

De oorsprong van de hoogst energetische kosmische straling

Het Pierre Auger observatorium heeft tot doel de aard en oorsprong van de hoogst energetische kosmische straling te onderzoeken. Om dit doel te bereiken is een detector van 3000 vierkante kilometer gebouwd in Argentinië. Bij dit observatorium worden verschillende detectietechnieken gebruikt waardoor de aard en energie van de invallende straling beter bestudeerd kunnen worden. In dit artikel worden twee resultaten besproken. Allereerst vertoont de gemeten flux van kosmische straling als functie van de energie een extra afname bij een energie van ongeveer 50 EeV, een mogelijke verklaring hiervoor is het zogenaamde GZK-effect. Het tweede resultaat is dat deeltjes met een energie boven de GZK-drempel niet uniform uit de ruimte komen, maar dat er een anisotropie is. Deze anisotropie is gecorreleerd met actieve kernen van melkwegstelsels.

Charles Timmermans en Ad van den Berg

232

In 1936 kreeg Victor Franz Hess de Nobelprijs voor de natuurkunde voor de ontdekking van kosmische stralen; in die tijd werd dit door het Nobelcomité een nieuwe eigenaardige vorm van straling genoemd. Twee jaar later plaatste de Franse fysicus Pierre Victor Auger een aantal deeltjesdetec-

Charles Timmermans studeerde natuurkunde in Nijmegen, en promoveerde in 1992 op de productie van muonen rond de Z-resonantie. Na een verblijf van 6 jaar in Amerika keerde hij terug naar Nijmegen als akademieonderzoeker. Sinds 1998 is hij bezig met aspecten van deeltjeslawines en kosmische straling, onder andere in het HiSPARC-project, waarvoor hij in 2007 de EPS outreach prize kreeg, en binnen het Pierre Auger-project wat hier beschreven wordt.

c.timmermans@hef.ru.nl



toren in de Franse Alpen. Hij nam in verschillende detectoren op hetzelfde moment deeltjes waar. Dit was de eerste waarneming van een lawine van deeltjes. Hij concludeerde dat de totale energie in deze lawine ongeveer 10^{15} eV was, verreweg de hoogste energie waargenomen tot dan toe. Aangezien alle deeltjes tegelijk waargenomen werden, kon er vanuit gegaan worden dat ze het gevolg waren van de inslag van één enkel deeltje met een energie van ongeveer 10^{15} eV. In 1962 werd voor de eerste keer een deeltje uit de ruimte waargenomen met een energie van ongeveer 10^{20} eV. Deze primaire energie is meer dan 1.000.000 maal zo groot als de energie die binnenkort bij de LHC (Large Hadron Collider) bereikt kan worden (7×10^{12} eV voor protonbundels). Het probleem bij het bestuderen van hoog-energetische deeltjes uit de ruimte is de lage flux. Hierdoor is een zeer grote detector noodza-

kelijk om een redelijke telsnelheid te krijgen. Het Pierre Auger Observatorium in Argentinië is geconstrueerd met een totale oppervlakte van 3000 km². Het is geconstrueerd om de aard en de oorsprong van de hoogst energetische kosmische straling nauwkeurig te bestuderen. Op het noordelijke halfrond is een nog groter observatorium voorzien, met een oppervlakte van 20.000 km² wat overeenkomt met 60% van het landoppervlak van Nederland. Dit deel van het observatorium zal in Lamar, Colorado (VS) worden gebouwd. Het wordt niet verwacht dat het voor 2010 data zal nemen.

Het Pierre Auger Observatorium

Het Pierre Auger Observatorium werd voor het eerst in 1992 door Jim Cronin en Alan Watson voorgesteld. Ontwerpstudies voor dit project zijn in 1995 begonnen. Het zuidelijk deel van het observatorium staat in Malargüe, Ar-



Figuur 1 De twee belangrijkste detectietechnieken van het Pierre Auger Observatorium. Op de voorgrond een watertank en op de heuvel een fluorescentiedetector met gesloten deuren. Het zonnepaneel op de watertank staat naar het noorden gericht. De antennes op de watertank en in de hoge mast naast het fluorescentiegebouw worden gebruikt voor de communicatie tussen watertanks en de fluorescentiedetector en met de centrale campus.

gentinië en zal eind 2008 compleet zijn. Het is het resultaat van een samenwerking van bijna 300 fysici uit 17 verschillende landen, waaronder Nederland [1].

Ultrahoog-energetische kosmische stralen ($> 10^{18}$ eV = 1 EeV) worden op een indirecte manier waargenomen. Men observeert de deeltjeslawine, die veroorzaakt wordt door de inslag van de kosmische straling in de atmosfeer. In deze deeltjeslawines worden miljarden deeltjes gecreëerd. Een klein deel hiervan bereikt het oppervlak van de aarde. Het Pierre Auger Observatorium, te zien in figuur 1, gebruikt twee verschillende technieken om deeltjeslawines te detecteren en om hun eigenschappen te bepalen.

Allereerst wordt het aantal deeltjes dat op het aardoppervlak aankomt, vastgesteld met behulp van de oppervlaktedetector, die bestaat uit 1600 watertanks geplaatst op een hexagonaal rooster. In water ontstaat Cherenkovlicht doordat geladen secundaire deeltjes van de lawine, die de watertanks treffen, sneller door het water gaan dan licht in water zou doen. Met behulp van drie fotomultiplicatorbuizen, die de tank

continu in de gaten houden, wordt deze Cherenkovstraling geregistreerd. Het elektrische signaal dat uit deze fotomultiplicatorbuizen komt is evenredig aan de hoeveelheid gedetecteerd licht, en, aannemende dat ieder deeltje evenveel licht produceert, aan het aantal secundaire deeltjes dat tegelijk door het water is gegaan. Door de metingen van de verschillende watertanks met elkaar te combineren is het mogelijk een dichtheidsverdeling van secundaire deeltjes op het aardoppervlak te verkrijgen.

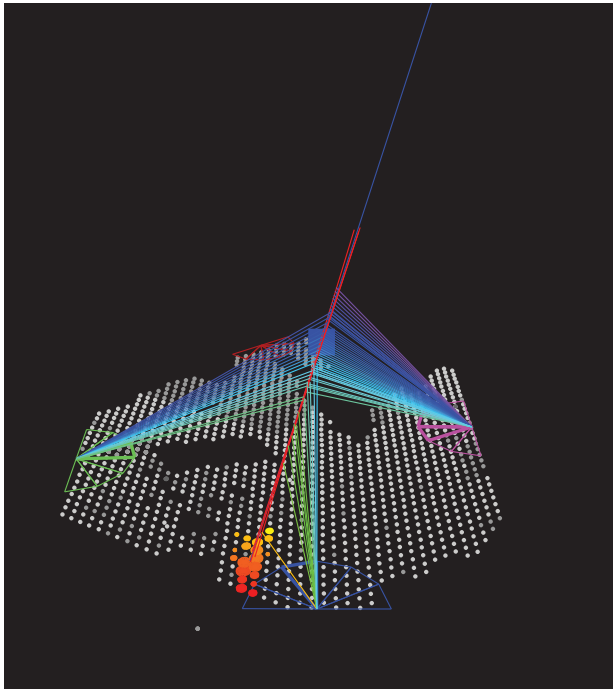
Hiermee wordt dus een voetafdruk van de deeltjeslawine geregistreerd, die gebruikt wordt om de richting en de energie van de kosmische straal te reconstrueren. Daarnaast wordt fluorescentielicht waargenomen met behulp van optische telescopen, die uitgerust zijn met gesegmenteerde camera's (vergelijkbaar met het facetoog van een insect). Dit fluorescentielicht wordt veroorzaakt doordat de geladen secundaire deeltjes stikstofmoleculen in de atmosfeer naar een aangeslagen toestand brengen. Het aantal aangeslagen stikstofmoleculen is

evenredig met de totale afstand, die alle geladen deeltjes in de deeltjeslawine samen afgelegd hebben, en dus met het totaal aantal secundaire deeltjes. Door de hoeveelheid fluorescentielicht te meten is het mogelijk de ontwikkeling van de deeltjeslawine in de atmosfeer te volgen. De twee verschillende detectoren zijn te zien in figuur 1.

Ad van den Berg studeerde sterrenkunde aan de universiteit van Utrecht en promoveerde in 1983 op de Rijksuniversiteit Groningen op een onderzoek naar de ($d, {}^6\text{Li}$) kernreactie op middelzware en zware kernen uitgevoerd op het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI). Na een verblijf van 2 jaar in Amerika en 2 jaar in Utrecht keerde hij terug in dienst van het KVI waarbij hij onderzoek deed aan kernreacties, die belangrijk zijn in stellaire processen. Sinds 2005 geeft Van den Berg leiding aan het astrodeeltjesfysica onderzoek op het KVI en vertegenwoordigt hij Nederland in het Pierre Auger samenwerkingsverband, waarbij hij leiding geeft aan onderzoek naar radiodetectie van kosmische stralen bij dit observatorium.



berg@kvi.nl



Figuur 2 Visualisatie van een waargenomen deeltjeslawine geregistreerd met de watertanks (gekleurde cirkels in het rooster) en met alle fluorescentiedetectoren (lijnen die in de telescopen convergeren).

Figuur 2 toont schematisch een deeltjeslawine die met beide technieken wordt gezien en gereconstrueerd. Beide meettechnieken hebben hun voor- en nadelen. De watertanks zijn 98% van de tijd operationeel. Door de gegevens van een aantal watertanks met elkaar te combineren kan de oorspronkelijke richting van de deeltjeslawine (en daarmee de richting van de kosmische straal) met een nauwkeurigheid van beter dan 1° worden bepaald. De bepaling van de energie van de kosmische straal met behulp van alleen de gegevens van de watertanks is lastiger en heeft een relatief grote onzekerheid. Slechts een fractie ($< 10\%$) van alle deeltjes uit de lawine bereikt het aardoppervlak. Om de oorspronkelijke energie van de kosmische straal te bepalen, moet het ontstaan en de ontwikkeling van de deeltjeslawine volledig berekend worden, waarbij er grote onzekerheden zijn in de werkzame doorsnede voor de verschillende reacties die plaatsvinden in de atmosfeer.

De fluorescentiedetectoren zijn slechts ongeveer 10% van de tijd actief, doordat ze alleen in heldere nachten met weinig of geen maanlicht gebruikt kunnen worden. De richtings- en energiebepalingen met behulp van deze detectoren zijn uitstekend, zeker wanneer deze gegevens met die van de watertanks gecombineerd worden. In dit geval zijn er nauwelijks modelafhankelijke onze-

kerheden, omdat de ontwikkeling van de deeltjeslawine in de atmosfeer wordt gemeten en niet via modellen behoeft te worden berekend. De gecombineerde gegevens van watertanks en fluorescentiedetectoren worden gebruikt om de energiebepaling, die met behulp van alleen de watertanks wordt gedaan, te kunnen kalibreren. De kwaliteit van de correlatie tussen beide detectietechnieken en de statistische nauwkeurigheid bepalen de onzekerheid op de uiteindelijke energiekalibratie. Meer details zijn te lezen in het kader *Het waarnemen van deeltjeslawines met het Pierre Auger Observatorium*.

De flux als functie van de energie: een breuk in het spectrum

In figuur 3 is de flux van de gedetecteerde deeltjeslawines uitgezet als functie van de gereconstrueerde energie. Voor deze reconstructie zijn alleen die deeltjeslawines gebruikt die ten opzichte van het zenit een invalshoek hadden, die kleiner is dan 60° (meer dan 30° boven de horizon). De verhouding tussen de hoogste en laagste gemeten energie is een factor 100, waarbij de maximale energie meer dan 100 EeV is (zie pagina 233).

Als we het gemeten energiespectrum

Pierre Auger

Pierre Victor Auger (1899-1993) was een Franse fysicus, die Geiger-Müller-deeltjesdetectoren had geplaatst in de Franse Alpen om te onderzoeken of de hoeveelheid aan coincidenties tussen twee van deze detectoren groter was dan men op puur statistische gronden kan verwachten. Door een systematische studie, waarbij hij de detectoren op verschillende afstanden van elkaar plaatste, zag hij af en toe een nauwkeurige correlatie in de registratietijd van gebeurtenissen in deze deeltjesdetectoren. Het begrip deeltjeslawine werd hiermee geboren en hij legde het verband tussen deze deeltjeslawine en kosmische stralen. Het grootste observatorium voor het bestuderen van kosmische stralen is daarom naar hem genoemd.

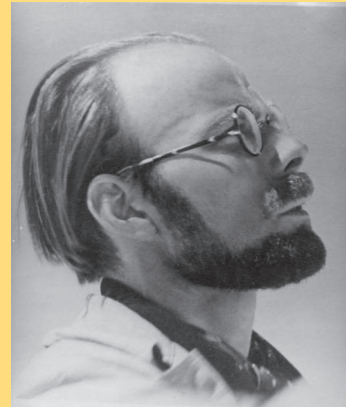


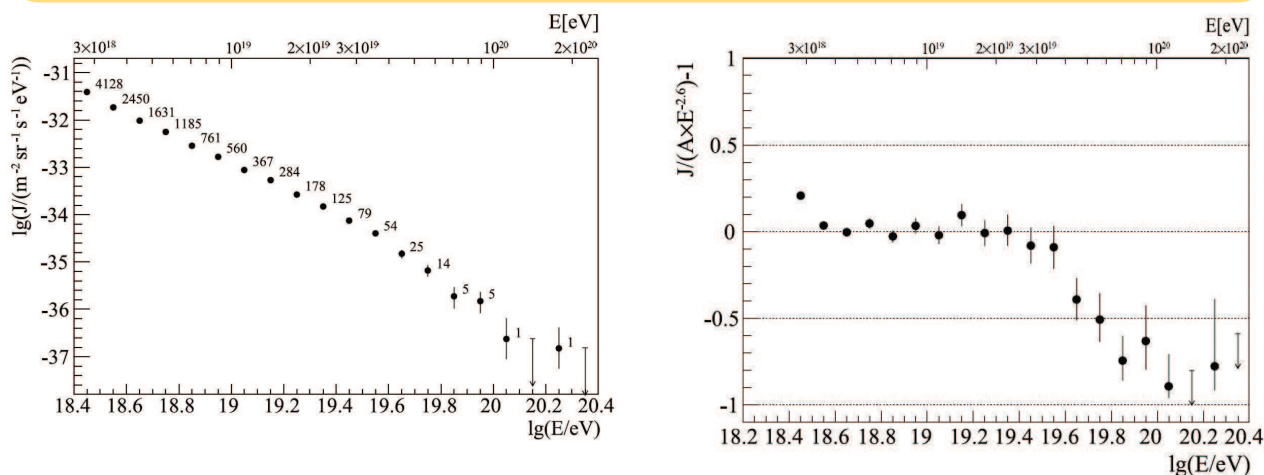
Foto geplaatst met toestemming van de Auger-Berl familie.

vergelijken met een fluxspectrum, dat een constante exponent heeft voor het verloop als functie van de energie (zoals in het rechterdeel van figuur 4), dan zien we duidelijk een extra afname rond 40 EeV. Bij deze energie kan de GZK-drempel worden verwacht (zie kader *Het GZK-mechanisme*). Mocht het GZK-mechanisme de verklaring voor de bijkomende afname zijn, dan is de consequentie dat de kosmos ondoordringbaar wordt voor protonen met een energie hoger dan deze drempelwaarde. Kosmische stralen met een energie van meer dan 60 EeV kunnen dan maximaal een afstand afleggen van ongeveer 100 Mpc, wat overeenkomt met $326 \cdot 10^6$ lichtjaar. Dit is vergelijkbaar met de diameter van de Lokale Supercluster, waartoe ons melkwegstelsel behoort. Het voordeel van de beperkte afstand tot de bron is dat magneetvelden geen grote invloed kunnen hebben op de richting van de elektrisch geladen deeltjes. Dat wil zeggen dat de aankomstrichting van deze deeltjes op aarde gebruikt kan worden om te bepalen waar de bron van de deeltjes is. Bovendien wordt het

Deeltjeslawines waarnemen met het Pierre Auger Observatorium

Om de waarnemingen van dit observatorium te kunnen interpreteren is een aantal parameters belangrijk. Dat zijn de energie van de kosmische deeltjes, hun aankomst-richting en de samenstelling van het deeltje (massa en/of lading). Daarom moeten de gebruikte meetmethoden geschikt zijn om deze parameters te kunnen bepalen. Het aantal secundaire deeltjes dat geproduceerd wordt in de atmosfeer is direct gekoppeld aan de energie van het inkomende deeltje. De aankomst-richting wordt bepaald door de centrale as van de deeltjeslawine te reconstrueren uit de gegevens van de detectoren. Ook de ontwikkeling van de deeltjeslawine is een belangrijke bron van informatie. Hoog in de atmosfeer worden er relatief weinig secundaire deeltjes gevormd, maar door voortdurende wisselwerkingen met moleculen van de atmosfeer ontstaan er steeds meer deeltjes, tot de kinetische energie van de secundaire deeltjes te laag wordt om de volgende generatie aan deeltjes te creëren. Hierdoor ontwikkelt zich in de atmosfeer een profiel van de deeltjesdichtheid (langs de centrale as van de deeltjeslawine) waarin een maximum aan secundaire deeltjes gevonden wordt. Dit maximum is gerelateerd aan de massa van het primaire deeltje. Al deze parameters (energie, richting en massa) kunnen bepaald worden met de fluorescentiedetectoren. De detectoren op het oppervlak van de aarde meten de verdeling van secundaire deeltjes slechts in één vlak, waardoor een snapshot van de deeltjeslawine verkregen wordt. Door te meten wanneer de voorkant van de deeltjeslawine deze detectoren passeert kan de aankomst-richting bepaald worden. Hoe meer detectoren geraakt zijn, hoe nauwkeuriger deze bepaling is. Het front van de deeltjeslawine is enigszins gekromd. Deze kromming en de stijgtijd van de pulsen in de detectoren leveren informatie over de massa van het primaire deeltje. Tenslotte kunnen de oppervlakedetectoren een maat voor de energie van het deeltje geven, door de dichtheid van de secundaire deeltjes op het aardoppervlak, en de verdeling hiervan als functie van de afstand tot de centrale as van de deeltjeslawine te bepalen.

tjeslawine) waarin een maximum aan secundaire deeltjes gevonden wordt. Dit maximum is gerelateerd aan de massa van het primaire deeltje. Al deze parameters (energie, richting en massa) kunnen bepaald worden met de fluorescentiedetectoren. De detectoren op het oppervlak van de aarde meten de verdeling van secundaire deeltjes slechts in één vlak, waardoor een snapshot van de deeltjeslawine verkregen wordt. Door te meten wanneer de voorkant van de deeltjeslawine deze detectoren passeert kan de aankomst-richting bepaald worden. Hoe meer detectoren geraakt zijn, hoe nauwkeuriger deze bepaling is. Het front van de deeltjeslawine is enigszins gekromd. Deze kromming en de stijgtijd van de pulsen in de detectoren leveren informatie over de massa van het primaire deeltje. Tenslotte kunnen de oppervlakedetectoren een maat voor de energie van het deeltje geven, door de dichtheid van de secundaire deeltjes op het aardoppervlak, en de verdeling hiervan als functie van de afstand tot de centrale as van de deeltjeslawine te bepalen.



Figuur 3 Links: het gemeten fluxspectrum als functie van de totale energie in de deeltjeslawine. De verticale onzekerheid is alleen statistisch. De systematische onzekerheid op de energie bedraagt ongeveer 22%. Rechts: het verschil tussen het gemeten spectrum en een theoretische flux, die met een constante macht kleiner wordt als functie van de energie: $J = A \times E^{-2.6}$. De horizontale schaal boven in de figuur is de totale energie, de onderste schaal geeft de logaritmische waarde hiervan aan.

aantal potentiële bronnen waaruit deze straling afkomstig kan zijn begrensd, immers boven de GZK-drempel is er een beperkte horizon waarbinnen deze stralen kunnen reizen.

De bron van de hoogst energetische kosmische straling?

Een van de belangrijkste vragen met betrekking tot ultrahoog-energetische kosmische straling is waar deze straling vandaan komt. Voordat deze vraag beantwoord kan worden, zijn er nogal wat problemen te overwinnen. Allereerst is er het probleem van de lage flux. Voor het energiebereik boven de 40 EeV komt er per jaar maar 1 deeltje

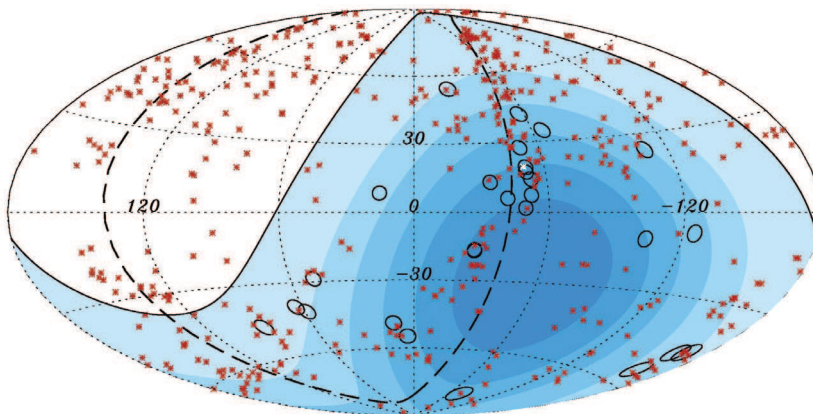
per 100 km² op aarde terecht. Dit probleem is te overwinnen door een zeer grote detector te bouwen en veel geduld te hebben; met het zuidelijk observatorium kunnen er ongeveer 30 deeltjes per jaar gemeten worden. Een ander probleem is dat we geen mechanisme kennen dat deeltjes met een dergelijke energie kan produceren.

De Pierre Auger-samenwerking probeert een antwoord te vinden op de vraag of de deeltjes met een energie die hoger is dan de GZK-drempel uniform uit alle richtingen op aarde komen. Daarnaast is het belangrijk om te proberen vast stellen of de bronnen van hoog-energetische straling samenvallen met bekende objecten in de ruimte.

Al eerder hebben waarnemingen aangegeven, dat er een anisotrope verdeling is in de aankomst-richting van ultrahoog-energetische kosmische straling. De statistische behandeling van deze claims is altijd onderwerp van debat geweest. De statistiek van de experimenten is beperkt, en de mogelijke bronnen van deze straling onbekend. Daardoor heeft er altijd een optimalisatie van het signaal plaatsgevonden, die op de data zelf is gebaseerd. Eigenschappen als hoekafstand tot een mogelijke bron, minimale energie van de gecorrleerde straling en de selectie van de mogelijke bronnen zelf worden met

Het GZK-mechanisme

Direct na de ontdekking van de kosmische microgolf achtergrondstraling in de jaren 1960 door Arno Penzias en Robert W. Wilson realiseerden Giorgiy Zatsepin en Vadim Kuz'min en, onafhankelijk van hen, Kenneth Greisen, zich dat de fotonen van deze 2,7 K straling kunnen wisselwerken met protonen. Als de kinetische energie van deze protonen hoog genoeg is, kan het foton een zeer sterke resonantie in het proton aanslaan (de Deltaresonantie), die na verloop van tijd weer vervalt onder uitzending van een pion. Door deze wisselwerking verliest het proton gemiddeld 20% van zijn kinetische energie per botsing, tot de energie te laag wordt om de resonantie aan te kunnen slaan. Deze drempelwaarde ligt bij ongeveer 50 EeV. De beschrijvingen van de meeste versnellingsprocessen in kosmische objecten leveren een fluxspectrum dat met een constante exponent afvalt als functie van de energie. Als er protonen in deze kosmische objecten versneld kunnen worden tot een energie groter dan 50 EeV, en als ze daarna een afstand afleggen, waarbij de kans op een wisselwerking met een foton zeer groot is ($D > 100$ Mpc), dan zullen deze protonen vertraagd worden tot hun energie maximaal 50 EeV is. Dus beneden deze energie verwacht men dan een toename in het fluxspectrum, en boven deze energie een afname in de flux. Deze toename en afname zijn uiteraard relatief ten opzichte van het oorspronkelijke spectrum, dat zeer sterk afvalt als functie van de energie. Als er deeltjes worden waargenomen die een energie hebben die hoger is dan de GZK-drempel, betekent dit hoogstwaarschijnlijk dat hun oorsprong lag binnen de GZK-horizon, die ongeveer 100 Mpc bedraagt.



Figuur 4 Aitoff-projectie, vernoemd naar David A. Aitoff die deze projectietechniek in 1889 introduceerde, van de hemelbol in galactische coördinaten. De cirkels duiden de aankomstrichting aan van kosmische stralen met een energie groter dan 57 EeV, waarbij de straal van de cirkel de openingshoek ψ weergeeft. De rode kruisjes geven de positie weer van de 472 actieve kernen van melkwegstelsels, die het dichtst bij de aarde staan. Het witte kruisje is de positie van het stelsel Centaurus A, een van de dichtstbijzijnde clusters met een actief zwart gat in het centrum. De blauwe contouren geven het gebied aan de hemel weer, dat met behulp van het Auger observatorium in Argentinië vanaf 30° boven de horizon waargenomen kan worden.

behulp van de gemeten data geoptimaliseerd. De belangrijkste kritiek gaat over de berekening van de significantie van een signaal na optimalisatie.

In het huidige project wordt dit onderzocht door eerst een set variabelen te formuleren, zoals de minimum-energie van de kosmische stralen die gebruikt wordt in de dataset (E_{\min}), de openingshoek (ψ) tussen de aankomstrichting van deze stralen en astrofysische objecten, en de maximale

afstand (D_{\max}) van deze astrofysische objecten, die gecatalogiseerd zijn naar hun verschijningsvorm [2]. Deze variabelen zijn geoptimaliseerd, gebruik makend van de data van waargenomen kosmische stralen tussen 1 januari 2004 en 27 mei 2006. De sterkste correlatie werd gevonden door een catalogus te gebruiken van quasars en actieve kernen van melkwegstelsels samengesteld door Véron-Cetty en Véron (versie 12) [3]. De waarden van de va-

riabelen, waarbij deze correlatie maximaal was, zijn $E_{\min} = 56$ EeV, $\psi = 3,1^\circ$, en $D_{\max} = 75$ Mpc. De gevonden waarden ondersteunen de hypothese dat het GZK-effect in het energiespectrum zichtbaar is.

Na de optimalisatie op bestaande data, is getest op nieuwe data of de zo ontwikkelde criteria de hypothese bevestigt. De test is afgelopen als de isotrope aanname (geen correlatie) met 95% zekerheid bevestigd is of met 99% zekerheid ontkracht (een duidelijke correlatie). De data genomen tussen mei 2006 en augustus 2007 ontkrachten de isotrope hypothese met 99% zekerheid. De conclusie is dan ook dat kosmische straling met extreme energieën niet uniform op aarde terecht komt, maar gecorreleerd is met de distributie van actieve kernen van melkwegstelsels die dichtbij staan. Figuur 4 laat dit ook zien. Of de actieve kernen daadwerkelijk bronnen van hoog-energetische straling zijn is nog niet gezegd. Actieve kernen van melkwegstelsels kunnen ook in de buurt liggen van de werkelijke bron van deze hoog-energetische kosmische stralen. De speurtocht naar de bronnen van deze straling is maar net begonnen.

Op dit moment wordt een nieuwe detectietechniek ontwikkeld voor het Pierre Auger Observatorium: het waarnemen van de deeltjeslawine met behulp van radiodetectietechnieken rond de ultrakortegolfband (1-10 m). Het voordeel van radiodetectie is, dat net als bij fluorescentiedetectie, de ontwikkeling van de deeltjeslawine in de atmosfeer nauwkeurig gemeten kan worden, maar dat tegelijk de detectiemethode vrijwel 100% van de tijd kan toegepast worden. Ook de hoekresolutie, die met radiodetectie bereikt kan worden, is vergelijkbaar met of beter dan de conventionele methode. In de komende jaren verwachten we de kalibratie van het radiosignaal uit te voeren met behulp van de gegevens van de conventionele detectoren. Een beschrijving van deze detectietechniek wordt gegeven in [4].

Referenties

- 1 G. van der Steenhoven, *NTvN* **74-3**, 90, 2008
- 2 The Pierre Auger Collaboration, *Science* **318**, 938, 2007.
- 3 M. P. Véron-Cetty en P. Véron, *Astron. Astrophys.* **455**, 733, 2006.
- 4 S. Buitink en S. Lafebre, *NTvN*, **73-6**, 180, 2007.