

De oorsprong van hoog-energetische kosmische straling

De aarde staat voortdurend bloot aan een waar bombardement van deeltjes uit de ruimte – de zogenaamde kosmische straling. Wanneer deze deeltjes botsen met atoomkernen in de buitenste lagen van de atmosfeer ontstaat een uitgebreide lawine van secundaire deeltjes die op het aardoppervlak kunnen worden waargenomen. De kosmische straling is merendeels afkomstig van de zon, maar de oorsprong van deeltjes met een energie van meer dan 10^{12} eV is nog steeds niet ondubbelzinnig vastgesteld. Met een gecoördineerd Nederlands programma' krijgt het internationaal sterk in opkomst zijnde onderzoek op het gebied van de Astrodeeltjesfysica nu ook in Nederland een sterke impuls. Gerard van der Steenhoven

Kosmische straling is een verzameling van alle subatomaire deeltjes die vanuit het heelal op de aarde binnenvallen. Door de ruim-



Gerard van der Steenhoven is de leider van het nieuwe onderzoeksprogramma dat beschreven is in dit artikel. In 1987 is hij gepromoveerd bij de Vrije Universiteit. Thans is hij werkzaam bij het FOM-instituut voor subatomaire fysica Nikhef in Amsterdam en als hoogleraar verbonden aan de Rijksuniversiteit Groningen. Van der Steenhoven is tevens voorzitter van de Commissie voor de Astrodeeltjesfysica in Nederland (CAN) en de Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV).

gerard@nikhef.nl

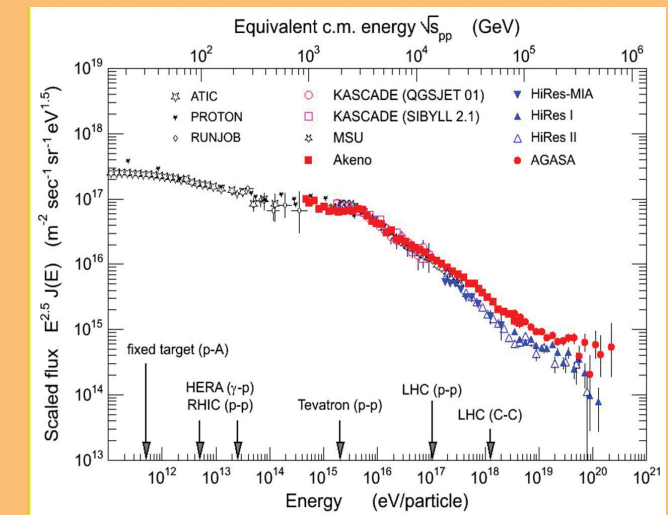
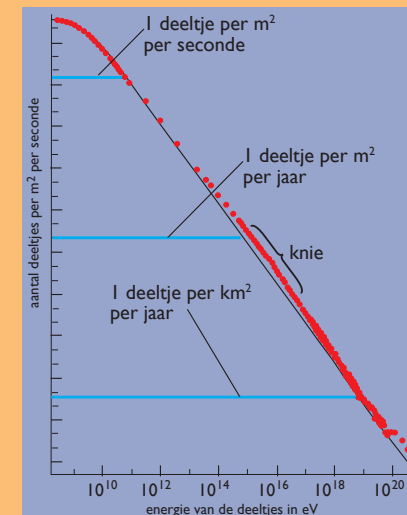
telijke uitgebreidheid van de lawine van secundaire deeltjes (en hun energie) te meten kan de oorspronkelijke energie van het invallende kosmische deeltje bepaald worden (zie kader hiernaast). Deeltjes die uitgezonden worden door de zon hebben energieën tot ongeveer 10^{12} eV. Het lijkt waarschijnlijk dat voor energieën direct daarboven supernovae een belangrijke bijdrage leveren. (Supernovae zijn explosies van sterren die aan het einde van hun levenscyclus zijn gekomen.) Recent zijn hiervoor eerste bewijzen gevonden door de H.E.S.S. atmosferische Cherenkov telescoop [1] in Namibië, waar hoogenergetische gammastraling van ongeveer 10^{12} eV is waargenomen afkomstig van

supernovae nabij het centrum van ons Melkwegstelsel. Boven 10^{15} eV is een supernova-explosie niet meer toereikend om de energie van de kosmische straling te kunnen verklaren. Daarom wordt meestal aangenomen dat kosmische deeltjes met dergelijke energieën afkomstig moeten zijn van bronnen buiten ons eigen Melkwegstelsel. Zoals te zien valt in de figuren getoond in bovenstaand kader kunnen deze deeltjes bij botsingen in de atmosfeer zwaartepuntenergieën bereiken die zeer veel hoger zijn ($>10^{20}$ eV) dan bereikt kunnen worden met de meest geavanceerde deeltjesversnellers die op aarde beschikbaar zijn (10^{17} eV bij de LHC-versneller van CERN). De versnellingsmechanismen die dit soort energieën kunnen produceren

Ultra-hoogenergetische kosmische straling

De lawines van secundaire deeltjes die ontstaan als kosmische deeltjes de atmosfeer van de aarde raken zijn gemeten over een groot energiebereik (zie figuur linksonder). De flux neemt sterk af met toenemende energie, maar vertoont overigens weinig variatie. De waargenomen fluxen zijn globaal aangegeven. Door de waargenomen flux te vermenigvuldigen met $E^{2.5}$

(met E de energie van het primaire invallende kosmische deeltje) is de figuur rechtsonder verkregen. Hierdoor worden inconsistenties zichtbaar voor energieën boven 10^{17} eV. De equivalente zwaartepuntenergieën van een aantal deeltjesversnellers is onderaan de figuur weergegeven.



en de daarbij behorende astrofysische bronnen zijn goeddeels onbekend. Meer concreet zal het onderzoek gericht zijn op de beantwoording van drie grensverleggende vragen uit de astrodeeltjesfysica, die hieronder in aparte alinea's besproken worden.

Puntbronnen van kosmische deeltjes

Het gemeten spectrum van kosmische deeltjes loopt door tot voorbij energieën van 10^{20} eV. Hoe verkrijgt kosmische straling dergelijke energieën? De enige voor de hand liggende kandidaten hiervoor lijken de meest energie-rijke explosies in het heelal te zijn die wij nu kennen, zoals Active Galactic Nuclei (AGNs), Gamma Ray Bursts (GRBs) of Micro-Quasars (μQs). Deze explosies zijn waargenomen in de (optische) sterrenkunde, en worden – in het geval van AGNs en μQs – geassocieerd met materie die via accretieschijven op zwarte gaten invalt waarbij jets ontstaan die mogelijk voor de vereiste versnellingsmechanismen verantwoordelijk zijn. De uitdaging is nu experimenteel bewijs te verkrijgen voor deze hypothese door na te gaan of

hoogenergetische kosmische deeltjes afkomstig zijn van puntbronnen die samenvallen met de bekende posities van AGNs, GRBs of μQs. Zeer recent is hiervoor een eerste aanwijzing gevonden [2].

Donkere Materie

De bewegingen van sterren in sterrenstelsels en van sterrenstelsels in clusters lijken aan te geven dat er een grote hoeveelheid materie moet bestaan die wel gevoelig is voor de zwaartekracht maar niet voor één van de andere nu bekende wisselwerkingen. Voor het bestaan van deze nieuwe vorm van materie, donkere materie, zijn ook aanwijzingen gevonden in metingen van de kosmische microgolffachtergrondstraling, zoals uitgevoerd met de WMAP-satelliet bijvoorbeeld [3]. Op basis van al dit soort gegevens wordt momenteel aangenomen dat circa 25% van de massa-energie-inhoud van het heelal uit donkere materie bestaat. Meestal wordt daarbij aangenomen dat donkere materie uit een nieuw soort elementaire deeltjes is opgebouwd, zoals de zogenaamde supersymmetrische deeltjes². Indien

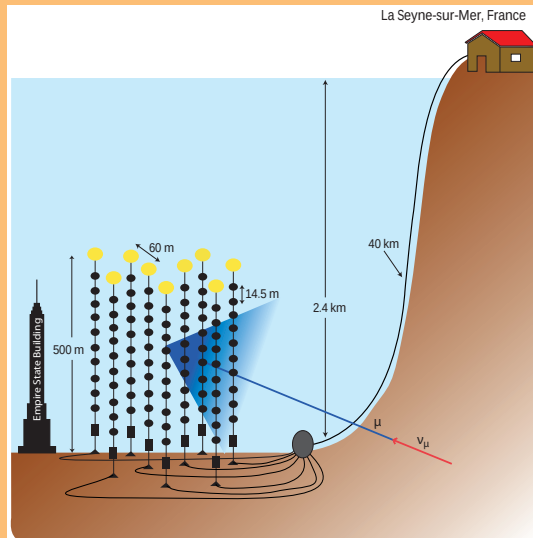
twee (stabiele) supersymmetrische deeltjes met elkaar in botsing komen en annihileren, kunnen daarbij ons al bekende deeltjes ontstaan zoals fotonen, quarks of neutrino's. De vraag is nu of een deel van de hoogenergetische kosmische straling kan worden toegeschreven aan dit soort annihilatieprocessen van donkere-materiedeeltjes. De tweede wetenschappelijke uitdaging van het nieuwe onderzoek is daarom het zoeken naar deze secundaire deeltjes die vermoedelijk afkomstig zijn van plaatsen waar donkere materie opgehoopt is, zoals de centra van sterrenstelsels of de zon.

Samenstelling van kosmische straling

Door het type deeltje te identificeren dat de buitenste lagen van de atmosfeer van de aarde heeft geraakt, kan eveneens belangrijke informatie worden verkregen over de oorsprong van kosmische straling. Een ijzerkern, bijvoorbeeld, is vermoedelijk afkomstig van een supernova-explosie, terwijl een hoogenergetisch neutrino uit de richting van de zon geassocieerd kan worden met de annihilatie van twee

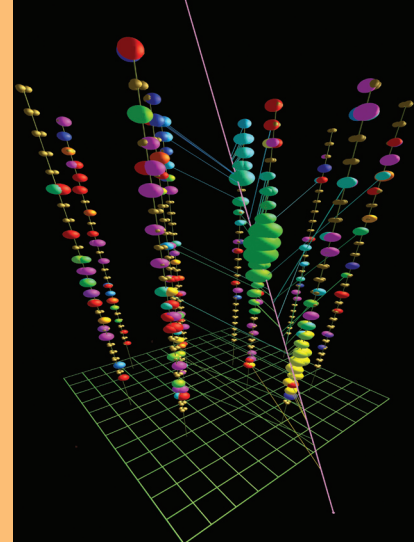
De Antares-neutrino telescoop

De Antaresttelescoop bestaat uit 12 kabels van 450 m lengte met lichtgevoelige detectoren die het Cherenkovlicht kunnen waarnemen dat uitgezonden wordt door een geladen muon dat ontstaat als een neutrino botst met een atoomkern in de zeebodem onder de telescoop



of in het water rond de telescoop. Dit wordt geïllustreerd in de linker figuur hieronder. Alleen neutrino's zijn in staat door de gehele aarde te vliegen en op deze wijze een naar boven bewegend muon te produceren.

De aarde fungeert dus als een neutrinofilter. Eén van de eerste neutrino's die met de 10-lijns Antaresdetector is waargenomen is afgebeeld in de rechter figuur. De detectorkabels, weergegeven door de verticale lijnen, staan op een rooster van 300 bij 300 m² op de zeebo-



dem. De kleur van de bollen representeert de aankomst-tijd van het lichtsignaal en de grootte de intensiteit. Het muonspoor loopt van rechtsonder naar linksboven.

donkere-materiedeeltjes. Aangezien elk van deze mogelijke bronnen van kosmische deeltjes een ander energiespectrum zal hebben, wordt aangenomen dat de samenstelling van de primaire kosmische straling verandert als functie van de energie. Zo wordt bij de hoogste energieën een overgang verwacht rond een energie van $6 \cdot 10^{19}$ eV. Bij deze energie kan een foton van de kosmische microgolffachtergrondstraling een proton in een aangeslagen toestand brengen, die vervolgens vervalt in pion en een proton van lagere energie. Dit is het zogenaamde Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK)-effect. Hierdoor wordt vermoed dat boven de drempelenergie van $6 \cdot 10^{19}$ eV de kosmische straling alleen bestaat uit protonen die afkomstig zijn van relatief nabij gelegen bronnen (< 100 Megaparsec). Protonen afkomstige van grotere afstanden moeten al afgeremd zijn vanwege het GZK-effect, en zwaardere atoomkernen kunnen al gesplitst of afgeremd worden door fo-

tonen van veel lagere energie. De derde wetenschappelijke uitdaging van het nieuwe onderzoek betreft daarom het verkrijgen van meer informatie over de chemische samenstelling van kosmische straling. Voor energieën boven 10^{15} eV geven bestaande metingen hierover weinig uitsluitsel.

De observatoria

Om de hierboven beschreven wetenschappelijke vragen te bestuderen wordt gebruik gemaakt van twee complementaire meetmethodes. Enerzijds zal gebruik gemaakt worden van neutrino telescopen (voor energieën tot 10^{16} eV en mogelijk zelfs hoger), terwijl anderzijds een netwerk van zogenaamde *air-shower* detectoren gebruikt zal worden om metingen te verrichten aan kosmische straling van de hoogste energieën (boven 10^{17} eV). In de praktijk zullen de metingen uitgevoerd worden met de Antares diepzee neutrino telescoop, een instrument dat op de bodem van Middellandse Zee vlak-

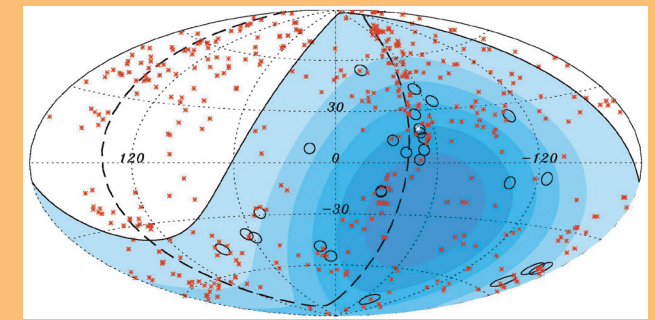
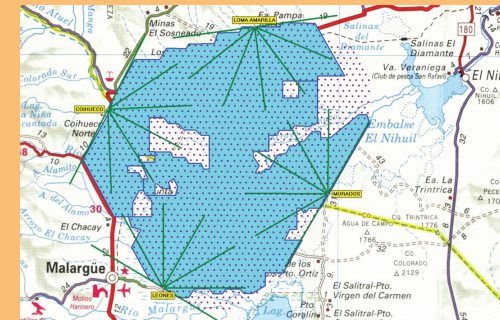
bij Toulon is gebouwd op een diepte van 2480 m, en het vrijwel voltooid Pierre Auger Observatorium (aangeduid als 'Auger') dat gebouwd is op de pampa's van West-Argentinië nabij de stad Malargüe. Meer informatie over deze twee observatoria is gegeven in bovenstaande kaders. De twee observatoria, Antares en Auger, kijken naar hetzelfde deel van de (zuidelijke) hemel. Dat wil zeggen dat er gezocht kan worden naar verschillende deeltjes die afkomstig zijn van dezelfde kosmische bron (in een complementair energiebereik). Sterker, de waarneming van neutrino's en ultrahoog energetische protonen van één bron zou een zeer belangrijke doorbraak betekenen.

Perspectief

De metingen bij Antares en Auger zijn al van start gegaan, hoewel beide observatoria nog niet helemaal voltooid zijn. Bij Antares zijn de eerste neutrino's waargenomen (zie kader hierbo-

Het Pierre Auger observatorium

Het Pierre Auger observatorium registreert *air showers* die ontstaan wanneer een ultra-hoogenergetisch deeltje de buitenste lagen van de atmosfeer raakt. De hierbij geproduceerde geladen deeltjes worden waargenomen in watertanks (rode punten in de linker figuur hieronder) die op een onderlinge afstand van 1,5 km zijn geplaatst. Wanneer deze secundaire deeltjes de watertanks passeren ontstaat Cherenkovlicht (net als voor de muon neutrino's beschreven in het kader hiernaast) dat met lichtgevoelige sensoren wordt waargenomen. Bovendien omvat het Auger observatorium



24 fluorescentietelescopen (met geel gemarkeerd in de figuur) die bij heldere maanloze nachten het fluorescentielicht van stikstofmoleculen waarneemt die aangeslagen zijn door de passerende air showers. Een recent resultaat van Auger is afgebeeld in de rechter figuur hieronder. De open cirkels representeren kosmische deeltjes met een energie van $6 \cdot 10^{19}$ eV of meer die een correlatie blijken te vertonen met eerder (optisch) waargenomen AGN's uit de Véron-Cetty Véron catalogus (*Science* **318** (2007) 938).

ven) en bij Auger is onder andere een correlatie gevonden tussen bekende – eerder waargenomen – AGNs en kosmische deeltjes met energieën boven de $6 \cdot 10^{19}$ eV (zie kader 3).

Nederland draagt op een belangrijke wijze bij aan de twee observatoria. Voor Antares is een nieuw data-acquisitiesysteem ontwikkeld, dat de gebruikers in staat stelt voor specifieke bronnen (zoals de zon of het centrum van het melkwegstelsel) met een verlaagde detectiedrempel waarnemingen te doen. Voor Auger is een netwerk van radioantennes in ontwikkeling (naar analogie van de nieuwe radiotelescoop LOFAR in Drenthe [4]) dat het mogelijk zal maken ook precisemetingen te verrichten wanneer de fluorescentietelescopen niet beschikbaar zijn (dat wil zeggen buiten de maan- en wolkenloze nachten).

De eerste resultaten van Antares en Auger zijn veelbelovend, maar laten ook zien dat er op termijn behoefte zal zijn aan nog grotere observatoria, waarmee een beduidend groter aantal deeltjes van kosmische (punt)bronnen waargenomen zal kunnen worden. Hiervoor zijn de eerste plannen al in voorbereiding. Zo zijn er EU-subsidies verkregen voor het ontwerp en voor-

studies van een neutrinotelescoop die een factor 20 of meer groter zal zijn dan Antares – het KM₃NeT-project. Om de zeer interessante *air showers* van 10¹⁹ eV of meer systematisch te kunnen bestuderen wordt er ook gesproken over het ‘Auger North’ project dat vermoedelijk in Colorado (VS) gebouwd zal gaan worden en waarmee een factor 10 meer kosmische deeltjes van de hoogste energieën zullen kunnen worden waargenomen. In het kader van het nieuwe FOM-onderzoeksprogramma zal ook bijgedragen worden aan voorstudies ten behoeve van deze vervolprojecten.

Referenties

- 1 The H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) Collaboration, *Nature* **432** (2004) 75.
- 2 The Pierre Auger Collaboration, *Science* **318** (2007) 938.
- 3 C.L. Bennett et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148** (2003) 1.
- 4 De Low Frequency Array (LOFAR) is een nieuwe digitale radiotelescoop – in aanbouw in Drente – die zal bestaan uit 96 antennes werkend in twee frequentiegebieden, 20 – 80 MHz en 120 – 240 MHz. De eerste antennesstations zijn al operationeel. Zie www.lofar.org.

Noten

- 1 Dit onderzoeksprogramma is een samenwerkingsverband tussen wetenschappelijke groepen van het Nikhef, het KVI, de Radboud Universiteit, de Universiteit van Amsterdam en de Universiteit Utrecht.
- 2 In supersymmetrische modellen wordt er voor elke type boson een corresponderend fermion geïntroduceerd, en vice versa. Hiermee kunnen problemen m.b.t. de unificatie van de wisselwerkingen en massacorrecties van de elementaire deeltjes opgelost worden.