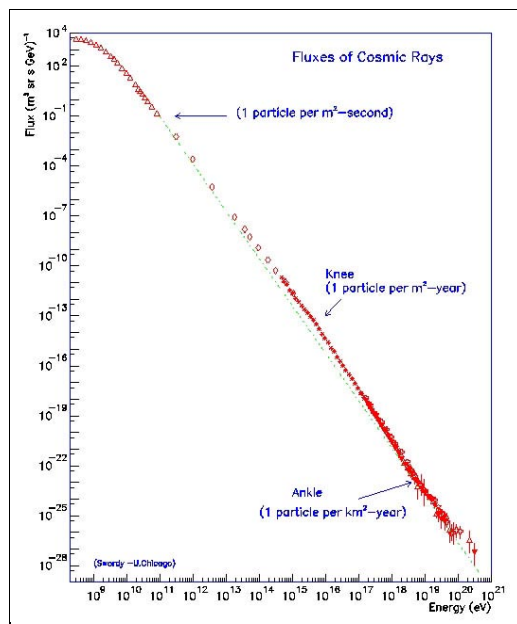


Interactie van kosmische straling en aardatmosfeer

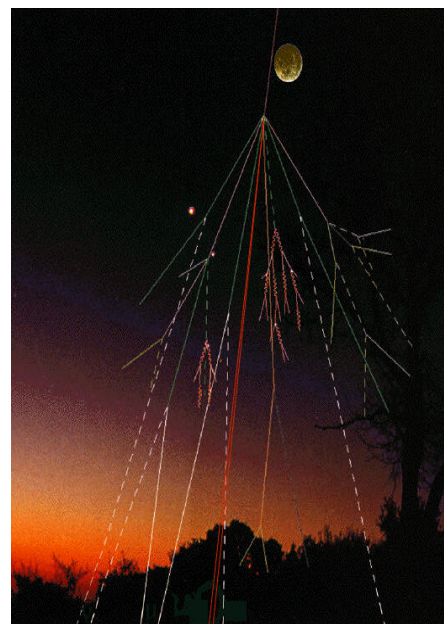
2.3 Airshowers

In ons Melkwegstelsel is sprake van een voortdurende stroom van hoogenergetische geladen deeltjes. Die stroom heeft een grootte van zo'n honderdduizend deeltjes per vierkante meter per seconde. Deze deeltjesstroom bestaat ruwweg voor 85% uit protonen, voor 12% uit alfadeeltjes (heliumkernen) en voor 2% uit elektronen. Ook kernen van koolstof en zuurstof en zelfs nog zwaardere elementen komen erin voor. Ze worden uitgestoten door onze eigen Zon en ook de ruimte in geslingerd bij supernova-explosies of soortgelijke heftige processen in het heelal.

Energiespectrum – De aantallen geladen deeltjes van verschillende energie die vanuit de kosmos op ons afkomen zijn weergegeven in het energiespectrum van figuur 1. Het is duidelijk dat dit aantal deeltjes bij toenemende energie zeer snel afneemt. Dit geldt in het bijzonder voor de deeltjes met de hoogste energie van meer dan 10^{15} eV. De (kleine) knik in de dalende lijn bij een energiewaarde van 10^{15} eV in het energiespectrum betekent dat de aantallen deeltjes in het energiebereik daarboven nog sneller afnemen dan in het energiebereik daaronder.



Figuur 1 – Het energiespectrum van kosmische geladen deeltjes: de deeltjesstroom (verticaal) als functie van de deeltjesenergie (horizontaal).



Figuur 2 – Simulatie van een airshower van secundaire deeltjes na de inslag van een kosmisch geladen deeltje in de aardatmosfeer.

Een reden waarom de aantallen deeltjes in dit hoogste energiebereik sneller afnemen kan zijn dat alleen deze deeltjes in staat zijn uit ons Melkwegstelsel te ontsnappen. Deeltjes met minder energie worden gevangen gehouden door het magnetisch veld van ons Melkwegstelsel, ook al is dit zeer zwak. Door het rondcirkelen van deze deeltjes in het galactisch magneetveld is het niet mogelijk vast te stellen waar deze deeltjes vandaan komen en waar ze worden gemaakt. De deeltjes met de hoogste energie van meer dan 10^{15} eV kunnen wel naar de intergalactische ruimte ontsnappen. Omgekeerd komen sommige hoog-energetische deeltjes vanuit andere sterrenstelsels door de intergalactische ruimte bij de Aarde terecht. Omdat de baan van deze deeltjes niet sterk wordt afgebogen, kunnen we misschien wel iets ontdekken over hun oorsprong. De stroom van deze deeltjes boven in de aardatmosfeer is echter minder dan 1 deeltje per m² per jaar. In principe worden er geen deeltjes verwacht met een energie groter dan 10^{19} eV. De reden hiervoor is dat protonen met een energie groter dan 10^{19} eV snel energie verliezen door wisselwerking met de kosmische microgolfstraling tijdens hun reis door de intergalactische ruimte. Dit energie-

verlies stopt als de proton-energie tot 10^{19} eV is afgenomen.

Airshowers – Tijdens hun vlucht door de aardatmosfeer is de kans groot dat een hoog-energetisch deeltje botst met een stikstof- of zuurstofkern, de belangrijkste componenten van de atmosfeer. Dat gebeurt als de wisselwerking tussen deze kernen en het binnenkomende deeltje sterk genoeg is. Dat is het geval voor kosmische gammafotonen met hoge energie, evenals voor geladen deeltjes zoals protonen en zwaardere atoomkernen (van alfadeeltjes tot ijzerkernen). Hoogenergetische neutrino's laten daarentegen geen sporen in de atmosfeer achter. Bij die botsingen ontstaan vele andere deeltjes, die weliswaar een lagere maar toch nog wel aanzienlijke energie hebben. Deze kunnen op hun beurt ook weer botsen en nieuwe deeltjes produceren. Of ze kunnen vervallen tot andere deeltjes. Zo ontstaat een hele regenbui van secundaire deeltjes zoals weergegeven in figuur 2: een *airshower*.

Na de inslag van een primair deeltje leggen de geproduceerde secundaire deeltjes gemiddeld een afstand van tien tot veertig kilometer af voor ze het aardoppervlak bereiken. Dat kan alleen als het primaire deeltje voldoende energie heeft: minimaal zo'n 5 GeV.

Een realistische simulatie van een airshower is te vinden op:

> <http://www.th.physik.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>

- 1 In de simulaties van airshowers bewegen geladen deeltjes tussen twee botsingen of tot hun verval langs rechte lijnen. Deze deeltjes bewegen echter in het magnetisch veld van de Aarde, zodat de Lorentzkracht voor een afbuiging kan zorgen. De vraag is of bij hoog-energetische deeltjes met dit effect rekening moet worden gehouden.
 - Laat met een afleiding zien dat voor een geladen deeltje (lading q en massa m) met een snelheid v in een homogeen magneetveld B de volgende uitdrukking geldt:
$$B \cdot q \cdot r = m \cdot v = p$$
In deze formule is r de kromtestraal van de baan en p de impuls van het deeltje.
 - De impuls is een relativistisch correcte grootheid, dus we hoeven ons geen zorgen te maken over het feit dat de massa van een deeltje afhangt van zijn snelheid (zie 2.2 [Muon-verval](#)). Laat zien dat een muon met een energie E van 1 GeV een impuls p van 1 GeV/c heeft.
 - Bereken de kromtestraal r van de baan van een muon met een impuls p van 1 GeV/c in het aardmagnetisch veld. Neem voor de magnetische inductie B van dit veld 50 μT .
 - Wat is je conclusie: moet bij de beweging van geladen deeltjes in een airshower rekening worden gehouden met afbuiging in het aardmagnetisch veld? Leg uit waarom wel of niet.

Hieronder volgt eerst een overzicht van een aantal eigenschappen van airshowers: hoe ontstaan ze, wat is hun samenstelling en hoe breiden ze zich uit? Daarbij gaat het vooral om de airshowers veroorzaakt door de meest energetische deeltjes. Deze zijn vanuit astrofysisch oogpunt het meest interessant en geven bovendien op Aarde de grootste meetbare effecten. Daarna draaien we de bovenstaande vragen als het ware om: hoe zijn uit een aan het aardoppervlak gedetecteerde airshower de eigenschappen van de bron – het soort primaire deeltje, zijn energie en zijn richting – te bepalen?

Samenhangend met het soort deeltje dat de aardatmosfeer binnendringt zijn er twee soorten airshowers te onderscheiden: *elektromagnetische showers* en *hadronische showers*.

Elektromagnetische showers – De bron van een airshower kan een gammafoton of een geladen deeltje zijn. Geladen deeltjes hebben een sterkere interactie met de atoomkernen in de atmosfeer dan fotonen met dezelfde energie. Daarom vindt de eerste botsing van kosmische gammastraling gemiddeld dieper in de atmosfeer plaats (dus: dichterbij het aardoppervlak) dan die van kosmische protonen. Zwaardere kernen gaan gemiddeld nog wat eerder (hoger in de atmosfeer) hun eerste botsing aan.

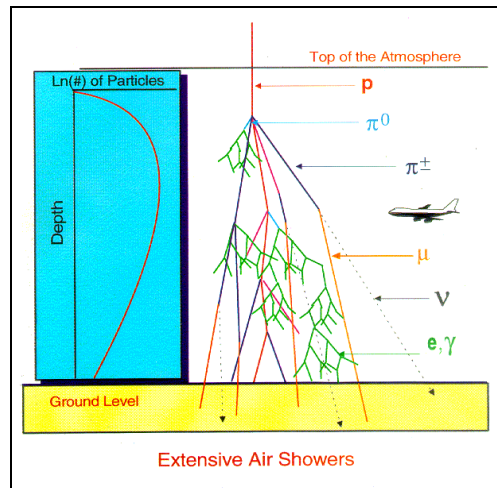
Ook de samenstelling van de airshowers die door fotonen worden gemaakt verschilt van die van geladen deeltjes. Fotonen hebben alleen een *elektromagnetische wisselwerking* met de materie. Daarbij kunnen uit fotonen alleen paren van deeltjes en antideeltjes worden gevormd, voornamelijk elektronen en positronen. Deze deeltjes produceren zelf ook weer fotonen, bijvoorbeeld als ze door het elektrisch veld van een kern bewegen of als een positron annihileert met een atmosferisch elektron. We noemen zulke airshowers daarom *elektromagnetische showers*. In zo'n shower komen ook muonen voor, maar veel minder dan elektronen. De massa van een muon is namelijk ruwweg 200 keer zo groot als die van een elektron. Voor het maken van een μ^+ , μ^- paar is dus een foton nodig met een aanzienlijk

hogere energie dan de benodigde fotonenergie voor de creatie van een e^+, e^- paar.

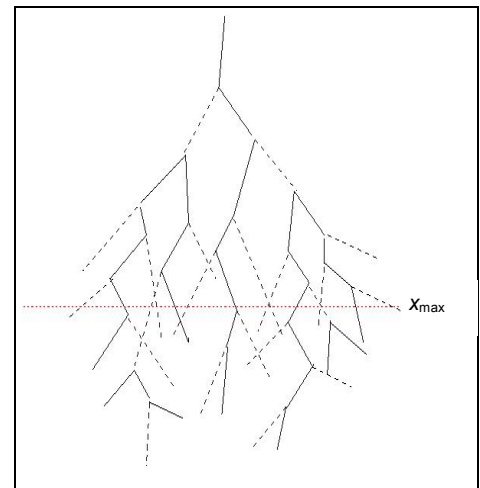
Hadronische showers – Als een hoogenergetisch proton de atmosfeer binnendringt, heeft het door zijn elektrische lading ook een elektromagnetische wisselwerking met de atmosferische moleculen. Maar veel belangrijker is in dit geval de zogenaamde *sterke wisselwerking*: de kracht die de quarks in de kerndeeltjes (en daarmee de kerndeeltjes zelf) op elkaar uitoefenen. Bij de botsingsenergieën waarvan hier sprake is, gaat het op submicroscopische schaal eigenlijk om botsingen tussen de individuele componenten van het proton (quarks en gluonen) en die van de kerndeeltjes (protonen en neutronen) in de stikstof- of zuurstofkern. Bij de interactie van deze kerndeeltjes worden nieuwe, sterk wisselwerkende deeltjes gemaakt. Daarbij gaat het vooral om grote aantallen *mesonen*: gebonden quark-antiquark paren. De lichtste en meest overvloedig voorkomende mesonen zijn de *pionen*, die voorkomen in drie soorten: π^+ en π^- met lading $+e$ respectievelijk $-e$ (de elementaire lading) en het neutrale π^0 . Deze mesonen zijn niet stabiel, en vervallen na korte tijd tot andere deeltjes. Zo vervalst een geladen pion gemiddeld na $2,6 \cdot 10^{-8}$ s in een muon (met dezelfde lading) en een bijbehorend (anti)neutrino. Het ongeladen pion vervalst daarentegen al na $0,8 \cdot 10^{-16}$ s in twee fotonen. Wegens de grote aantallen hadronen (sterk wisselwerkende kerndeeltjes en mesonen) die vooral in het begin van de airshower voorkomen, spreken we in dit geval over *hadronische showers*.

In een hadronische shower legt een neutraal π^0 meson met een energie van 10 GeV een afstand van ongeveer $2 \mu\text{m}$ af voor het vervalst tot een tweetal fotonen. Een geladen π^+ of π^- meson leeft $3 \cdot 10^8$ keer zo lang en kan dus met dezelfde energie gemiddeld een afstand van 600 m afleggen voordat het vervalst tot een muon. De meeste pionen bereiken daarom nooit het aardoppervlak. Door het verval van pionen worden in hadronische showers grote hoeveelheden muonen geproduceerd – veel meer dan in elektromagnetische showers. Muonen hebben een langere levensduur van gemiddeld $2,2 \cdot 10^{-6}$ s. Bij een energie van 10 GeV of meer kan een muon daarom een afstand van 5 tot 10 km afleggen voordat het vervalst. Bovendien hebben muonen een groot doordringend vermogen: ze verliezen niet teveel energie bij botsingen onderweg. Hoogenergetische muonen bereiken daarom vaak wel het aardoppervlak.

Ook protonen en neutronen kunnen het aardoppervlak bereiken. Door hun grote massa (bijna tien keer zo groot als die van een muon) worden ze ook in hadronische showers niet in grote aantallen geproduceerd, en blijven ze dicht in de buurt van de kern van de airshower. Detectoren op het aardoppervlak meten van een airshower daarom voornamelijk muonen, elektronen en fotonen.



Figuur 3 – Schematische ontwikkeling van een airshower. Het diagram links geeft een indruk van de deeltjesdichtheid als functie van de diepte in de atmosfeer.



Figuur 4 – Schematische ontwikkeling van een airshower. De grootste deeltjesdichtheid wordt bereikt op een diepte x_{max} in de aardatmosfeer, gerekend vanaf het beginpunt van de shower.

Karakteristieke diepte – Bij het ontstaan van een airshower worden via inelastische botsingen tussen deeltjes grote aantallen nieuwe deeltjes gemaakt, die ieder een deel van de oorspronkelijke energie meedragen. Deze deeltjes ondergaan zelf weer botsingen, tot de energie per deeltje te laag is geworden om nog nieuwe deeltjes te kunnen maken. Tot dat moment neemt de deeltjesdichtheid in de airshower toe. Maar vanaf dat moment worden er

alleen nog deeltjes uit de airshower verstrooid, en neemt de deeltjesdichtheid in de shower weer af (zie figuur 3). Het moment waarop de deeltjesdichtheid maximaal is correspondeert met de zogenaamde karakteristieke diepte x_{\max} in de aardatmosfeer (zie figuur 4). De totale diepte van een airshower (of: het bereik) en de karakteristieke diepte x_{\max} hangen niet alleen af van de energie van het primaire deeltje en van de diepte waarop de eerste botsing plaatsvindt, maar ook van de atmosferische omstandigheden. Het aantal botsingen dat een deeltje ondergaat wordt namelijk bepaald door het product van de botsingskans per doelwitdeeltje (de kans dat het tot een botsing met een doelwitdeeltje komt) en van het aantal doelwitdeeltjes om mee te botsen. De eerste factor hangt alleen af van de aard van de botsende deeltjes (vergelijk de eerdere opmerking over het verschil in interactie tussen de verschillende soorten primaire deeltjes en de stikstof- en zuurstofkernen in de aardatmosfeer). De tweede factor hangt echter af van de deeltjesdichtheid in de atmosfeer langs het spoor van de airshower. Deze dichtheid wordt beïnvloed door factoren als hoogte, luchtdruk en temperatuur. Het is daarom gebruikelijk om de voortgang van een airshower niet uit te drukken in een afstand (m), maar in de hoeveelheid materie die de shower onderweg per vierkante centimeter passeert (met g/cm^2 als eenheid). In deze eenheid correspondeert het zeeniveau in Nederland met een verticale massakolom van zo'n $1030 \text{ g}/\text{cm}^2$. Alleen de meest energetische kosmische deeltjes maken airshowers waarvan x_{\max} op of vlakbij zeeniveau ligt.

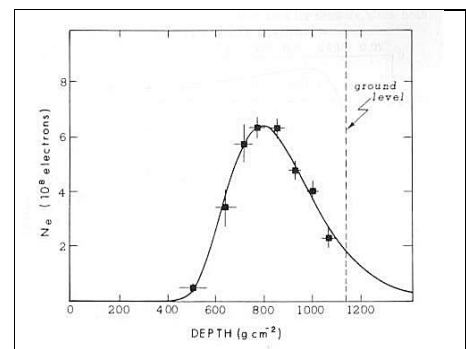
De ontwikkeling van een airshower kan in principe worden gevolgd door te kijken naar licht dat door aangeslagen moleculen in de atmosfeer wordt uitgezonden bij het passeren van een shower. De intensiteit van dit licht is een goede maat voor de totale stroom aan deeltjes (voornamelijk elektronen) op verschillende diepte in de shower. Dit licht is echter zeer zwak en kan alleen op maanloze nachten bij een volkomen heldere atmosfeer worden waargenomen. Het Fly's Eye/HiRes experiment in de woestijn van Utah (VS) is hiervoor ontworpen en heeft het profiel van showers nauwkeurig vastgelegd. Als voorbeeld is in figuur 6 het verloop van het aantal elektronen als functie van de diepte weergegeven voor een airshower gemaakt door een primair deeltje met een energie van $0,8 \cdot 10^{18} \text{ eV}$. Een andere potentiële bron van vergelijkbare informatie is laagfrequente radiostraling die door de stroom geladen deeltjes in de shower wordt opgewekt. Deze kan in principe worden gemeten met een instrument als de geplande LOFAR radiotelescoop.

Informatie over het Fly's Eye/HiRes experiment en de geplande LOFAR radiotelescoop is te vinden op:

- > <http://hires.physics.utah.edu>
- > <http://www.lofar.org>



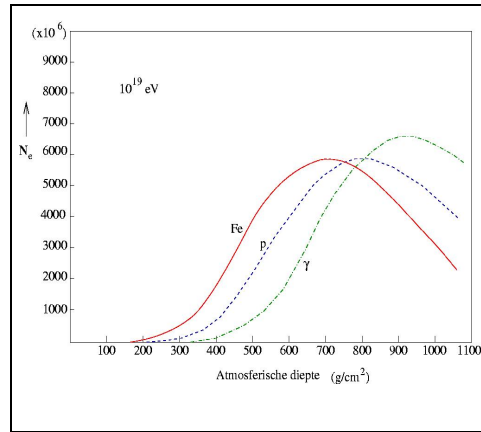
Figuur 5 – Meetopstelling van het Fly's Eye/HiRes experiment in de woestijn van Utah (VS).



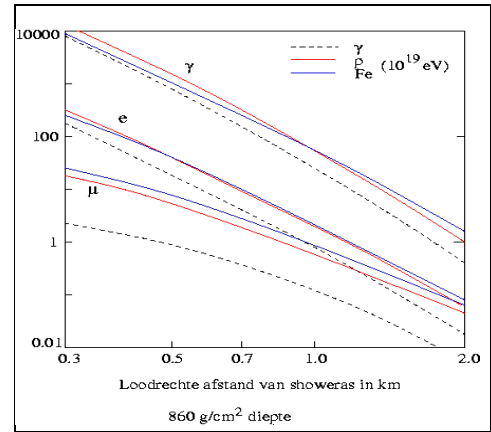
Figuur 6 – Het aantal elektronen (verticaal) als functie van de diepte (horizontaal) in de airshower van een primair deeltje met een energie van $0,8 \cdot 10^{18} \text{ eV}$.

Een diagram als dat van figuur 6 noemen we het verticale profiel van een airshower. Zo'n verticaal profiel is verschillend voor elektromagnetische en hadronische showers. Dat blijkt uit figuur 7, waarin drie verticale showerprofielen zijn weergegeven zoals bepaald uit een simulatiemodel: het showerprofiel van een primaire ijzerkern, een proton en een gammafoton – elk met een energie van 10^{19} eV . De drie showerprofielen in figuur 7 beperken zich tot het aantal elektronen in de shower als functie van de diepte in de aardatmosfeer. De belangrijkste verschillen tussen de drie verticale showerprofielen zijn de diepte waarop de shower in de aardatmosfeer ontstaat en de karakteristieke diepte van de shower.

In plaats van met een verticaal profiel is een shower ook te karakteriseren met een horizontaal profiel. In zo'n horizontaal profiel gaat het om het aantal deeltjes in de shower als functie van de afstand tot de shower-as in een vlak loodrecht op die as. Ook dit horizontale profiel is verschillend voor elektromagnetische en hadronische showers. Dat blijkt uit figuur 8, waarin de horizontale showerprofielen van gesimuleerde showers voor dezelfde drie primaire deeltjes (ijzerkern, proton en gamma-foton) zijn weergegeven. Deze showerprofielen geven echter niet alleen informatie over de aantallen elektronen, maar ook over de aantallen fotonen en muonen op een gegeven diepte in de aardatmosfeer.



Figuur 7 – Aantal elektronen (verticaal) als functie van de diepte (horizontaal) in een airshower van 10^{19} eV voor verschillende primaire deeltjes: een ijzerkern (Fe), een proton (p) en een gamma-foton (γ).



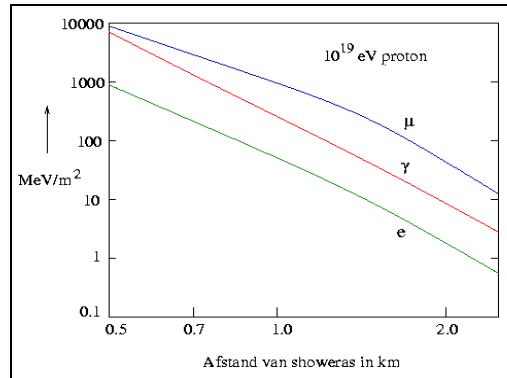
Figuur 8 – Aantal fotonen (γ), elektronen (e) en muonen (μ) (verticaal) als functie van de afstand (horizontaal) tot de kern van een airshower van 10^{19} eV op een diepte van 860 g/cm^2 voor verschillende primaire deeltjes (Fe, p en γ).

- 2 In figuur 7 en 8 zijn twee verschillende soorten showerprofielen weergegeven van dezelfde drie primaire deeltjes (Fe, p en γ): een horizontaal en een verticaal showerprofiel.
 - Verklaar de globale vorm van beide soorten showerprofielen in figuur 7 en 8.
 - Wat is volgens figuur 8 het belangrijkste verschil tussen een elektromagnetische shower en een hadronische shower, gelet op de deeltjesaantallen in de buurt van het aardoppervlak? Ga na of dit verschil in overeenstemming is met de eerder gegeven beschrijving van de beide soorten airshowers.
 - Hoe zouden astrofysici in het HiSPARC project iets te weten kunnen komen over de aard van het primaire deeltje? Of, met andere woorden: wat zouden ze dan aan het aardoppervlak moeten meten, en hoe bepalen ze uit die metingen of er sprake is van een elektromagnetische of een hadronische shower?
- 3 Met deeltjesdetectoren op verschillende plaatsen op het aardoppervlak zijn de aantallen deeltjes in een airshower en de aankomsttijden van de shower te meten.
 - Hoe zouden astrofysici in het HiSPARC project uit die metingen iets te weten kunnen komen over de energie en over de inslagrichting van het primaire deeltje?

Energie van airshowers – De aantallen fotonen en elektronen in een airshower zijn veel groter dan het aantal muonen, en voor een elektromagnetische shower geldt dat in nog sterkere mate dan voor een hadronische shower. Fotonen en elektronen zijn stabiele deeltjes, maar verliezen hun energie relatief snel door elastische of inelastische botsingen in de atmosfeer. Het gevolg is dat in een hadronische shower, hoewel de fotonen en elektronen in aantallen de muonen ver overtreffen, uiteindelijk toch het grootste deel van de energie die het aardoppervlak bereikt in de muonen zit – zoals te zien is in figuur 9 waarin de resultaten van een simulatiemodel zijn weergegeven. Voor elektromagnetische showers geldt dit niet, omdat het aantal geproduceerde muonen daarin ongeveer een factor tien lager ligt.

De energie van het primaire deeltje moet worden geschat uit het totaal van de energie van alle componenten van de airshower: muonen, fotonen, elektronen en niet waargenomen andere deeltjes. In eerste benadering kun je aannemen dat deeltjes in 1 cm^2 van de airshower afhankelijk van hun aard een vast bedrag aan energie verliezen per gram doorlopen materie – voor bijvoorbeeld elektronen is dat ongeveer $2,2 \text{ MeV}/(\text{g/cm}^2)$. De belangrijkste

oorzaak van afwijkingen van deze regel is de productie van nieuwe deeltjes die aan de shower worden toegevoegd. De totale energie in waarneembare deeltjes is daarom goed te schatten door het totale aantal deeltjes te bepalen en de lengte van het spoor van elk van die deeltjes. Vervolgens wordt de totale energie die door de deeltjes wordt afgegeven berekend door de lengte van al deze sporen per soort deeltje bij elkaar op te tellen en te vermenigvuldigen met het constante energieverlies per eenheid spoorlengte. Daarbij telt men dan een bedrag op aan niet waargenomen energie, die voornamelijk bestaat uit neutrino's en zeer energetische muonen die een behoorlijke afstand in de Aarde kunnen doordringen. Deze verloren energie is uit simulaties te bepalen, en komt neer op ongeveer 7% voor de airshowers met een energie rond 10^{19} eV.



Figuur 9 – Energieflux (verticaal) van fotonen (γ), elektronen (e) en muonen (μ) als functie van de afstand (horizontaal) tot de shower-as van een airshower veroorzaakt door een primair 10^{19} eV proton.

Een waarschuwing is hier echter op zijn plaats. De simulaties van airshowers zijn gebaseerd op de extrapolatie van processen beschreven door het standaardmodel van quarks en leptonen en hun interacties. Het standaardmodel is getest tot ruwweg 200 GeV interactie-energie. De botsingsenergie van het primaire deeltje en de eerste atmosferische stikstof- of zuurstofkern is voor de meest energetische airshower echter een factor honderd tot duizend hoger. De geldigheid van het standaardmodel dan wel het optreden van nieuwe fysische verschijnselen zijn in het betreffende energiegebied niet experimenteel onderzocht. Het is bijvoorbeeld heel goed mogelijk dat in het primaire proces bij hoge energie een quark-gluon plasma wordt gemaakt. De eigenschappen van dit plasma zouden de ontwikkeling van airshowers kunnen beïnvloeden.

HiSPARC onderzoek – De vraag die we uiteindelijk moeten beantwoorden is hoe we uit metingen met een netwerk van detectoren op het aardoppervlak de aard, energie en richting van het oorspronkelijke kosmische deeltje kunnen afleiden.

In het wetenschappelijk onderzoek naar kosmische straling gebruikt men de *aanname* dat alle tot nu toe gedetecteerde airshowers hadronisch van aard zijn. Bij een hoogenergetisch gammafoton als oorsprong van de airshower zou het aantal muonen relatief lager moeten zijn ten opzichte van de aantallen fotonen en elektronen dan bij een hadronische shower het geval is. Een dergelijk 'relatief tekort' aan muonen is in alle experimenten tot nu toe echter niet gemeten. Daarmee is de vraag naar de aard van het oorspronkelijke kosmische deeltje beantwoord: een geladen deeltje – althans, tot het tegendeel bewezen is. Het HiSPARC project zal over deze aanname geen uitsluitsel kunnen geven, want met de detectoren in dit project meten we alleen muonen, en geen fotonen en elektronen – althans, ook dat is voorlopig de aanname.

Wat we met een netwerk van detectoren verspreid over een oppervlak van zo'n 10 km² wel kunnen meten is de muonendichtheid (het aantal muonen per oppervlakte-eenheid) op verschillende plaatsen in een airshower. Uit die metingen is een schatting te maken van de energie van het primaire kosmische deeltje. Daarnaast is uit een meting van de absolute aankomsttijden van de muonen in een airshower bij minstens drie verschillende detectoren in ruwweg een driehoeksopstelling de inslagrichting van het primaire kosmische deeltje te reconstrueren. Uiteraard hangt de nauwkeurigheid van de reconstructie af van de dichtheid van detectoren in het gebied van de airshower: hoe meer meetpunten, des te betrouwbaarder zijn de schattingen van de energie en de richting van het primaire kosmische deeltje.

4 In opdracht 2 heb je onder andere antwoord gegeven op de vraag hoe astrofysici in het HiSPARC project iets te weten zouden kunnen komen over de aard van het primaire deeltje. Controleer en – zo nodig – verbeter dat antwoord met behulp van de boven-

staande informatie over het HiSPARC onderzoek.

- 5 In opdracht 3 heb je antwoord gegeven op de vraag hoe astrofysici iets te weten zouden kunnen komen over de energie en de inslagrichting van het primaire deeltje. Controleer en – zo nodig – verbeter die antwoorden met behulp van de informatie in de bovenstaande informatie over het HiSPARC onderzoek.

Bronnen

J.W. van Holten (2004), *Kosmische straling: airshowers*. Amsterdam: Nederlands Instituut voor Kern- en Hoge Energie Fysica (Nikhef).

M. Nagano & A.A. Watson (2000), Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays. *Reviews of Modern Physics* 72 (3), 689-732.