

# Het HiSPARC-detector-signaal verklaard

De aarde wordt vanuit de ruimte bestookt met een hagel van deeltjes. De energie van deze deeltjes varieert over twintig ordes van grootte. Vooral de energierijkere deeltjes zijn interessant omdat het onduidelijk is waar ze vandaan komen en hoe ze precies aan hun energie komen. In het HiSPARC-project wordt gezocht naar antwoorden op deze vragen. De middelen die worden gebruikt zijn eenvoudig: een HiSPARC-station bestaat uit twee of vier scintillatorplaten, lichtgeleiders en fotomultipliers. De detectoren produceren spanningpulsjes met een nauwkeurige tijdsregistratie. Wat kan er uit deze pulsjes worden afgeleid? *Dorrih Pennink*

432

## Kosmische showers

Om versnelmechanismen van kosmische straling te begrijpen is het relevant om de energie van de deeltjes en de locatie van de bron te bepalen. Maar dat is geen eenvoudige klus. Omdat de kosmische flux bij benadering afneemt met de derde macht van de energie zijn energierijke deeltjes schaars: minder dan één per vierkante meter per jaar bij  $10^{16}$  eV. Direct vastleggen kan niet.

Dorrih Pennink studeerde bewegingswetenschappen in Amsterdam. Hierna volgde zij de tweede- en eerste-graads lerarenopleiding natuurkunde in Amsterdam en Utrecht. Van 1991 tot 1998 was zij als docent natuurkunde/biomechanica/onderzoeksmethodologie werkzaam aan de Hogeschool Rotterdam & Omstreken bij de opleiding fysiotherapie. Sinds 2000 werkt zij als docent natuurkunde/NLT op het Bonhoeffercollege in Castricum. Van 2009 tot 2011 was zij via het FOM-programma Leraar in Onderzoek (LIO) verbonden aan het Nikhef Amsterdam.

pennink@casema.nl



Meten gebeurt door gebruik te maken van de deeltjeslawine die ontstaat na botsing van het primaire deeltje met een luchtmolecuul hoog (20-40 km) in de atmosfeer. Bij deze botsingen ontstaan nieuwe deeltjes die – met minder energie – in dezelfde richting bewegen als het primaire. Deze kettingreactie gaat door zolang de secundaire deeltjes voldoende energie hebben om het proces op gang te houden. Na dit punt verliezen zij gaandeweg hun energie tot het punt waarop zij tot stilstand komen, vervallen of geabsorbeerd worden. De curve in het blauwe vlak van figuur 1 geeft het aantal deeltjes als functie van de hoogte.

Primaire deeltjes met voldoende energie veroorzaken lawines die het aardoppervlak bereiken. Met behulp van simulatieprogramma's (CORSIKA [1], AIREL [2]) kan de samenstelling van de mix van deeltjes die de grond bereiken worden berekend. Circa 79% van de deeltjes bestaat uit fotonen ( $\gamma$ ), 20% uit elektronen of positronen (e) en iets minder dan 1% uit muonen ( $\mu$ ). Zeer kleine aantallen hadronen en kernen maken het totaal rond [3].

Dit is het startpunt voor het HiSPARC-project.

## Een HiSPARC-station

Een HiSPARC-station heeft twee of vier detectorplaten. Een detectorplaat bestaat uit een scintillatieplaat, een trapeziumvormige lichtgeleider en een fotomultiplier. Een GPS-ontvanger voorziet in een nauwkeurige tijdsregistratie.

De plastic scintillator is snel en gedraagt zich lineair, dat wil zeggen dat de lichtopbrengst evenredig is met de afgezette energie. Wanneer binnen een klein tijdsinterval (in HiSPARC  $1,5 \mu\text{s}$ ) een spanningspuls wordt geregistreerd in twee of meer platen wordt deze gebeurtenis opgeslagen. Met behulp van de GPS wordt een tijdstempel vastgelegd en van alle platen wordt gedurende 4 tot  $6 \mu\text{s}$  de spanningspuls gedigitaliseerd met een samplefrequentie van 400 MHz.

## Spectrum

Figuur 3 is de weergave van het pulshoogtespectrum van de platen van station 304 voor de maand juli 2011. De vorm ervan is heel karakteristiek. Wat ligt hieraan ten grondslag?

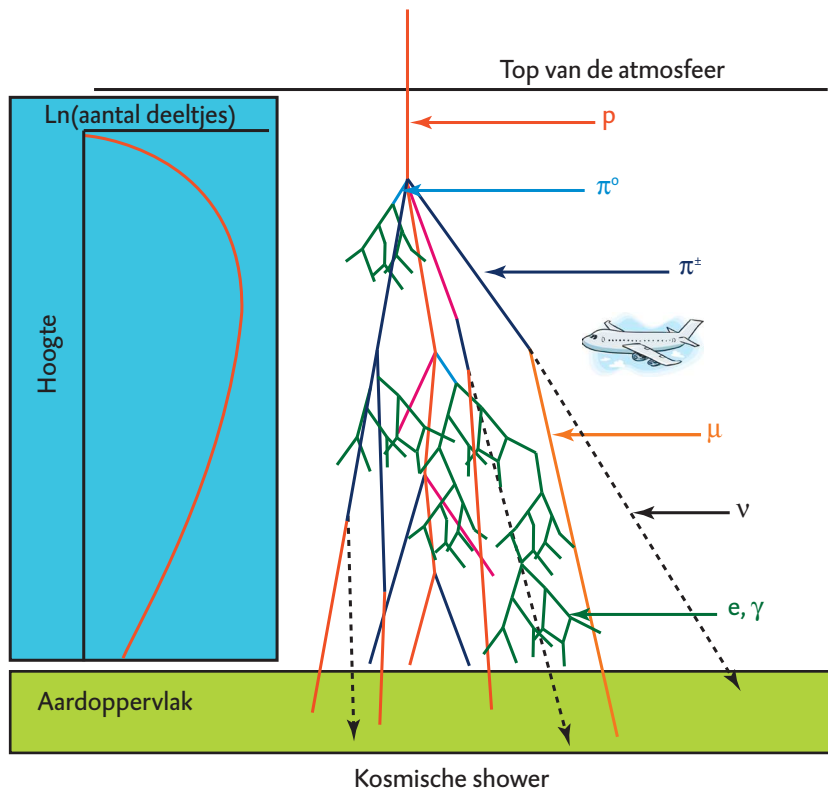
Gebeurtenissen worden opgeslagen als tenminste twee scintillatoren op een afstand van minimaal een paar meter binnen een korte periode een signaal geven. Een enkele toevallige dubbeltreffer daargelaten, ontstaat zo'n coïncidentie als een shower, teweeggebracht door een primair kosmisch deeltje met een energie van meer dan  $10^{14}$  eV, die in de nabijheid van deze detector is ingeslagen. Het zijn dan vooral fotonen, elektronen/positronen en in mindere mate muonen die de spanningspulsen veroorzaken die bijdragen aan het spectrum. Om de vorm van het spectrum te verklaren moet gekeken worden naar de energieafgifte van deze deeltjes in de platen.

### Energieverlies geladen deeltjes

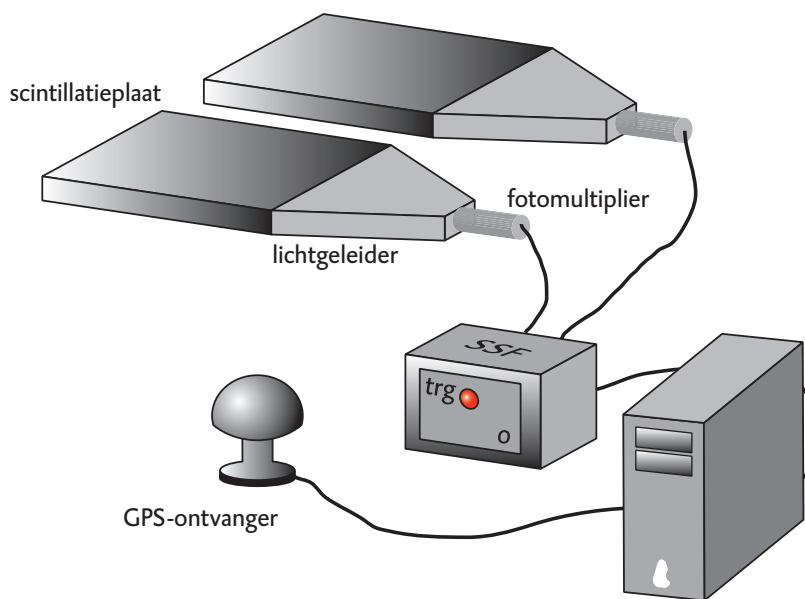
Er is een duidelijk verschil tussen de manier waarop geladen deeltjes en gamma's energie afzetten. Geladen deeltjes verliezen hun energie door vele, inelastische botsingen met atomaire elektronen. Bij niet te zware deeltjes met een energie tussen 100 MeV en 100 GeV is het gemiddelde energieverlies bij benadering recht evenredig met het product van dichtheid en weglengte. Deze deeltjes worden Minimum Ionizing Particles (MIPs) genoemd. De evenredigheidsconstante, *stopping power* genoemd, blijkt voor alle materialen ongeveer dezelfde waarde te hebben. De stopping power van muonen en elektronen is nagenoeg gelijk, respectievelijk  $1,75$  [4] en  $1,78 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  [5]. Voor de 2 cm dikke scintillator (dichtheid =  $1,032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) betekent dit dat er bij loodrechte inval gemiddeld ongeveer 3,6 MeV wordt afgezet. Door variatie in energieoverdracht bij botsingen zal de energieafgifte voor een specifiek deeltje doorgaans afwijken van de gemiddelde waarde. De fluctuatie volgt de Landauverdeling. Dit is een asymmetrische verdeling die snel oploopt naar de meest waarschijnlijke energieafgifte (circa 3,4 MeV) met een lange uitloop naar hogere waarden. Door de asymmetrie is de gemiddelde energieafgifte iets groter dan de meest waarschijnlijke. Deze laatste wordt de MIP-waarde genoemd. In een typische HiSPARC-detector levert dit energieverlies een pulshoogte van ongeveer 200 mV op.

### Energieverlies gamma's

Gamma's vallen op door hun door-



**Figuur 1** Links: de natuurlijke logaritme van het aantal deeltjes in de shower uitgezet tegen de hoogte. Rechts: schematische weergave van de shower. Het vliegtuig vliegt op circa 10 km hoogte.



**Figuur 2** De onderdelen van een HiSPARC-station.

dringend vermogen. Waar geladen deeltjes tijdens het passeren van de plaat geleidelijk energie afstaan in talloze interacties, schiet ongeveer 95% van de gamma's door de platen heen zonder interactie. Dit hangt samen met de kleine werkzame doorsnede van de processen die de wisselwerking domineren: Compton-verstrooiing en paarvorming. Energieafgifte door het fotoelektrisch effect treedt slechts op voor laag-energetische fotonen ( $E < 50 \text{ keV}$ ). Deze waarde correspon-

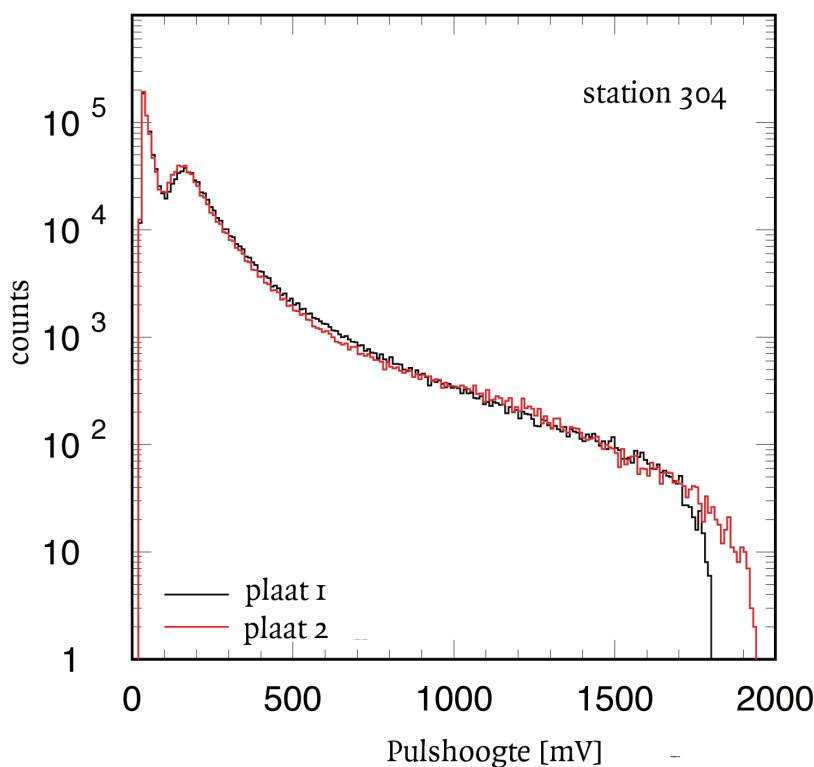
deert met een pulshoogte van maximaal 3 mV, te klein om te meten. De kans op wisselwerking is gering, de impact kan enorm zijn. In het geval van een Compton-interactie, die domineert in het energiegebied  $0,05 \leq E_\gamma \leq 10 \text{ MeV}$  kan het grootste deel van de energie van het foton overgedragen worden aan een atomaire elektron. Bij paarvorming, dat domineert bij nog hogere fotonenergieën, verdwijnt het foton geheel. Er ontstaan een elektron-positronpaar dat de ge-

## HiSPARC

Sinds 2003 heeft HiSPARC (High-School Project on Astrophysics Research with Cosmics) zich ontwikkeld tot een netwerk met zo'n 100 meetstations. De stations zijn gegroepeerd in zeven clusters rond wetenschappelijke instellingen. Iedere detector is door scholieren gebouwd, getest en vervolgens op het dak van de middelbare school geplaatst. Een aantal detectoren is uitgerust met een weerstation. Meetgegevens worden via internet naar een centrale data-opslag bij Nikhef verzonden en zijn vervolgens via webservices (publiek) beschikbaar voor analyse (zie [www.hisparc.nl](http://www.hisparc.nl)).

Ieder jaar presenteren leerlingen de resultaten van hun onderzoek tijdens het nationale HiSPARC-symposium.

Naast de financiële bijdrage van scholen en lokale fondsen, wordt het project breed ondersteund door FOM. Bovendien biedt FOM een aantal docenten de unieke mogelijkheid om een jaar lang, één dag per week, aan HiSPARC gerelateerd onderzoek deel te nemen. Nikhef is coördinator van het project en het verzorgt het grootste deel van de infrastructuur.



**Figuur 3** Pulshoogtespectrum van station 304 op het dak van het Bonhoeffercollege met horizontaal de pulshoogte (mV) en verticaal logcounts. De triggervoorwaarde is op beide platen een puls groter dan 30 mV.

hele energie van het foton meeneemt. In deze gevallen ziet de detector één (Compton) of twee (paarvorming) MIP's. Omdat ze in de scintillator ontstaan, passeren ze slechts een deel van de plaat. De energieafgifte per elektron/positron is dan (uitgaande van loodrechte inval):  $(1 - x/d) \cdot E_{\text{MIP}}$  met  $d$  de dikte van de plaat en  $x$  de afstand die het foton aflegt in de plaat voor de interactie. De kans op paarvorming is in de buurt van een atoomkern het

grootst en leidt daar tot een signaal van maximaal twee MIP's. In de buurt van een elektron is ook paarvorming mogelijk. Daar levert het maximaal drie MIP's op omdat het initieel aanwezige elektron voldoende energie opneemt om zich als derde MIP door de scintillator te bewegen.

Voor toenemende gamma-energieën tussen de 1 en 10 MeV neemt de kans op interactie af van 10% naar 4%. Voor gamma's met grotere energie is deze

kans min of meer constant. Fotonen hebben daarom doorgaans slechts één interactie in de plaat.

### Samenvattend

Fotonen zijn weliswaar de meest voorkomende deeltjes in de shower, maar hebben een kleine kans op interactie, waardoor ze slechts een gering deel van de detectorrespons veroorzaken. Deze respons is geconcentreerd bij lage pulshoogtes en kan (in zeldzame gevallen) toenemen tot een signaal equivalent aan 3 MIPs. Omdat de interactie op een willekeurige diepte in de scintillator plaats vindt, is dit signaal niet gepiekt. Geladen deeltjes in de shower zijn voor het overgrote deel van het type MIP. Deze geven een signaal dat piekt bij een waarde die hoort bij het meest waarschijnlijke energieverlies volgens de Landau-verdeling.

### Interpretatie pulshoogtehistogram

Het gemeten pulshoogtehistogram kan worden beschreven met een steil dalende flank bij de kleine pulshoogtes en een bult bij ongeveer 200 mV (zie figuur 3). Het grootste deel van de gebeurtenissen die het spectrum bepalen, wordt veroorzaakt door geladen deeltjes. De energie-overdracht van deze deeltjes aan de scintillator piekt bij ongeveer 3,4 MeV en resulteert in een puls van circa 200 mV. De fluctuaties rond de piekwaarde maken de halfwaarde-breedte van de zuivere Landaupiek ongeveer 0,7 MeV (circa 40 mV). De piek wordt echter versmeerd door de beperkte resolutie van het experiment, die onder meer is toe te schrijven aan de plaatsgevoeligheid van de scintillator, de resolutie van de fotobuis en de Poissonstatistiek van het aantal fotonen dat de buis bereikt. De waargenomen piek is de convolutie van de Landau-verdeling en een normaalverdeling waarvan de standaardafwijking ongeveer 80 mV is, zie figuur 4.

Het bepalen van de verhouding tussen gamma's en geladen deeltjes op basis van het spectrum blijkt lastig. De voorspelde waarde (0,2-0,5), die wordt verkregen rekening houdend met showersamenstelling en detectiekans, is kleiner dan de experimenteel gevonden waarde (0,72). Deze laatste waarde is bepaald door het quotiënt te nemen van het aantal gebeurtenissen in de exponentiële fit en in de rest van

het spectrum.

De vermoedelijke overschatting van het (relatieve) aantal gamma's kent twee oorzaken. Het signaal ten gevolge van gamma's daalt exponentieel met toenemende pulshoogte. Helaas wordt ook dit signaal door de experimentele resolutie veranderd. Door de steile daling wordt gemiddeld meer van kleine naar grote waarden getransformeerd, zodat het aantal waargenomen gamma's bij een gegeven pulshoogte wordt overschat. De correctie hiervoor is niet erg nauwkeurig.

Verder is geen rekening gehouden met signalen die door meerdere deeltjes zijn veroorzaakt. Door de lagere detectiekans voor gamma's zullen vooral geladen deeltjes niet worden meegeteld.

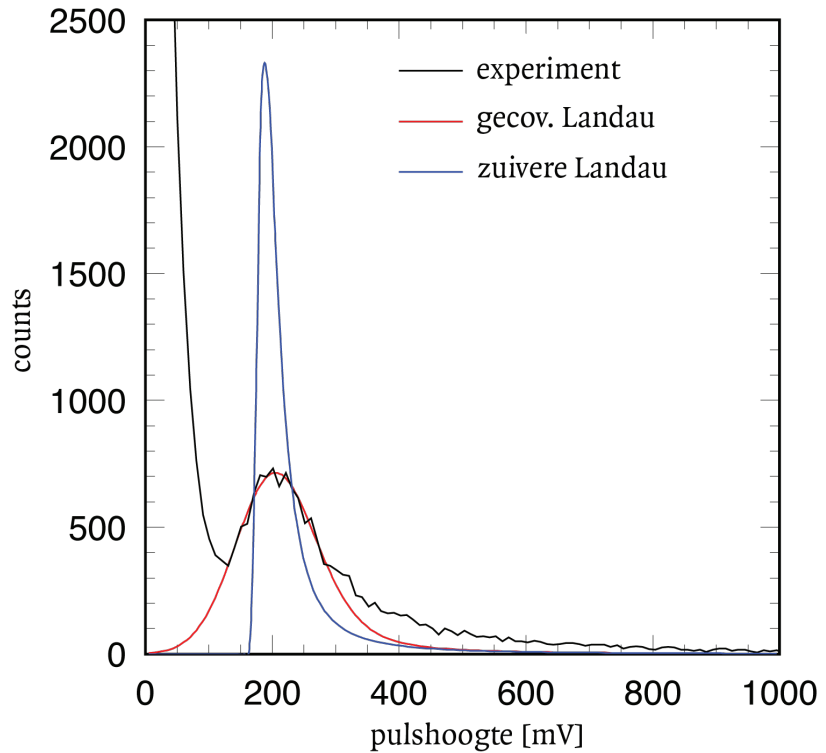
### Tijdrelaties

Deze interpretatie van het pulshoogtespectrum kan getest worden door naar de tweede gemeten grootheid te kijken: de aankomsttijden. We richten ons op twee detectorplaten in één station. Vergeleken worden pulshoogtes en aankomsttijden in deze twee platen die gemeten zijn in één gebeurtenis en dus vallen binnen een tijdsinterval van  $1,5 \mu\text{s}$ . Als de signalen in de twee scintillatoren door dezelfde lawine worden veroorzaakt zullen de aankomsttijden nagenoeg gelijk zijn. Als daarentegen de oorzaak niet dezelfde is, bijvoorbeeld een deeltje in de eerste plaat en ruis in de tweede, zullen de twee tijden waarschijnlijk niet correleren.

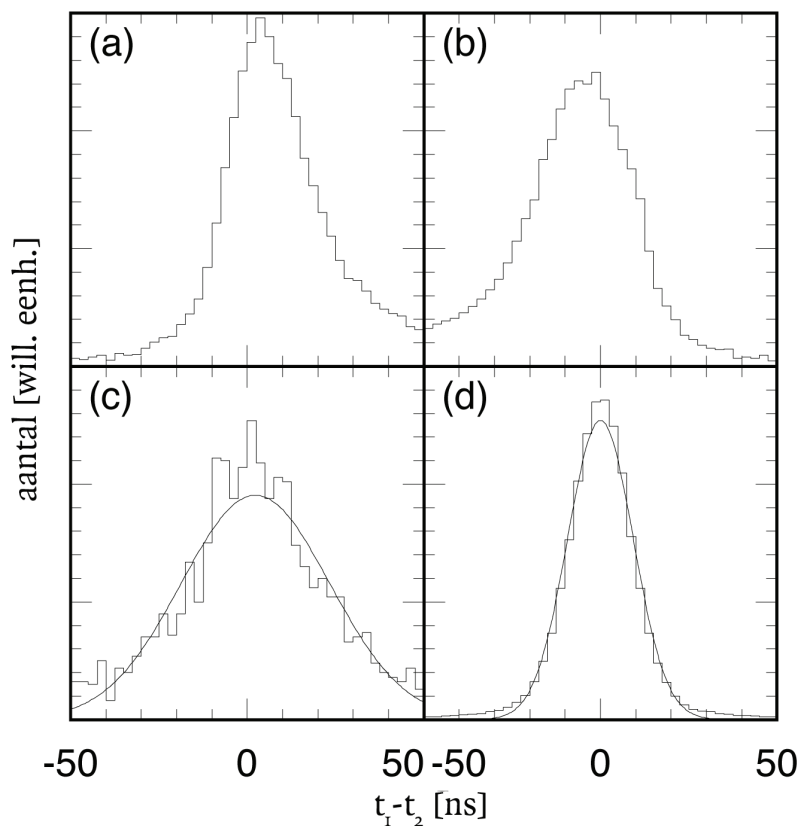
Figuur 5 toont de waargenomen tijdspectra in vier verschillende gevallen, in beide platen een hoge (a) en een lage puls (b); een lage puls in één plaat en een hoge in de ander (c en d). In alle vier de gevallen is sprake van een duidelijke tijdcorrelatie. De gemeten tijdsintervallen per gebeurtenis zijn zo klein dat geconcludeerd mag worden dat de gemeten pulsen veroorzaakt zijn door één shower. Het verschil in breedte van de tijdspectra in de panelen met gelijke pulshoogtes, en de asymmetrische verdelingen in de andere twee, worden verklaard door de verschillende amplitudes te associëren met verschillende deeltjes.

### Conclusie

In de HiSPARC-stations worden signalen vastgelegd per plaat in de vorm van een pulshoogtetijdgrafiek (een trace). Spectra van pulshoogtemaxima



**Figuur 4** Pulshoogtehistogram met experimentele verbreding (rood) en ideaal spectrum (blauw). Horizontaal pulshoogte (mV) en verticaal aantal tellingen.



**Figuur 5** Tijdeigenschappen van de scintillatorplaten van station 501, gemeten in april 2010. Horizontaal: tijdsverschillen ( $t_1 - t_2$ ) in ns tussen plaat 1 en plaat 2 van pulsen die bij dezelfde gebeurtenis horen. Verticaal: aantal pulsen per bin (bingrootte = 2,5 ns). a) Beide platen hoog signaal (ADC > 200),  $\sigma = 9,3$  ns; b) Beide platen laag signaal (ADC < 120),  $\sigma = 21$  ns; c) Plaat 1 laag signaal, plaat 2 hoog; d) Plaat 1 hoog signaal, plaat 2 laag.

van traces van afzonderlijke platen vertonen grote overeenkomsten. Deze vorm kan worden uitgelegd door de wisselwerking van showerdeeltjes met de scintillator te analyseren.

Het pulshoogte-histogram bestaat uit bijdragen van gamma's en geladen deeltjes. Alleen individuele gamma's, die niet vergezeld gaan van geladen deeltjes, zijn te identificeren in het spectrum. Daar waar geladen deeltjes meedoen, vanaf ongeveer één MIP, is specificatie van afzonderlijke bijdragen van verschillende deeltjes niet langer mogelijk door het gecombineerde effect van de resolutie van de energiebepaling en de mogelijke aanwezigheid van gamma's.

Lage pulsen (0,2 - 0,8 MIP) zijn geen ruis. Analyse van tijdeigenschappen

van spectra laat zien dat lage pulsen in tijd correleren met hoge pulsen van dezelfde gebeurtenis en dus gerelateerd zijn aan de shower. Deze pulsen zijn niet toe te schrijven aan geladen deeltjes waarvan de puls altijd een waarde heeft rond de MIP-piek of groter. Hieruit kan geconcludeerd worden dat lage pulsen uitsluitend worden veroorzaakt door gamma's en de hogere voornamelijk door geladen deeltjes.

Geladen deeltjes en gamma's zijn niet alleen te onderscheiden in energieafgifte, maar ook in tijdeigenschappen. Gamma's komen gemiddeld later dan geladen deeltjes.

#### Woord van dank

Met dank aan Jos Steijger en Bob van

Eijk voor hun kritische blik en constructieve commentaar.

#### Referenties en noten

- 1 D. Heck et al., *Forschungszentrum Karlsruhe report FZKA6019*, 1998.
- 2 S.J. Sciutto, arXivastro-ph/9911331.
- 3 J.D. Haverhoek, *Ultra High Energy Cosmic Ray Extensive Air Shower simulations using CORSIKA*. Proefschrift, University of Leiden, 2006.
- 4 I.S. Jones et al., *Ionization energy loss of muons in a plastic scintillator J.Phys. A: Gen. Phys.* **1**, 1968.
- 5 M.J. Berger et al., *Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions*, NIST Standard Reference Database 124, Last update 2005. Te vinden op: [www.nist.gov/physlab/data/star/index.cfm](http://www.nist.gov/physlab/data/star/index.cfm).

## Onderwijs

# Energie voor de toekomst

436

**De Fusion Road Show is ruim tien jaar geleden bedacht door Niek Lopes Cardozo [1]. Vorig jaar is de show over kernfusie samen met een regisseur onder de loep genomen, waardoor deze dynamischer is geworden. Het resultaat is interactiever en nog even instructief.** Marieke de Boer

Rond tien uur 's ochtends stroomt de multifunctionele ruimte in het Leidsche Rijn College in Utrecht langzaam vol. De Fusion Road Show is hier onderdeel van een dag vol wetenschap. Terwijl de bovenbouwleerlingen gaan zitten, worden er op de muur voor hen allerlei feiten over energieverbruik geprojecteerd. Wetenschapsvoorlichter Arian Visser van onderzoeksinstituut FOM Rijnhuizen begint de show: "Dit is een verhaal over de toekomst van de energie. Het is een leuk verhaal, maar het kan leuker." Visser geeft eerst wat algemene informatie over het huidige energieverbruik op aarde, waarbij hij benadrukt dat we vooral fossiele brandstoffen gebruiken die op kunnen raken en niet goed zijn voor het milieu. Om te illustreren hoeveel

energie aardolie oplevert, laat hij een leerlinge op een hometrainer fietsen en vraagt haar hoe lang ze dat moet volhouden om net zo veel energie te produceren als een vat aardolie (het antwoord is 22 jaar als ze het als deeltijd baan zou doen).

Met het publiek gaat Visser vervolgens op zoek naar een duurzame en schone manier van energie produceren. Kernsplijting is effectief, maar levert radioactief afval op en de voorspelling is dat uranium binnen 70 jaar op zal zijn. Met de zon als voorbeeld laat hij zien wat er voor nodig is om op aarde energie op te wekken door middel van kernfusie. De benodigde brandstof waterstof kan gewonnen worden uit de oceanen. Extreem hoge temperaturen kunnen verkregen worden door microgolven, wat Visser

illustreert met een vlam in een magnetron. Vervolgens laat hij zien dat je het extreem hete plasma door middel van een magneet midden in de reactor kunt houden. Om de deeltjes niet aan de uiteinden van de buis te verliezen, bedenkt hij de ideale vorm van de reactor: een donut, ook wel torus genoemd. Ook hierbij hoort een mooie proef; een kubus met een gat wordt gevuld met rook, die vervolgens door het gat wordt geperst. Hoe het gat er ook uitziet, de rook heeft altijd de vorm van een donut. Zo worden alle benodigheden voor een kernfusiereactor op een ludieke manier in beeld gebracht.

De show eindigt met een blik op de toekomst. Momenteel kan kernfusiereactor Jet in Engeland net zo veel energie opleveren als hij verbruikt.