

Showering waargenomen met HiSPARC-detectoren

In de deeltjesfysica verstaat men onder een *shower* een lawine van deeltjes veroorzaakt door een invallend primair deeltje met voldoende energie. Met behulp van scintillatoren en absorbers kan zo'n deeltjeslawine worden waargenomen. Bij HiSPARC gebruiken we dit mechanisme om indirect de primaire kosmische deeltjes die de atmosfeer binnendringen te detecteren.

Henk Buisman, Daniel Wilke de Souza en Jos Steijger

Deeltjeslawines

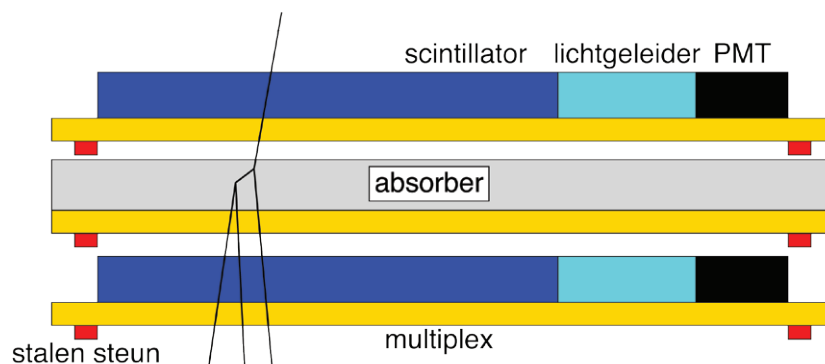
Na het binnendringen van een kosmisch deeltje in de atmosfeer heeft de wisselwerking van het deeltje met het atmosferische gas een zogenaamde *extensive air shower* (EAS) tot gevolg. Als het kosmische deeltje onvoldoende energie heeft, dooft de lawine in de atmosfeer uit. Als de energie van het primaire kosmische deeltje voldoende groot is ($E > 10^{14}$ eV) kan de lawine het aardoppervlak bereiken. Dit zijn slechts enkele tientallen deeltjes per vierkante meter per jaar. Deze deeltjes bestaan, afgezien van de moeilijk te detecteren neutrino's die in het vervolg buiten beschouwing blijven, vooral uit protonen (ongeveer 75%) en alfadeeltjes (bijna 25%). Verder bestaat nog een heel klein percen-

tage uit elektronen, zwaardere ker-
nen en gammafotonen. De deeltjes
in de lawine zijn bij het bereiken van
het aardoppervlak verspreid over een
oppervlakte tussen de 10^4 - 10^7 m². Een
detector van 1 m² op het aardoppervlak
ontvangt zo deeltjes uit ongeveer
0,1-1 extensive air showers per seconde.
Dit betekent dat twee detectoren
die op enige afstand van elkaar staan
opgesteld, eenzelfde shower kunnen
waarnemen afkomstig van eenzelfde
primair kosmisch deeltje. Via coïncidentie
van beide detectorsignalen kan het
gewenste signaal onderscheiden
worden van de achtergrond.

Showering

De sterke wisselwerking tussen de
binnendringende deeltjes (protonen

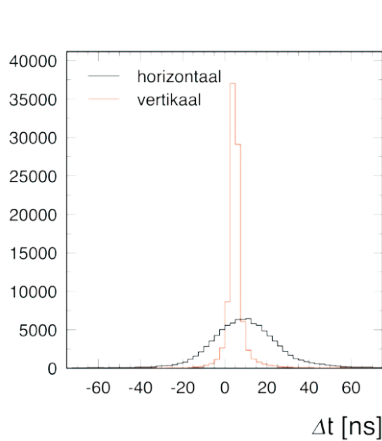
en heliumkernen) en het atmosferische
gas resulteert hoofdzakelijk in
grote aantallen geladen en neutrale
pionen. Daarnaast blijven er snelle
brokstukken van het projectiel of de
getroffen atoomkern over. De afstand
die wordt afgelegd tussen twee opeenvolgende
interacties wordt gegeven
door de nucleaire interactielengte. In
lucht bedraagt deze nucleaire interactielengte
90,1 g cm⁻². De ongeladen
pionen vervallen vrijwel direct (levensduur
 $8,410 \cdot 10^{-17}$ s) naar twee fotonen
en spelen verder geen rol meer in
de lawine. De geladen pionen hebben
een langere levensduur ($2,610 \cdot 10^{-8}$ s).
De afstand die zij kunnen afleggen
voordat zij vervallen, is veel groter dan
de nucleaire interactielengte. Deze
deeltjes, en de snelle brokstukken,



Figuur 1 Schematische tekening van de opstelling. Twee HiSPARC-detectoren zijn op elkaar geïnstalleerd, met daartussen ruimte voor extra materiaal waarin showering kan plaatsvinden. Zowel de detectoren als het absorberende materiaal zijn ondersteund door een multiplex legplank. Een derde detector staat op enige meters afstand opgesteld. Deze wordt gebruikt om triggersignaal te produceren.

Materiaal	X_0 (cm)
Aluminium	8,9
Staal	1,76
Lood	0,56
Multiplex	56,8
BC408	42,5

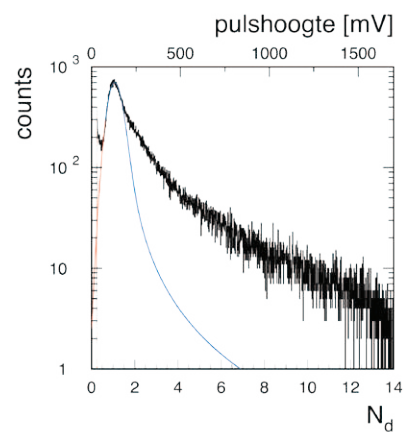
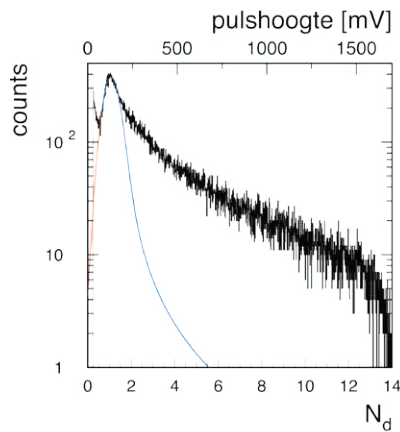
Tabel 1 De lengte overeenkomend met één stralingslengte van verschillende materialen [2]. De stralingslengte van multiplex is berekend met vergelijking (27.25) in [2]. BC408 wordt gebruikt als scintillatiemateriaal.



Figuur 2 Tijdverschillen tussen de signalen in twee detectoren. In zwart: de tijdsverschillen tussen twee detectoren die in een horizontaal vlak op een afstand van ongeveer 5 m van elkaar liggen. De breedte van de verdeling wordt bepaald door de correlatie tussen twee deeltjes in dezelfde EAS. In rood: de tijdsverschillen tussen twee detectoren die boven op elkaar liggen, gescheiden door de absorber. De kleinere verdeling laat zien dat hetzelfde deeltje twee maal gemeten is door die detectoren.

zijn hierdoor in staat om weer nieuwe interacties aan te gaan. De lawine dooft pas uit als de energie per deeltje onvoldoende is om nieuwe deeltjes te produceren. De keten van gebeurtenissen zoals hierboven beschreven wordt hadronische showering genoemd.

Als een geladen deeltje het elektrisch veld van een atoomkern passeert wordt een foton uitgezonden (Bremsstrahlung). Als het foton voldoende energie heeft, kan paarproductie van een elektron en een posi-



Figuur 3 Pulshoogtespectrum voor de onderste detector. Links met een absorber. In zwart de data als functie van pulshoogte (bovenste schaal). In blauw de fit voor één geladen deeltje, in rood de data zonder de bijdrage van gammafotonen. Extrapolatie naar nul geladen deeltjes is het resultaat van de fit. Op de onderste schaal is de pulshoogte af te lezen in eenheden van N_d , het aantal geladen deeltjes dat de scintillator passeert. Rechts dezelfde plot maar nu zonder absorber.

tron optreden. Zo verdubbelt bij iedere stap het aantal aanwezige deeltjes. Dit wordt een elektromagnetische shower genoemd. De gemiddelde afstand tussen twee van deze interacties is de stralingslengte, $36,6 \text{ g cm}^{-2}$ in lucht. Een extensive air shower begint als een hadronische shower, maar door de gammafotonen die in de hadronische shower geproduceerd worden, verandert het na verloop van tijd in een elektromagnetische shower. De deeltjes die op het aardoppervlak waargenomen kunnen worden, zijn hierdoor voornamelijk door de elektromagnetische showers geproduceerd. Dit verklaart meteen de samenstelling van detecteerbare deeltjes op het aardoppervlak: ongeveer 80% van de deeltjes zijn gammafotonen, 20% elektronen of positronen, en ongeveer 1% muonen, zie [1].

Het experiment

Voor het waarnemen van de showers proberen we de productie van nieuwe deeltjes in een absorber aan te tonen. De coïncidentie tussen twee HiSPARC-scintillatoren op enige meters afstand naast elkaar opgesteld, toont experimenteel de aanwezigheid van de showers aan. Onder een van deze twee detectoren wordt een derde detector geïnstalleerd. Tussen deze twee op elkaar gemonteerde detectoren kunnen platen van verschillende materialen met verschillende diktes geplaatst worden (zie figuur 1). Voor dit experiment zijn platen aluminium, staal en lood

gebruikt. Tabel 1 geeft de numerieke waarden voor de stralingslengte (X_0) van de gebruikte materialen.

De metingen

De tijdverschillen tussen twee detectoren op enige meters afstand van elkaar leveren een normaalverdeling (zie figuur 2) met een standaarddeviatie $\sigma = 14,0 \text{ ns}$. De tijdverschillen tussen de twee detectoren die boven elkaar liggen, zijn uiteraard veel kleiner ($\sigma = 2,2 \text{ ns}$). De correlatie tussen de twee triggerdetectoren bestaat, zoals eerder beschreven, omdat de detectoren twee deeltjes uit dezelfde shower zien. In het geval dat de twee detectoren boven elkaar liggen, wordt hetzelfde deeltje in beide scintillatoren gedetecteerd of worden de extra deeltjes die gemaakt werden in het absorberende materiaal in de onderste detector waargenomen. Deze komen uit dezelfde interactie en dit resulteert in een kleinere spreiding.

Henk Buisman studeerde biologie en natuurkunde (onderwijsvariant) in Leiden en promoveerde daar op een onderwerp in de elektrofysiologie. Hij is in deeltijd docent natuurkunde in Den Haag en aansluitcoördinator voor het vwo bij de afdelingen Natuur- en Sterrenkunde aan de Universiteit Leiden. Hij coördineert daar het HiSPARC-netwerk in Zuid-Holland en Zeeland. In 2010-2011 was hij in het kader van het LIO-programma verbonden aan het Nikhef. Het onderzoek beschreven in dit artikel heeft in dit kader plaatsgevonden.



buisman@Physics.LeidenUniv.nl

Daniel Wilke de Souza behaalde aan de EFA in Amsterdam zijn tweede-graads bevoegdheid voor natuurkunde en behaalde aan de HU in Utrecht zijn eerstegraads bevoegdheid. Sinds 1988 is hij werkzaam als docent elektrotechniek en natuurkunde. In het schooljaar 2010-2011 was hij via het FOM-programma Leraar in Onderzoek (LIO) verbonden aan het Nikhef Amsterdam.



Onderwijs en onderzoek in project HiSPARC

HiSPARC is een astrofysisch experiment op het snijvlak van het voortgezet onderwijs en wetenschappelijk onderzoek. Het bestaat uit een netwerk van meer dan honderd meetstations, waarvan het grootste deel gebouwd is door leerlingen in het voortgezet onderwijs en geïnstalleerd is op het dak van hun school. Gezamenlijk verzamelen deze stations gegevens over de wisselwerking van kosmische deeltjes met zeer hoge energie, en over de aardatmosfeer, met het doel om iets over die kosmische deeltjes te leren. De gegevens van alle stations worden voor onderzoek aan scholen en wetenschappelijke instituten beschikbaar gesteld.

Resultaten met behulp van dit experiment worden behaald op ten minste vier terreinen:

1. Het bouwen aan en analyseren van de gegevens van dit experiment is een rijke bron waaruit leerlingen kunnen putten om de smaak van wetenschappelijk onderzoek te pakken te krijgen en mooie profielwerkstukken te maken.
2. Klassikaal kan de bovenbouw kennis maken met hoge-energiefysica door middel van een module in het vak NLT.
3. Met name via het Leraren In Onderzoek (LIO)-programma van FOM worden leraren in staat gesteld om gedurende een jaar, een dag in de week wetenschappelijk onderzoek te doen op een van de FOM-instituten. HiSPARC biedt jaarlijks de gelegenheid aan vijf tot tien leraren om aan dit programma mee te doen.
4. Tenslotte gebruiken universitaire groepen met hun studenten en promovendi gegevens uit HiSPARC voor hun onderzoek.

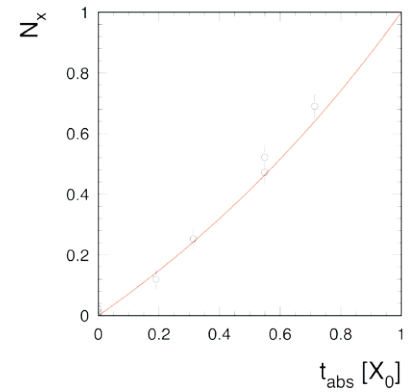
Het experiment beschreven in dit artikel is een variant op het klassieke experiment van Rossi waarmee in 1933 showering werd aangetoond. Dit experiment is uitgevoerd in het kader van het LIO-programma, maar zou evengoed, met kleine wijzigingen, op scholen kunnen worden uitgevoerd of als analyseproject gebruikt kunnen worden. Alle gegevens staan immers ter beschikking...

De piek bij $N_d = 1$ in de pulshoogtespectra (zie figuur 3) van de drie detectoren wordt geïdentificeerd met het signaal veroorzaakt door de passage van een geladen deeltje. De vorm van deze piek wordt bepaald door de fluctuaties in het energieverlies van dit deeltje bij de doortocht door de scin-

tillator.

De pulshoogtespectra zijn weergegeven in figuur 3. De pulshoogte wordt naast de weergave in millivolt, tevens weergegeven in eenheden van N_d . Hierbij is N_d het aantal geladen deeltjes dat de scintillator passeert. De piek bij $N_d = 1$ is het signaal dat veroorzaakt wordt door de passage van een geladen deeltje door de detector. De vorm van deze piek wordt bepaald door fluctuaties in het energieverlies van dit deeltje bij de doortocht door de scintillator en wordt beschreven met een Landauverdeling. Dit is een verdeling waarin een enkele parameter zowel de meest waarschijnlijke waarde als de breedte beschrijft. De resolutie van het experiment wordt in rekening gebracht door de Landauverdeling te convolueren met een normale verdeling, waarvan de standaarddeviatie gelijk is aan de resolutie van

Jos Steijger is senior onderzoeker bij het Nikhef in Amsterdam in de Astro-deeltjesfysicagroep. In deze groep is hij betrokken bij de ontwikkeling van de KM_3NeT -neutrino-telescoop. Sinds 2009 is hij voor een klein deel van zijn tijd betrokken bij het HiSPARC-project, vooral bij de begeleiding van Leraren In Onderzoek, een FOM-project.



Figuur 4 Gemiddeld aantal extra geladen deeltjes (N_x) in de detector achter de absorber ten opzichte van de detector ervoor. De dikte van de absorber (t_{abs}) is gegeven in stralingslengtes (X_0). De rode getrokken lijn is een plot van vergelijking 1.

het experimentele systeem. Het resultaat van deze convolutie wordt gefit aan de data in de buurt van deze piek. De fit levert een schatting op van de horizontale schaal van het spectrum in deeltjes per gebeurtenis, en de energieresolutie van de meting.

De piek waarmee het spectrum begint ($N_d < 0,5$) wordt toegeschreven aan gammafotonen. Dit deel van het spectrum wordt vervangen door de extrapolatie naar nul geladen deeltjes verkregen met de fit. Het gemiddelde van het zo verkregen spectrum zonder gammafotonen tussen 0 en 14 deeltjes wordt gebruikt als een schatting van het aantal deeltjes dat per gebeurtenis door de scintillator ging. In figuur 3 is te zien dat de aanwezigheid van de absorber dat gemiddelde in de onderste detector laat toenemen.

Resultaat

In de ruimte tussen de twee detectoren (zie figuur 1) worden platen van verschillend materiaal en dikte geïnstalleerd. Met de beschikbare platen kan de dikte van deze absorber tussen 0,0 en 0,71 stralingslengtes ($0 \dots 0,71 X_0$) gekozen worden.

Figuur 4 laat de toename van het gemiddelde signaal in de onderste detector zien als functie van de dikte van de absorber. Het aantal extra geladen deeltjes dat gezien wordt in de onderste detector is ongeveer evenredig met de dikte van de absorber.

Een eenvoudig model van Heitler [3] beschrijft de shower als een opvolging van splitsingen. Na elke stralingslengte splitsen de aanwezige

deeltjes in tweeën en neemt ieder de helft van de energie mee. Dit proces gaat door totdat de individuele deeltjes onvoldoende energie hebben om nieuwe te creëren. In een continue versie van dit model wordt het aantal deeltjes na een absorber met dikte t beschreven door

$$N_x(t) = N(0) 2^{t/X_0} - 1$$

als de dikte t en de stralingslengte X_0 in dezelfde eenheden worden uitgedrukt. Deze functie is in figuur 4 weer-

gegeven als de rode curve, die de data goed beschrijft.

In dit artikel wordt beschreven hoe, met de instrumenten die een HiSPARC-station biedt, in combinatie met een absorber, showering kan worden aangetoond. De absorber kan bestaan uit enkele platen ijzer, lood of aluminium, maar evengoed uit een hoeveelheid zand of een ander bouw materiaal met voldoende massa. De afstand tussen de twee detectoren boven en onder de absorber mag niet te groot worden opdat de onderste

detector met voldoende efficiency de deeltjes die door de bovenste gaan kan detecteren.

Wij danken Bob van Eijk en David Fokkema voor de constructieve discussies met hen.

Referenties

- 1 D. Pennink. *Het HiSPARC-detectorsignaal verklaard*. NTVN **77-12**, 2011.
- 2 K. Nakamura et al. *Review of particle physics*. *Journal of Physics*, **C37:075021**, 2010.
- 3 W. Heitler. *The Quantum Theory of Radiation*. Oxford University Press, London, 1954.

Natuurkunde helpt de ontwikkelingslanden

Wat kunt u als fysicus doen om de zonne-energie in Afrika te oogsten, of Bangladesh aan schoon drinkwater te helpen? In uw eentje misschien niet zoveel, maar samen met collega-fysici uit de hele wereld komen we een heel eind. Tijdens de eerste internationale conferentie Physics for Development [1], 11 en 12 oktober in Brussel, spatte het enthousiasme er vanaf. Heeft u deze boot gemist? Geen nood, u kunt aansluiten en in 2014 de tweede conferentie bijwonen. Ineke Malsch

455

Afrikaanse, Aziatische, Latijns-Amerikaanse en natuurlijk Europese fysici discussieerden over de kansen die ons vak biedt voor ontwikkelingslanden: een betrouwbare energievoorziening met zonnepanelen die in Afrika ontwikkeld en gemaakt worden, goedkope en snelle detectie van malaria, betaalbare state-of-the-art-laserexperimenten, open source-software en zelfgebouwde atoomkrachtmicroscopen. Een student kernfysica uit Kenia was er zeker van dat de natuurkunde in zijn land de toekomst heeft. “Kom maar kijken aan onze universiteiten, dan zul je het potentieel en enthousiasme van de jonge generatie fysici zien!”

Zeker, de uitdagingen waarmee natuurkundigen evenals andere onderzoekers in ontwikkelingslanden kampen zijn formidabel: regelmatige stroomstoringen, falende internetverbindingen, verouderde en vooral theoretische onderwijsmethoden, noem maar op. Vertrekken naar het buitenland is voor Afrikaanse studenten vaak de enige kans op een wetenschappelijke carrière. Maar er zijn ook kansen dicht bij huis. De Afrikaanse Fysische Vereniging die in 2010 officieel gestart is als ngo (non-governmental organization) maakt samenwerking tussen natuurkundigen in het continent makkelijker. De Square Kilometre Array in aanbouw in Zuid-Afrika brengt

Afrika's sterrenkunde op topniveau. En waar in het ene land complete natuurkundelabs leegstaan bij gebrek aan studenten, heeft het andere land een tekort aan faciliteiten voor duizend natuurkundestudenten. Tegen relatief lage reiskosten kunnen deze studenten hun practicum in het buitenland doen. Veel onderzoekers in ontwikkelingslanden moeten veel tijd aan onderwijs besteden, waardoor ze niet aan onderzoek toekomen. Dat is vaker de reden voor bezoeken aan westerse collega's dan een gebrek aan apparatuur en onderzoeksinfrastructuur. “Ik wil geld voor een sabbatical in mijn eigen lab” verzuchtte een deelnemer. Veel bestaande subsidies stimuleren