

Kosmische straling: airshowers

J.W. van Holten
NIKHEF, Amsterdam

1. Kosmische straling.

Kosmische straling wordt veroorzaakt door zeer energetische deeltjes die vanuit de ruimte de aardatmosfeer binnendringen [1]. In de atmosfeer kunnen ze botsen met de atomen van stikstof en zuurstof, de belangrijkste componenten van de atmosfeer. Dat gebeurt als de wisselwerking tussen deze atomen en het binnenkomende deeltje sterk genoeg is. Kosmische fotonen met hoge energie (gammastraling) hebben zo'n sterke interactie, evenals geladen deeltjes zoals protonen en zwaardere atoomkernen, van α -deeltjes tot ijzerkernen. Hoog-energetische neutrino's laten daarentegen geen sporen in de atmosfeer achter.

De kosmische straling die we op het aardoppervlak waarnemen bestaat uit secundaire deeltjes, die ontstaan bij de botsing van het primaire deeltje en de daaropvolgende botsingen, en ook bij vervalsprocessen van de geproduceerde deeltjes. Deze deeltjes leggen gemiddeld tussen de tien en de veertig kilometer af voor ze het aardoppervlak bereiken. Dat kan alleen als het primaire deeltje voldoende energie bezit: minimaal ca. 5 GeV¹. De regen van secundaire deeltjes in de atmosfeer noemen we een *airshower*. We geven hieronder een overzicht van een aantal eigenschappen van airshowers: hun ontstaan, hun samenstelling, hun lengte en de manier waarop ze zich uitbreiden. We zijn daarbij vooral geïnteresseerd in de airshowers van de meest energetische deeltjes; deze zijn vanuit astrofysisch oogpunt het meest interessant en geven bovendien op aarde de grootste meetbare effecten.

2. Soorten airshowers.

Geladen deeltjes hebben een sterkere interactie met de moleculen 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) hun eerste botsing aan.

De samenstelling van de showers die door fotonen worden gemaakt is ook verschillend van die van geladen deeltjes. Fotonen hebben alleen een elektromagnetische wisselwerking met de materie; daarbij kunnen alleen paren van deeltjes en antideeltjes worden gemaakt, voornamelijk elektronen en positronen. Deze stralen zelf ook weer fotonen af, b.v. wanneer ze door het elektrisch veld van een kern gaan, of wanneer een positron annihileert met een atmosferisch elektron. Zulke showers heten daarom *elektromagnetische showers*.

¹We drukken alle energieën uit in elektronvolts en veelvoud daarvan; 1 eV = 1.60×10^{-19} J.

Wanneer daarentegen een energetisch proton de atmosfeer binnendringt, heeft het niet alleen door zijn elektrische lading een wisselwerking met de atmosferische moleculen, maar nog veel meer door de sterke krachten die het kan ondergaan van de atoomkernen van zuurstof en stikstof. Bij de botsingsenergieën waarvan hier sprake is, gaat het op microscopische schaal eigenlijk om botsingen tussen de individuele componenten van het proton (quarks, 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, i.h.b. grote aantalen *mesonen*: gebonden quark-antiquark paren. De lichtste en meest overvloedig voorkomende mesonen zijn de *pionen*, die voorkomen in drie soorten: π^\pm met lading $\pm e$ (de elementaire lading), en π^0 zonder lading. Deze mesonen zijn niet stabiel, maar vervallen na korte tijd in andere deeltjes. Zo vervalt een π^\pm gemiddeld na 2.6×10^{-8} seconde in een muon (μ^\pm) en een bijbehorend (anti)neutrino ($\nu, \bar{\nu}$). Het ongeladen pion vervalt daarentegen al na 0.8×10^{-16} seconde in twee fotonen. Wegens de grote aantallen hadronen (sterk wisselwerkende kerndeeltjes en mesonen) die vooral in het begin van de shower voorkomen, spreken we over *hadronische showers*.

3. De samenstelling van airshowers.

Een neutraal π^0 meson met een energie van 10 GeV legt ongeveer 2 μm af voor het vervalt in fotonen; een geladen π^\pm meson leeft 3×10^8 keer zo lang en kan dus met dezelfde energie gemiddeld 600 m afleggen alvorens het in een muon overgaat. De meeste pionen bereiken daarom nooit het aardoppervlak. Muonen hebben een langere levensduur van gemiddeld 2.2×10^{-6} seconde; bij een energie van 10 GeV of meer kan een muon daarom tussen de 5 en 10 km afleggen alvorens te vervallen. Bovendien hebben muonen een groot doordringingsvermogen: ze verliezen niet teveel energie bij botsingen onderweg. Hoogenergetische muonen bereiken daarom vaak wel het aardoppervlak.

Muonen worden in hadronische showers in aanzienlijke hoeveelheden geproduceerd via het verval van mesonen. In elektromagnetische showers komen ze veel minder voor: de massa van een muon is 200 maal zo groot als van een elektron, en het kost een foton dus aanzienlijk meer energie om een $\mu^+ - \mu^-$ paar te maken dan een $e^+ - e^-$ paar.

Fotonen, elektronen en positronen 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 fotonen en elektronen in aantallen de muonen ver overtreffen, maar dat uiteindelijk de grootste fractie van de energie die het aardoppervlak bereikt in muonen zit. Voor elektromagnetische showers geldt dit niet, omdat het aantal geproduceerde muonen ongeveer een factor 10 lager ligt.

Ook protonen en neutronen kunnen het aardoppervlak bereiken. Door hun grote massa (bijna 10 maal 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 shower.

Detectoren op het aardoppervlak meten van een airshower daarom voornamelijk muonen, elektronen en fotonen. Uit de verdeling van deze componenten kunnen we meer leren over de oorsprong van de shower: de aard en energie van het primaire deeltje, de richting waar het vandaan kwam en de hoogte waarop de shower gemaakt werd.

4. De ontwikkeling van airshowers.

Bij het ontstaan van een airshower worden er via inelastische botsingen tussen deeltjes grote aantallen nieuwe deeltjes gemaakt, die ieder een deel van de oorspronkelijke energie meedragen. Deze deeltjes ondergaan zelf weer botsingsprocessen, tot de energie per deeltje te laag is geworden om nog nieuwe deeltjes te kunnen maken. Vanaf dat moment worden er alleen nog deeltjes uit de shower verstrooid, en neemt de dichtheid van deeltjes in de shower weer af.

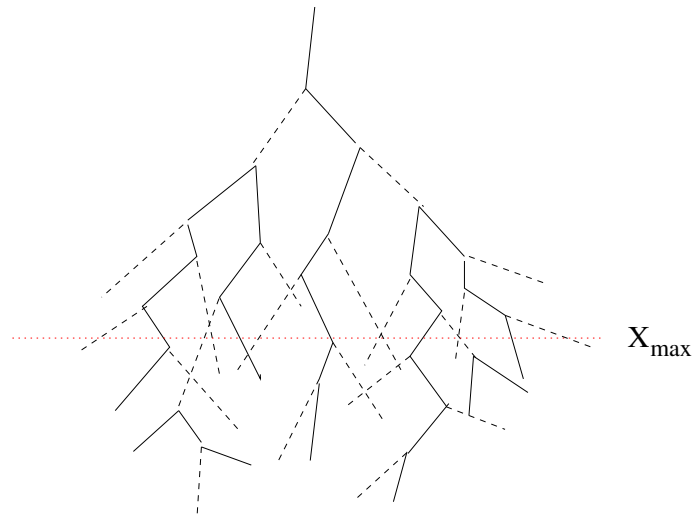


Fig. 1: Schematische ontwikkeling van een airshower

De diepte waarop de grootste deeltjesdichtheid wordt bereikt wordt aangeduid met het symbool X_{max} . Het bereik (de totale diepte van een shower), en de lokatie van X_{max} , hangen niet alleen af van de energie van het inkomende deeltje, en van de diepte waarop de eerste botsing plaats vindt, maar ook van de atmosferische omstandigheden. Het aantal botsingen dat een deeltje ondergaat wordt namelijk bepaald door het produkt van de kans per doelwitdeeltje, dat het tot een botsing komt, en het aantal van deze deeltjes om mee te botsen. De eerste factor hangt alleen af van de aard van de botsende deeltjes, maar de tweede factor hangt af van de deeltjesdichtheid in de atmosfeer langs het spoor van de shower. Deze dichtheid wordt beïnvloed door factoren als hoogte, luchtdruk en temperatuur. Het is daarom gebruikelijk de voortgang van een shower niet uit te drukken in een afstand (m), maar in de hoeveelheid materiaal dat de shower onderweg per vierkante centimeter passeert (g/cm^2). In deze eenheden correspondeert zeeniveau met een verticale massakolom van ongeveer $900 g/cm^2$. Alleen de meest energetische kosmische deeltjes maken showers waarvan X_{max} op of vlakbij zeeniveau ligt.

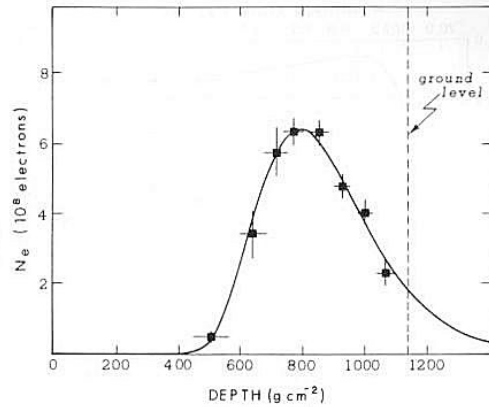


Fig. 2: Aantal elektronen als functie van de diepte in een airshower van 0.8×10^{18} eV

De ontwikkeling van een shower kan in principe worden gevolgd door te kijken naar licht dat door aangeslagen moleculen in de atmosfeer wordt uitgezonden wanneer een shower voorbij komt. De intensiteit van dit licht is een goede maat voor de totale stroom aan geladen deeltjes (vnl. elektronen) die voorbijkomt. 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) [2] is hiervoor ontworpen en heeft het profiel van showers nauwkeurig vastgelegd. In fig. 2 is de evolutie van het aantal elektronen als functie van de diepte weergegeven voor een shower gemaakt door een deeltje met een energie van 0.8×10^{18} eV. Een andere potentiële bron van vergelijkbare informatie is laag-frequente radiostraling die door de stroom geladen deeltjes in de shower wordt opgewekt. Deze kan in principe worden gemeten met een instrument als de voorgenomen LOFAR radiotelescoop [3].

Het profiel van een shower zoals weergegeven in fig. 2 is kwantitatief niet hetzelfde voor elektromagnetische en hadronische airshowers. Elektromagnetische showers beginnen lager in de atmosfeer, en produceren minder hadronen en muonen; bij dezelfde energie worden er daarom meer elektronen en positronen gemaakt. Maar ook tussen hadronische showers zijn er verschillen, afhankelijk van de massa en lading van het primaire deeltje. Lichte deeltjes, i.h.b. protonen, botsen gemiddeld dieper in de atmosfeer dan zware, zoals een Fe-kern. De laatste veroorzaken ook een grotere hadronische component in de shower: iets meer pionen en andere mesonen, en dus ook evenredig meer muonen. Fig. 3 toont drie profielen van showers, zoals bepaald uit een simulatiemodel, van een primaire Fe-kern, een proton en een gamma-foton, ieder met een energie van 10^{19} eV. De positie van X_{max} kan echter sterk fluctueren afhankelijk van de diepte van de eerste botsing.

Een andere parameter van belang voor het determineren van airshowers is de relatieve verdeling van zowel de aantallen als de energie van fotonen, elektronen en muonen. In fig. 4 worden de aantallen van deze deeltjes weergegeven, als functie van de loodrechte afstand tot het centrum van de shower, weer voor model-showers van een 10^{19} eV Fe-kern,

proton en gamma-deeltje. Hieruit blijkt, dat in alle gevallen de fotonen in aantal de andere deeltjes ver overtreffen, en dat in het centrum van een hadronische shower 10-100 keer zoveel elektronen als muonen voorkomen; naar buiten toe wordt dit verschil kleiner.

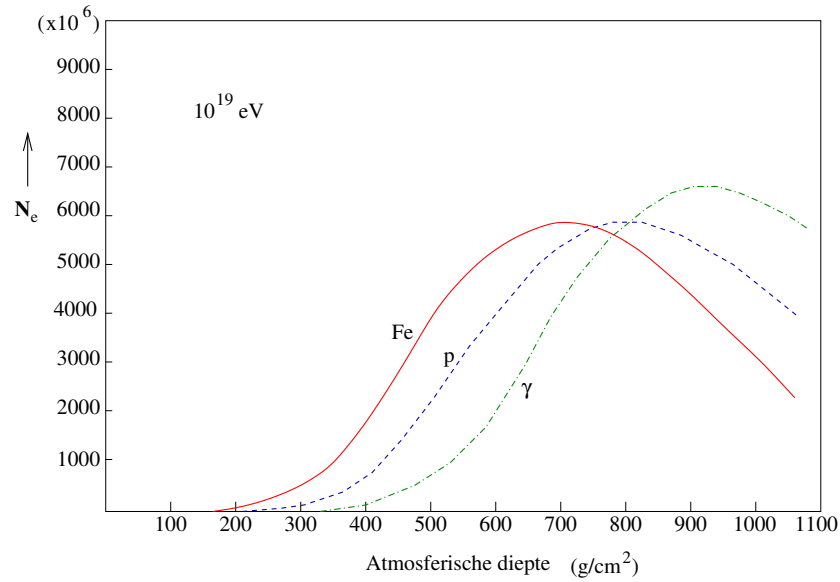


Fig. 3: Aantal elektronen als functie van de diepte in een airshower van 10^{19} eV voor verschillende primaire deeltjes

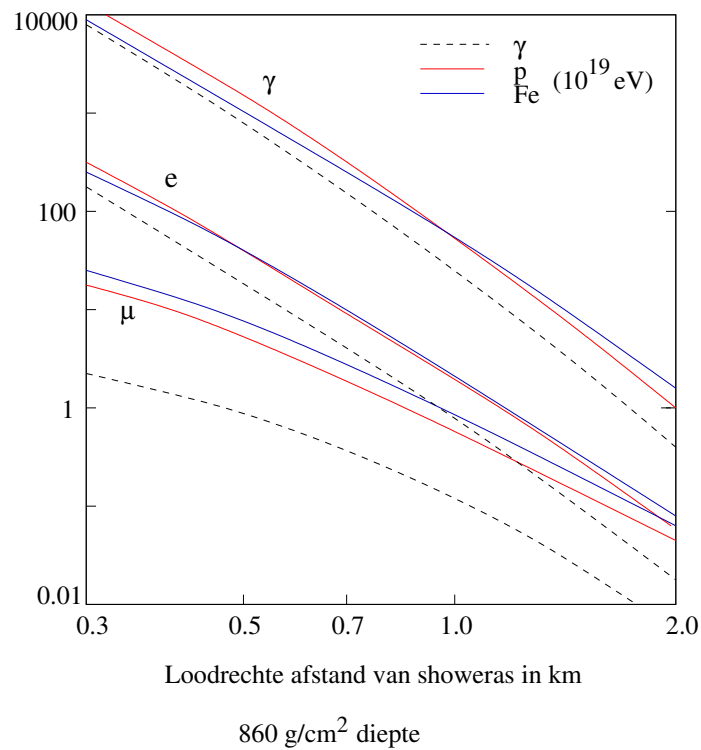


Fig. 4: Aantal fotonen, elektronen en muonen als functie van de afstand tot de kern van een airshower van 10^{19} eV op een diepte van 860 g/cm^2 voor verschillende primaire deeltjes

Over de hele linie produceert een Fe-kern 1.4 maal zoveel muonen als een proton. Uit de figuur is te zien, dat in een elektromagnetische shower het aantal muonen tien keer kleiner is dan in een hadronische shower; voorts neemt het aantal deeltjes in een elektromagnetische shower naar buiten toe sneller af dan in hadronische showers.

In energie gemeten is het aandeel van de verschillende componenten echter volledig anders. Zoals te zien in fig. 5, dragen muonen in een hadronische shower het grootste deel van de energie, en dat wordt relatief meer met toenemende afstand tot het centrum. In het centrum zelf is de bijdrage van fotonen van vergelijkbare grootte, maar zoals al opgemerkt valt deze sneller af naar de rand toe. Elektronen dragen in alle gevallen een factor tien minder aan de energieflex bij. Om het showerprofiel te bepalen, moeten we de gemeten deeltjesflux op de grond uitzetten tegen de afstand tot het centrum. M.b.v. simulaties als weergegeven in fig. 4 en fig. 5 kunnen we dan de aard en de totale energie van het primaire deeltje bepalen. Uiteraard gaat dit beter naarmate er meer meetpunten zijn.

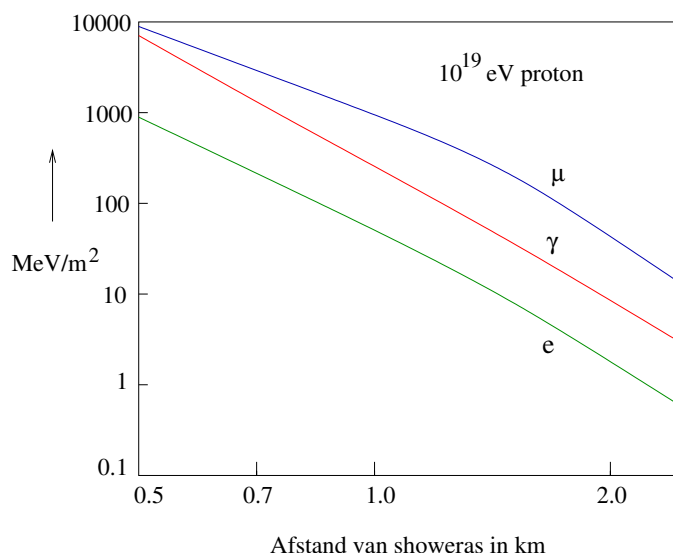


Fig. 5: Energieflex van fotonen, elektronen en muonen in een airshower als functie van de afstand tot het centrum, voor een 10^{19} eV proton

Niettemin kunnen we voor verticale of bijna verticale showers uit een enkele precieze meting van de deeltjesflux al informatie halen over de afstand tot het centrum, zonder dat een tweede meetpunt nodig is [4]. Dit kan door gebruik te maken van de observatie, dat de deeltjes aan de rand van de shower een grotere spreiding in aankomsttijd hebben dan de deeltjes in het centrum. Met een snelle *analoog-digitaal* omzetter kan de flux gemeten worden in korte intervallen van 25 ns of minder. Deze flux, uitgedrukt in het equivalente aantal vertical muonen dat nodig is om dezelfde energieflex te geven (VEM), is gemeten door het Auger experiment [5].

Deze metingen zijn weergegeven als functie van de afstand tot het centrum voor een bijna verticale shower van 10^{19} eV in fig. 6. Er is een duidelijk (vrijwel lineair) verband tussen

de breedte van de showerpuls en de afstand: op 460 m van het centrum komen alle deeltjes binnen $0.5 \mu\text{s}$ door de detector, op 1680 m afstand duurt het 3-4 μs voor de shower gepasseerd is, en is er bovendien veel meer structuur in de puls waarneembaar.

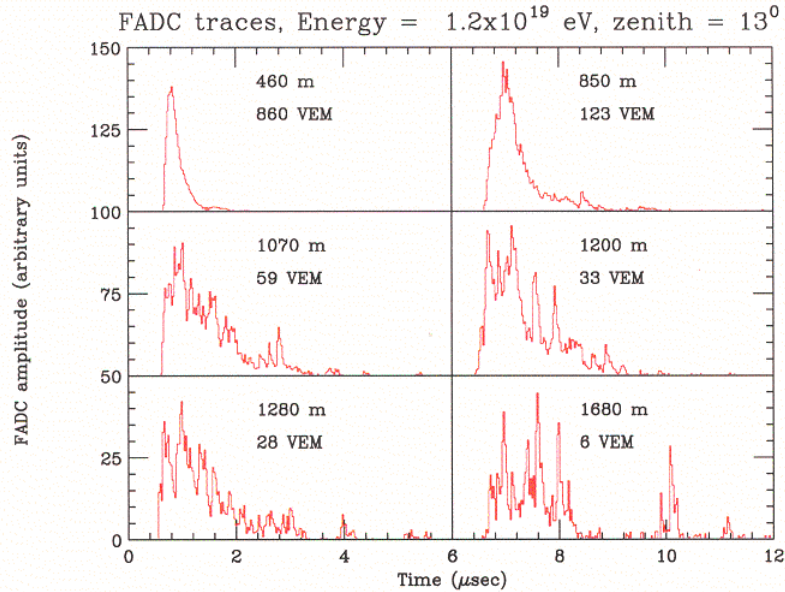


Fig. 6: Energieflux in een airshower van 10^{19} eV als functie van de tijd op verschillende afstanden tot het centrum

5. De energie van airshowers.

De energie van het primaire deeltje moet worden geschat uit het totaal van de energie van alle componenten van de airshower: muonen, elektronen, fotonen en niet waargenomen andere deeltjes. In eerste benadering kun je aannemen dat deeltjes in een vierkante centimeter van de shower afhankelijk van hun aard een vast bedrag aan energie verliezen per gram doorlopen materie; voor elektronen is dat b.v. ongeveer 2.2 MeV/g/cm^2 . De belangrijkste reden voor afwijkingen van deze regel is het maken 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 ieder van die deeltjes; vervolgens wordt de totale energie die door de deeltjes wordt gedissipeerd 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 kan uit simulaties worden bepaald, en komt neer op ongeveer 7 % voor de showers met de hoogste energie, rond 10^{19} eV.

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 lep-

tonen, en hun interacties; het standaardmodel is getest tot ruwweg 200 GeV interactie-energie². De botsingsenergie in het massamiddelpunt van het primaire deeltje en de eerste atmosferische stikstof- of zuurstofkern is voor de meest energetische shower echter een factor 100 à 1000 hoger; de geldigheid van het standaardmodel dan wel het optreden van nieuwe fysische verschijnselen zijn in het betreffende energiegebied niet experimenteel onderzocht. Het is b.v. 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 en airshowermodellen kunnen beïnvloeden.

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. Daartoe moeten we alle informatie omtrent het showerprofiel combineren. De meest elementaire informatie is de omvang van de shower, de dichtheid van geladen deeltjes en het verloop daarvan tussen het centrum en de rand van de shower. Dit levert een eerste schatting van de primaire energie. Daarnaast kan uit de bepaling van de absolute aankomsttijden van de deeltjes de richting worden gereconstrueerd. Tenslotte kan een afzonderlijke bepaling van elektron- en muondichtheden informatie geven over de aard van het oorspronkelijke deeltje. Uiteraard hangt de nauwkeurigheid van de reconstructie af van de dichtheid van detectoren in het gebied van de shower: hoe meer meetpunten, hoe betrouwbaarder de informatie. Maar extra informatie kan ook worden verkregen uit metingen die complementair zijn aan de detectie van de geladen deeltjes; voor HiSPARC zou dat in het bijzonder de meting van laagfrequente radiostraling met behulp van het LOFAR antennenetwerk kunnen zijn.

Bronnen

De figuren die de resultaten van simulaties van 10^{19} eV airshowers weergeven zijn in aangepaste vorm overgenomen uit Cronin [4]. Meer informatie over kosmische straling is te vinden in ref. [6].

²Dit zijn energieën gemeten in het massamiddelpunt van de deelnemende deeltjes.

Bibliography

- [1] <http://www.hisparc.nl>
- [2] <http://hires.physics.utah.edu>
- [3] <http://www.lofar.org>
- [4] J. Cronin, *The highest energy cosmic rays*; arXiv:astro-ph/0402487 (2004)
- [5] <http://www.auger.org>
- [6] M. Nagano and A.A. Watson, Rev. Mod. Physics vol. 72 (2000), 689