



NEUTRINO'S VANGEN MET EEN KUBIEKE KILOMETER ZUIDPOOLIJS

Spoken zien in Antarctica

DOOR IEDER MENS SCHIETEN ELKE SECONDE MILJARDEN NEUTRINO'S. HOE ZIJN DEZE DEELTJES, AFKOMSTIG UIT DE RUIMTE, TE METEN? EUROPESE EN AMERIKAANSE ONDERZOEKERS PROBEREN DEZE SPOOKDEELTJES MET DE DETECTOR ICECUBE, DIE 1 KM³ ZUIDPOOLIJS BESLAAT, TE VANGEN. EEN VAN DE GROOTSTE EXPERIMENTEN UIT DE WERELDGESCHIEDENIS.

HET DUURT NOG TOT 2011 EER'S WERELDS grootste neutrinedetector gereed is, maar inmiddels zijn al negen van de tachtig kabels met detectoren diep in het zuidpoolijs vastgevroren. Het meten kan al beginnen. IceCube, zoals de detector heet, wordt speciaal gebouwd voor het speuren naar hoog energetische neutrino's, die supernova's, gammaflitsen of zwarte gaten ver weg in het heelal de ruimte inslingeren. Volgens de huidige sterrenkundige theorieën hebben neutrino's een energie van maximaal 10¹⁸ eV. Dat is een miljoen maal meer dan de krachtigste deeltjesversnellers op aarde momenteel produceren. Het vangen van deze kosmische neutrino's in de detector van 1 km³ kan niet alleen de natuurkunde van de fundamentele bouwstenen van het heelal een stapje vooruit helpen maar ook nieuwe kosmologische inzichten opleveren.

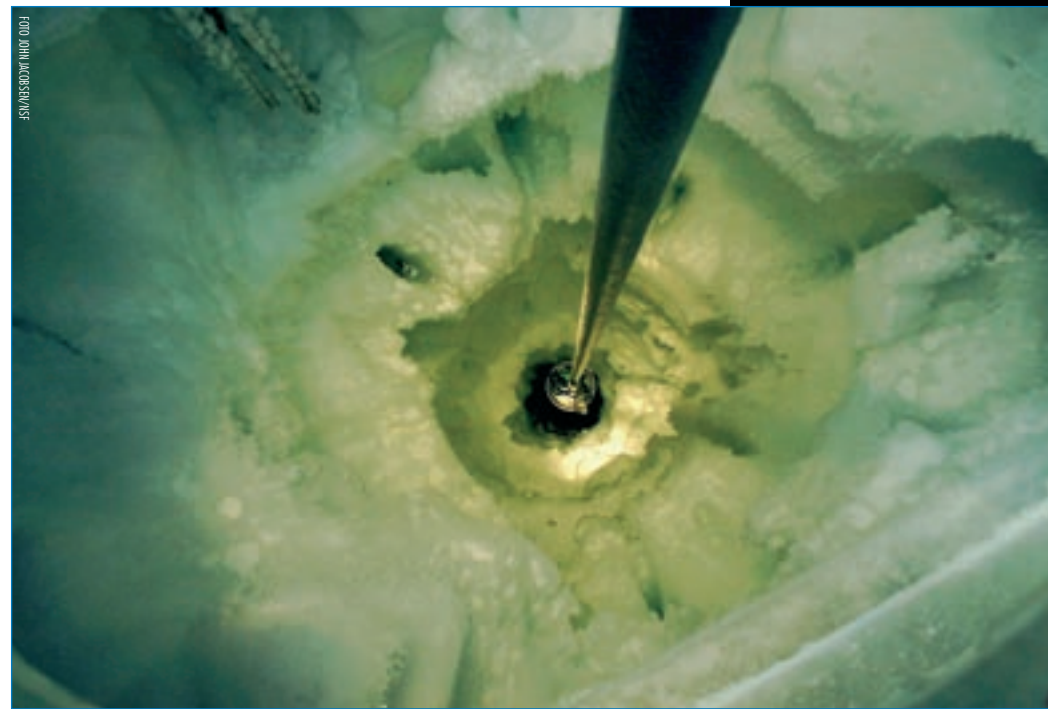
Nog nooit is er echter een detector in geslaagd dergelijke hoogenergetische kosmische deeltjes te betrappen op hun reis dwars door de aarde.

IceCube moet nieuwe kosmologische inzichten opleveren

Het kostte al veel moeite om met de Kamiokande-detector in Japan zonne-neutrino's te

meten, die in veel grotere hoeveelheden de aarde treffen, een veel lagere energie hebben en dus iets makkelijker te detecteren zijn. De Japanner Masatoshi Koshiba kreeg er in 2002 de Nobelprijs Natuurkunde voor.

Voor het vangen van hoogenergetische kosmische neutrino's is een groot detector-volume nodig en zeer veel geduld. Neutrino's zijn elementaire deeltjes zonder elektrische lading en met zo weinig massa dat ze met vrijwel de lichtsnelheid dwars door alles heen vliegen. Zo schieten er per seconde miljarden neutrino's door ieder mens heen. En niemand die er ooit iets van merkt. Ware spookdeeltjes.



Met heet water worden tachtig gaten van ruim 0,5 m en 2,5 km diep in het ijs geboord. In elk gat gaat een kabel met zestig detectoren.

MUON

Aan IceCube werken onderzoekers van dertien Amerikaanse en veertien Europese onderzoeksinstituten mee. De Nederlandse inbreng komt van de Universiteit Utrecht en Stichting Ruimteonderzoek Nederland (SRON), ook in Utrecht. Behalve bij de detectiebollen zijn de Nederlanders ook betrokken bij de reconstructie- en analysesoftware. Het geld, zo'n driehonderd miljoen euro in totaal, komt voornamelijk van de Amerikaanse National Science Foundation.

De Utrechtse eerstejaars promovendus Martijn Duvoort woonde in november twee weken op de geografische zuidpool om mee te helpen aan de bouw van IceCube. Hij testte er digitale, optische detectiebollen, voordat ze de ijzige diepte in gingen. 'Wanneer een neu-

trino binnen een paar kilometer van de detector toch op een atoomkern botst, en dat gebeurt heel zelden, ontstaat een muon. Dit fundamentele deeltje legt zo'n 10 km af en produceert Cherenkov-straling', zegt de 24-jarige fysicus. De Rus Pavel Alekseyevich Cherenkov is de ontdekker van deze elektromagnetische straling, die ontstaat doordat het muon een snelheid heeft die groter is dan die van licht in water. Dit verschil veroorzaakt een golfvront, dat net als bij de schokgolf van geluid, een speciale vorm krijgt. Het licht heeft een blauwe kleur en breidt zich in de vorm van een kegel met een hoek van 41 graden langs de muonbaan uit. Als dit in een transparant medium als water of ijs gebeurt, kunnen optische detectoren de Cherenkov-straling waarnemen. Duvoort: 'Onze

detectiemodules doen dat in ijs. In de Middellandse Zee is de Europese Antares-detector in aanbouw, die de straling in water probeert te meten.'

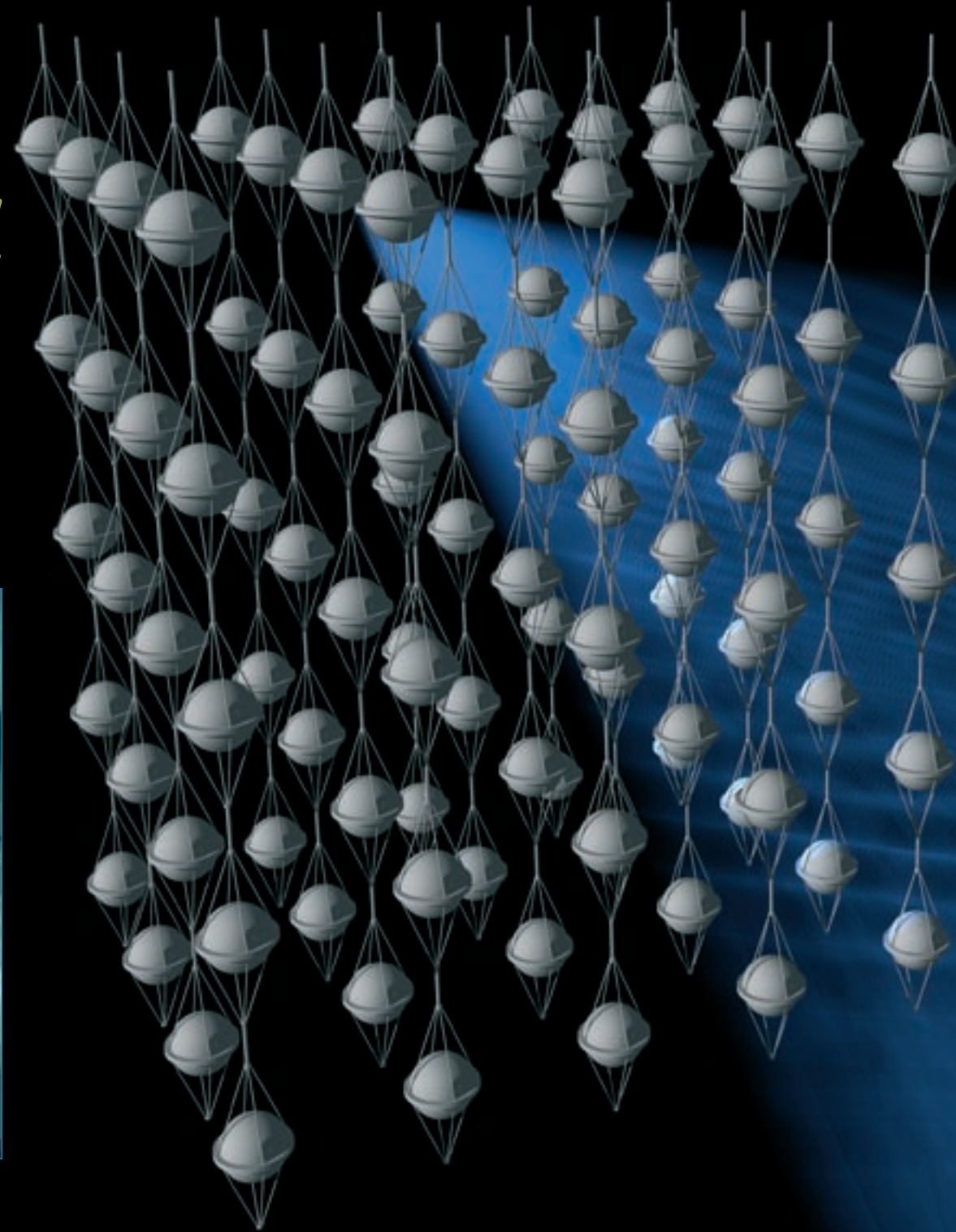
Een neutrinotelescoop voor kosmische spookdeeltjes moet groot genoeg zijn om een van die zeldzame muonen te detecteren. Voor het opvangen van de Cherenkov-straling dient de detector bovendien transparant te zijn. Een diepe zee en ijs op diepte voldoen hieraan. Dit zijn de ideale plekken voor neutrinedetectoren. Het zuidpoolijs is ook nog eens buitengewoon zuiver, transparant en vrij van radioactiviteit. Het blauwe Cherenkov-licht kan 1,5 km onder het zuidpooloppervlak in het donkere ijs ruim 100 m afleggen.

De zuidpooldetector IceCube en de vijftig

keer zo kleine Middellandse Zee-detector Antares zijn in zekere zin complementair. IceCube zoekt naar neutrino's die vanuit de noordelijke hemel komen, terwijl Antares juist kijkt naar de zuidelijke hemel. In beide situaties werkt de aarde als een filter. Omdat ijs het licht meer verstrooit, maar minder absorbeert, heeft IceCube een betere energieresolutie en een groter effectief detectievolume. Antares daarentegen kan de detectiehoek iets preciezer bepalen. De Europese detector ligt op 2,5 km diepte in zee. Een nadeel is echter dat op die diepte bestjes via bioluminescentie licht uitzenden waar de detector last van heeft. Onderzoeksproject Antares is eigenlijk een voorloper van KM3net, een detector in de Middellandse Zee, die net als IceCube 1 km³ groot moet worden.

AMANDA

Kosmische spookdeeltjes betrappen met gewoon aards, zichtbaar blauw licht in 1 km³ zuidpoolijs is een bizarre onderneming en een van de grootste experimenten die ooit op aarde zijn uitgevoerd. IceCube is de opvolger van Amanda, een meer dan vijftig keer zo kleine detector en daarmee even groot als Antares, die eind 2007 klaar moet zijn. Amanda heeft tussen 2000 en 2005 geen enkele kosmische neutrino betrapt. Het geduld roakte op en dus moest het allemaal nog groter. 'In totaal worden er voor de nieuwe detector tachtig gaten van 2,5 km diep en 60 cm breed in het ijs gesmolten', vertelt Duvoort. 'Dat gebeurt met warm water. De boorkop is eigenlijk een blok metaal met sensoren die kijken of het blok recht hangt. Druksensoren geven



Wanneer een neutrino een ijsdeeltje treft, ontstaat een blauwe lichtbundel. Een kleine vijftienduizend optische detectoren in 1 km³ antarctisch ijs registreren dat licht en bepalen de eigenschappen van het spookdeeltje.



BOONDIJN/INLAWAY/OLO

aan hoe diep in het ijs de boorkop zit. Een gat maken duurt anderhalve dag. In elk gat gaat dan een dikke kabel met zestig optische detectiebollen.’ Omdat vanwege de veiligheid alleen tijdens de twee zomermaanden op de geografische zuidpool wordt gewerkt, duurt het nog vijf jaar voordat de detector helemaal af is.

‘De eigenschappen van het ijs hangen af van de hoeveelheid stof’

De bollen zitten tussen 1400 en 2400 m diep in het ijs. Aan elke kabel, in elk van die tachtig gaten, hangen zestig modules. De afstand tussen de bollen aan een kabel is 17 m. De kabels liggen onderling 125 m uit elkaar in een hexagonaal rooster van 1 km hoog. Eenmaal in het ijs vriezen ze vast en worden ze er nooit meer uitgehaald, want dat zou te veel moeite kosten. Elke detectiebol is 35,6 cm breed en uitgerust met een klok en een computer. ‘Een computer krijgt gratis koeling op

de zuidpool. Erg handig’, zegt Duvoort. ‘In de bol is de temperatuur in het zuidpoolijs enkele graden onder nul.’

De stroom voor de modules, geleverd door dieselgeneratoren aan het pooloppervlak, loopt via de kabels. Het energieverbruik van een enkele detectiebol is slechts 3 W. De kabels (*twisted pair*) zijn 6 cm dik en dienen ook voor alle signaaltransport van boven naar beneden en terug.

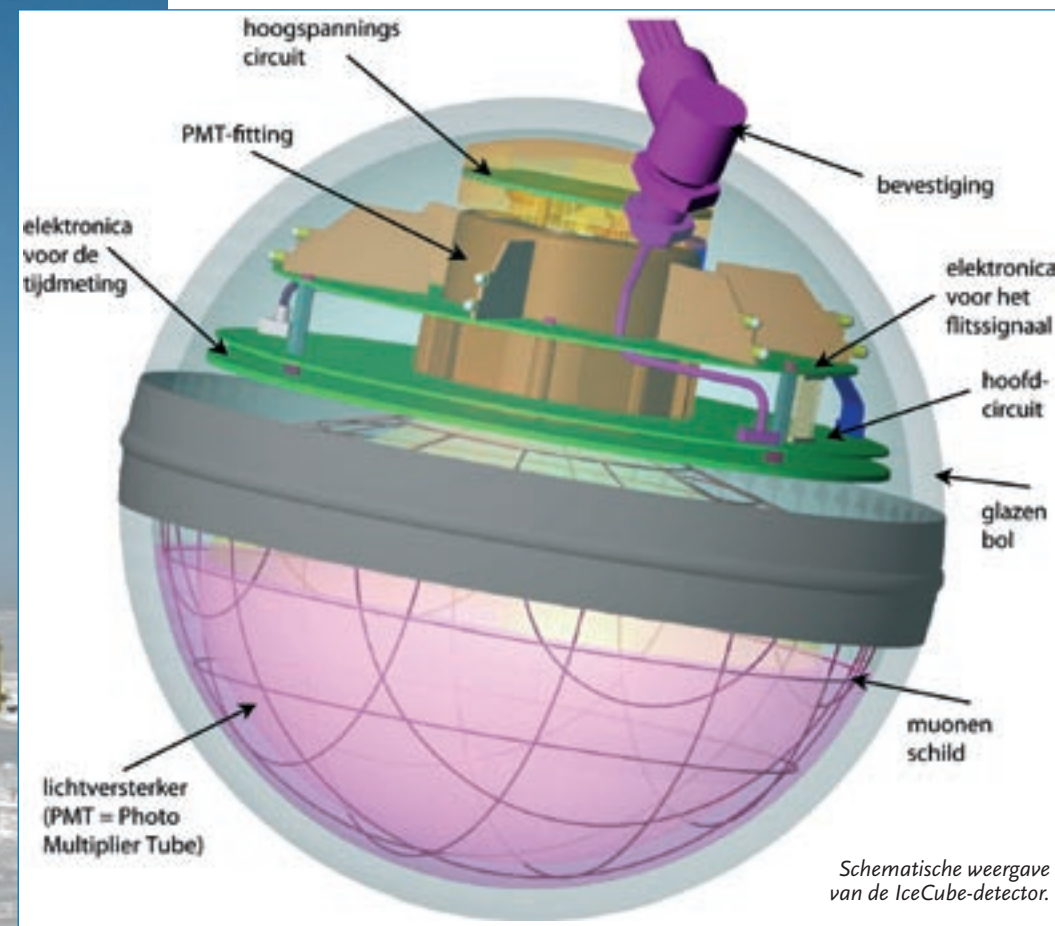
Een detectiebol meet de lichtflits van het muon met een fotomultiplier, een lichtversterker, die gevoelig is voor het blauwe licht van de Cherenkov-straling. De detectieklok in de module legt het tijdstip vast. Voor een exacte reconstructie van de muonbaan moet de klok de tijd met een precisie van nanoseconden bepalen. Vanwege de lichtsnelheid betekent een afwijking van elke nanoseconde 30 cm verschil in de baanbepaling. De richting van het neutrino wordt zo met een nauwkeurigheid van een halve graad vastgesteld. De muonbaan ligt vrijwel in het verlengde

van de neutrino baan, zodat de onderzoekers met de muonbaan ook de neutrino baan kunnen bepalen. Op hun reis door de kosmos worden neutrino’s – in tegenstelling tot lichtdeeltjes – niet verstoord en dus wijst de neutrino richting direct naar de kosmische bron.

PULSEN

De klok in elke detectiebol wordt iedere paar microseconden geijkt, omdat de interne elektronica anders voor een tijdsverloop zorgt. Aan het pooloppervlak staat boven elke kabel een klokje dat pulsen naar beneden stuurt. Zodra een module de puls ontvangt, zendt hij een signaal terug naar boven. Aan de hand van de tijdsverschillen en de bekende afstanden worden de interne klokken van de bollen met een precisie van nanoseconden geijkt. Door deze nauwkeurigheid kan IceCube exacter dan Amanda en Antares bepalen hoe één enkel lichtdeeltje binnenkomt.

Een detectiebol moet een druk van 800 bar weerstaan, die een gevolg is van de diepte en



Schematische weergave van de IceCube-detector.

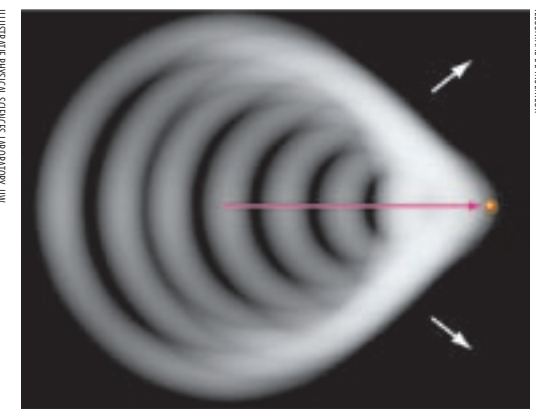
Het meetstation op de zuidpool. Alle meetresultaten worden verzameld in het grijze gebouw, waarin ook de computers komen te staan. In de rechter rode container zijn de detectiebollen getest, die in de bruine dozen staan opgeslagen.

wordt het ijs warmer, tot zo’n -20 °C op 2,5 km diepte.’

STOF

Als IceCube er in slaagt een neutrino te traceren, wat dan? Het bepalen van de baan van het deeltje is moeilijk te achterhalen. Omdat het ijs het licht verstrooit, houden de wetenschappers daar in de baanreconstructie rekening mee. Dat is verre van triviaal. Duvoort: ‘De eigenschappen van het ijs hangen onder andere af van de hoeveelheid stof in het ijs en die is gelaagd. Dat moeten we allemaal meenemen.’ In principe zit er op een grotere diepte minder stof, daarom wordt de detector ook zo diep in het ijs gebouwd. Maar het is ook gebleken dat ergens halverwege de detector twee stoflagen liggen. Bij het boren van het eerste gat voor IceCube ging er zelfs een speciale *dustlogger* met de boorkop mee naar beneden, een apparaat met een laser en enkele sensoren. Het instrument bracht de reflectie van het ijs in kaart en daarmee de stofgeïmpregtheid. Inmiddels ligt het apparaat voor eeuwig vastgevroren beneden in een boorgat.

Voor de baanbepaling is een klokprecisie van nanoseconden vereist. Maar de gebeurtenis zelf, een botsend neutrino, hoeft maar met een nauwkeurigheid van microseconden bekend te zijn. Wanneer de detector een neutrino botsing meet – via de Cherenkov-straling van het muon – geeft een GPS aan het pooloppervlak aan de gehele gebeurtenis een tijd-



Het muon beweegt sneller dan het licht dat het deeltje uitzendt. Daardoor ontstaat een schokgolf van licht, ook wel Cherenkov-straling genoemd.

stip met een precisie van microseconden. Dat is voldoende.

Dan is de richting waaruit het neutrino kwam en het moment dat het deeltje botste bekend. Maar wat was de energie van het neutrino? Duvoort: ‘Eigenlijk weten we weinig over de energie. Door de afstand tussen de detectiebollen is IceCube gevoelig voor neutrino’s met een energie tussen 1011 en 1015 eV, misschien zelfs nog wel hoger. Neutrino’s met een lagere energie dan 1011 eV slaan te weinig modules aan. In principe is de energie te bepalen uit het stralingsverlies van het muon onderweg. Maar we weten niet waar het neutrino is gebotst en waar het muon dus is ontstaan. Alleen als een neutrino precies binnen IceCube op een ijskern botst, kunnen we de plaats achterhalen. Maar de kans is groter dat het ergens buiten de detector met een ijskern botst.’

Door later het detectietijdstip en de neutrino richting te vergelijken met satellietwaarnemingen van bijvoorbeeld gammaflitsen, kunnen de onderzoekers kijken of er bij een gammaflits ook hoog energetische neutrino’s ontstaan, zo is het onbevestigde vermoeden.

‘Eigenlijk weten we weinig over de energie van neutrino’s’

BAANRECONSTRUCTIE

Voor de baanreconstructie is het van belang om binnen een halve meter nauwkeurig te weten wat de afstanden in het ijs tussen de detectiebollen onderling zijn. Idealiter zijn die te bepalen uit de ruimte tussen de boorgaten en de bekende afstanden van bollen aan een enkele kabel. Maar de praktijk is weerbarstig. Een gat wordt zelden kaarsrecht naar beneden geboord, waardoor de afstanden tussen bollen aan verschillende kabels toch een afwijking vertonen. Door sneeuwval aan het oppervlak hebben de boorgaten ook

De basis van de Amerikaanse en Europese onderzoekers op Antarctica.



BRONNEN: WILLY VAN OUD

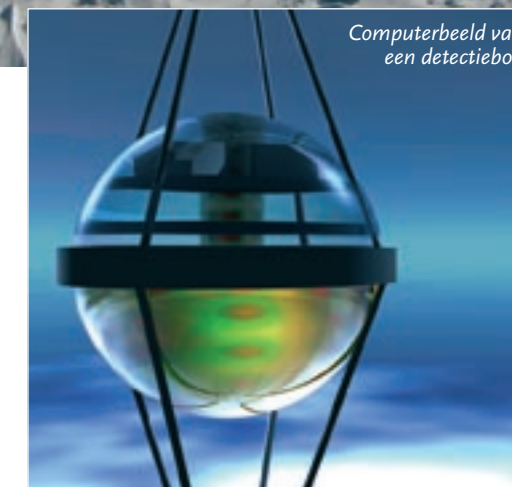
niet precies dezelfde absolute aanvangshoogte. Elke detectiebol heeft daarom een aantal LED's, die licht naar boven en beneden kunnen flitsen. Uit het tijdstip van verzending en ontvangst wordt de onderlinge afstand van de bollen bepaald.

De modules sturen de informatie digitaal omhoog. Bij Amanda gebeurde dat nog analoog, maar dat leidde tot signaalbeïnvloeding tussen de bollen. Duvoort: 'Bij Amanda zat geen extra elektronica in de modules, omdat de vrees bestond dat die kapot kon gaan, terwijl niemand er meer bij kan. De situatie bleek echter stabiel dan gedacht, vandaar dat er nu een klok en een kleine computer in elke bol zit.'

'De modules kijken ook om zich heen of hun burens staan te flitsen. Het ijs is transparant, dus dat kunnen ze zien. Als een bol een flits detecteert en zijn burens niet, dan wordt de informatie niet naar boven gestuurd, want dan kan het geen Cherenkov-straling zijn. Pas als twee of drie bollen in de nabijheid ook flitsen, stuurt een module zijn informatie naar boven. Op die manier wordt er al in de detector overbodige informatie gefilterd.'

ICETOP

Helaas komen er niet alleen muonen van beneden dwars door de aarde, maar ook van



Computerbeeld van een detectiebol.

BRONNEN: WILLY VAN OUD

boven – een atmosferische muon. 'Kosmische straling die de atmosfeer binnendringt, produceert een regen van deeltjes, waaronder muonen. Daarom komt maar een op de miljoen muonen die de detector kan meten van een kosmische neutrino', aldus de Utrechtse promovendus.

De atmosferische muonen zijn de belangrijkste bron van stoorsignalen die de onderzoekers moeten wegfilteren. Op het zuidpooloppervlak staan daarom boven elke kabel twee tanks die speciaal bedoeld zijn om te achterhalen wanneer en waar er atmosferische muonen door de detector schieten. Dat is het IceTop-experiment. Het apparaat is ook buitengewoon handig voor een goede kalibratie van de IceCube-detector. Hij is speciaal

ontworpen voor een nauwkeurige baanbepaling van de atmosferische muonen. Dezelfde deeltjes gaan in het algemeen niet alleen door IceTop, maar ook door IceCube, die zo'n 2 km onder IceTop ligt. IceCube zou voor die atmosferische muonen dus dezelfde richting moeten meten als IceTop, die op deze manier de grote detector kalibreert. Een zeer handige methode. De detectoren in zee hebben niet zo'n kalibratie-apparaat op het zeeoppervlak staan.

Na alle filtering blijft er per dag zo'n 30 GB aan data over. Die worden gecomprimeerd tot 4 GB en opgeslagen. Daarna begint de digitale zoektocht naar kosmische spookdeeltjes.

Duvoort staat weer op de lijst voor een volgende missie naar de geografische zuidpool. 'Toch leuker dan vier jaar alleen maar achter het bureau zitten.'

<http://icecube.wisc.edu/>

www.astro.uu.nl/~duvoort/ – website van Martijn Duvoort.

<http://antares.in2p3.fr/>

www.km3net.org/ – KM3net is de opvolger van Antares.

'Slechts een op de miljoen muonen komt van een kosmische neutrino'