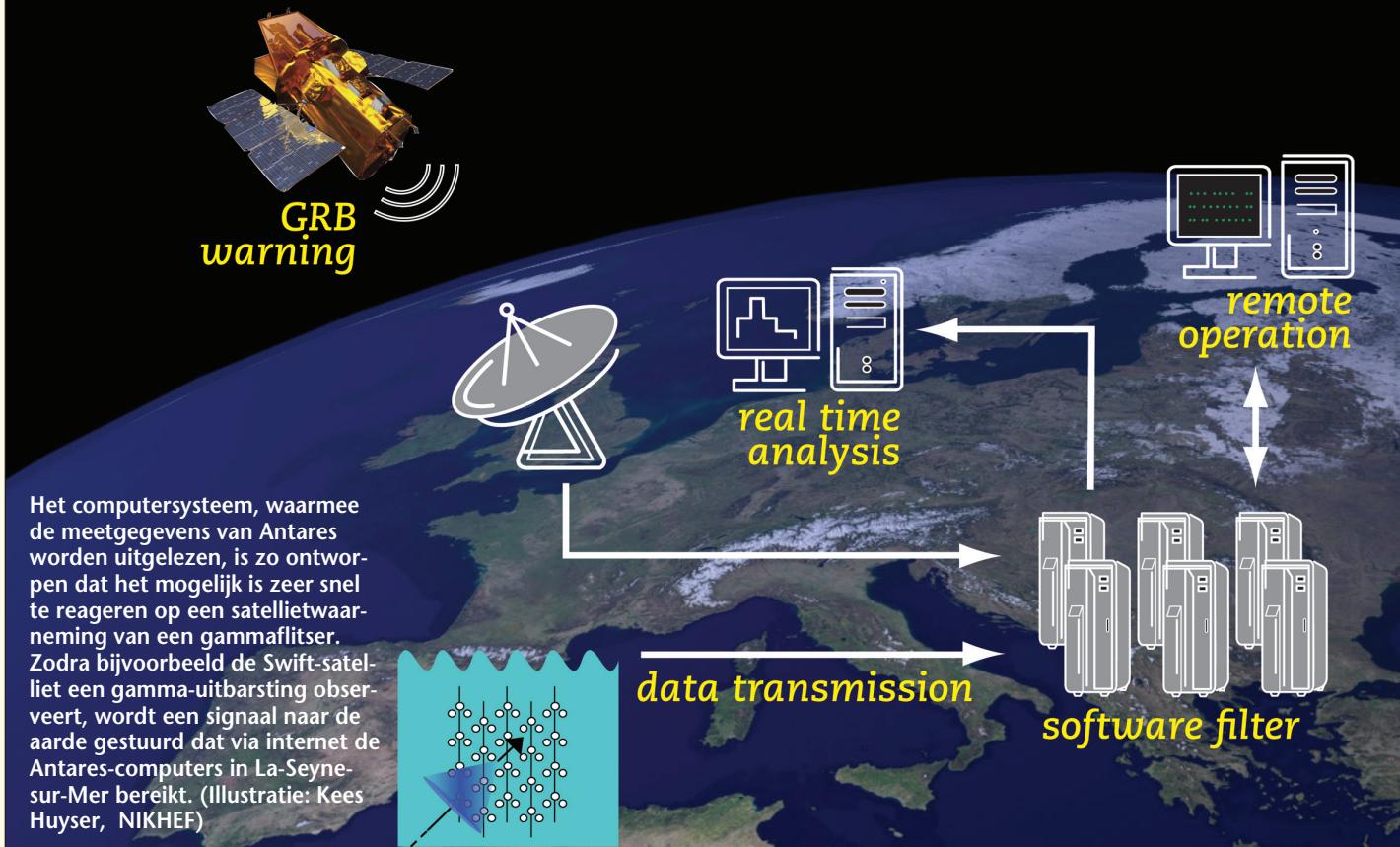
⁴Reconstructie-algoritmes zijn slimme rekenregels waarmee op basis van de aankomsttijden van het Cerenkov-licht het oorspronkelijke traject van het deeltje gereconstrueerd kan worden. De snelheid van deze algoritmes is erg belangrijk, omdat het anders te veel tijd kost om de metingen te analyseren.



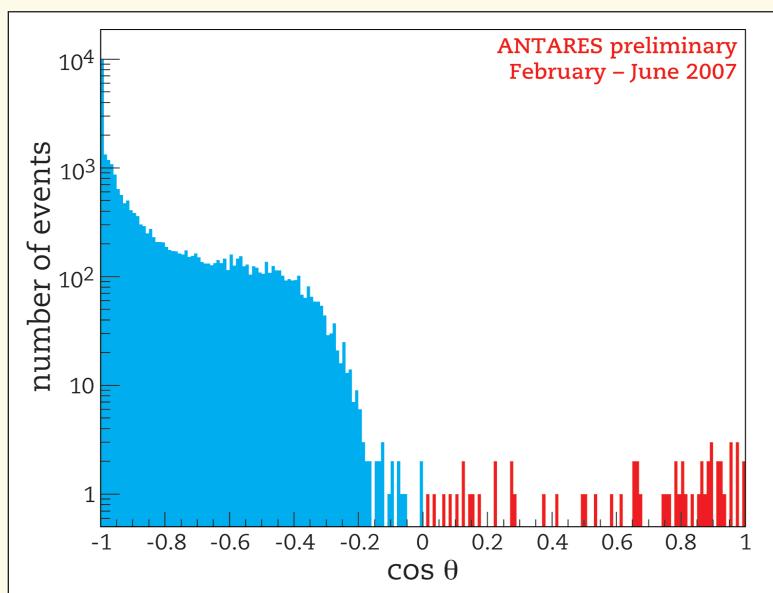
De Antares-telescoop is gebouwd in de Middellandse Zee op een diepte van ongeveer 2,4 kilometer, zo'n 40 kilometer uit de kust voor Toulon. De telescoop bestaat uit twaalf kabels van 450 meter lengte. De signalen van de neutrino telescoop komen via een kabel van 40 kilometer lengte aan land bij de Franse badplaats La Seyne-sur-Mer. (Afbeelding: Mieke Bouwhuis / Kees Huyser (Nikhef))



In 2007 waren gedurende tien maanden vijf detectorkabels van Antares vrijwel continu in werking. Er zijn veel metingen verzameld in deze configuratie, waarvan in deze figuur een voorbeeld is gegeven. De detectorkabels, weergegeven door de verticale lijnen, staan op een rooster van 300 bij 300 m² op de bodem van de zee. De kleur van de bollen weerspiegelt de aankomsttijd van het lichtsignaal op die plaats en de omvang van de bollen geeft de intensiteit aan. Het muonspoor loopt van rechts-onder naar linksboven. (Illustratie: Dr. Aart Heijboer, Fermilab).



Een eerste neutrinospectrum kon zo gemeten worden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze neutrino's vooral afkomstig zijn van kosmische straling die aan de andere kant van de aarde (bij Nieuw-Zeeland) op de atmosfeer binnenviel. Daarbij ontstaan secundaire deeltjes, waarvan sommige vervallen naar neutrino's die nu al direct door Antares zijn waargenomen. Nu de functionaliteit van het instrument is aangetoond, is de echte zoektocht naar kosmische neutrino's van start gegaan!



Te midden van vele miljoenen deeltjessporen moeten enkele omhoog gaande sporen gevonden worden, die het gevolg zijn van een neutrino dat dwars door de aarde heen vloog. Hiervoor zijn strenge selectie-algoritmes ontwikkeld. Een eerste resultaat van zo'n analyse is in de figuur afgebeeld. Het aantal gereconstrueerde sporen is weergegeven als functie van de (co-sinus van de) zenithhoek. Deze hoek is nul graden voor een recht omhooggaand spoor en 180 graden voor een loodrecht naar beneden bewegend spoor. Het blauwe deel van het histogram represeneert de resterende achtergrond van atmosferische muonen die niet door het algoritme werden gefilterd. Deze figuur bewijst dat het mogelijk is om neutrino's met de Antares-detector waar te nemen. (Illustratie: Kees Huyser)

In 2007 is ook een (software) systeem opgezet waarmee simultaan naar neutrino's gezocht kan worden die mogelijk afkomstig zijn van een GRB. Dit systeem is gebaseerd op een *triggersignaal* van de SWIFT-satelliet: deze satelliet is speciaal ontworpen om GRB's vroegtijdig waar te nemen en direct een signaal naar de aarde te sturen. Na ontvangst van zo'n triggersignaal wordt er met extra gevoeligheid gezocht naar neutrino's, afkomstig uit dezelfde richting als waar SWIFT de gammaflits heeft waargenomen. Dit systeem is ontwikkeld door dr. Mieke Bouwhuis, een Nederlandse wetenschapper. Zij heeft hiervoor een speciale NWO-subsidie ontvangen.

Met de voltooiing van de Antares-neutrino-telescoop is het zoeken naar bronnen van kosmische neutrino's begonnen. Maar, met Antares kan alleen gezocht worden naar bronnen in de zuidelijke hemelhelft; het is daarom goed (en ook wetenschappelijk gezond) dat er een tweede neutrino-telescoop gebouwd is op het zuidelijke halfrond: het Ice-Cube/Amanda-project, dat zich bezig houdt met neutrino's die afkomstig zijn van bronnen uit de noordelijke hemelhelft. Op basis van de eerste metingen is al duidelijk geworden dat deze instrumenten niet veel kosmische neutrino's zullen waarnemen. Om op systematische wijze neutrino-astronomie te kunnen bedrijven, zijn dus veel grotere telescopen nodig. Daartoe is in Europa het KM3NeT-consortium gevormd: deze projectgroep wordt door de Europese Unie gesteund in het maken van een ontwerp voor een neutrino-telescoop, met een detectievolume van tenminste een kubieke kilometer. Het Antaresproject kan gezien worden als een voorloper van de KM3NeT-telescoop, die in de eerste helft van het volgende decennium gebouwd moet gaan worden.

Voor de astrodeeltjesfysica breken spannende tijden aan: in de afgelopen jaren zijn de eerste resultaten verkregen met telescopen die gevoelig zijn voor deeltjes met extreem hoge energie (de H.E.S.S.-telescoop in Namibië en het MAGIC-observatorium op La Palma) of hoge-energie geladen deeltjes (het Pierre Auger Observatorium in Argentinië). Nu de neutrino-telescopen ook beschikbaar gekomen zijn, ontstaat de mogelijkheid verschillende deeltjes van dezelfde bron te onderzoeken: hogenergetische fotonen, protonen en neutrino's. Van deze *multi-messenger approach* wordt veel verwacht.