



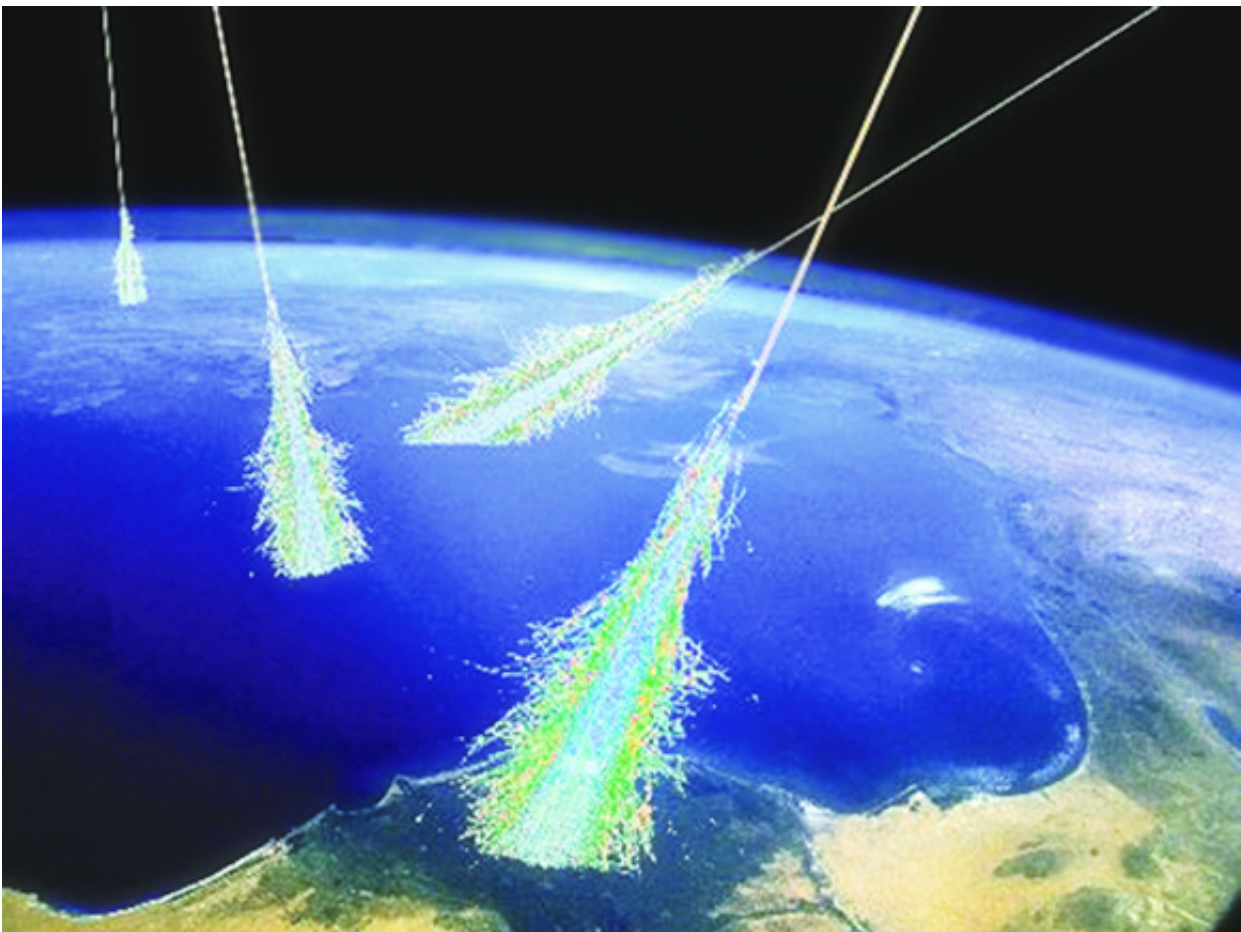
1 Inleiding

De aarde wordt continu gebombardeerd door kosmische straling.¹ Dat zijn deeltjes die uit het heelal vandaan komen zoals protonen, ijzerkernen en koolstofkernen etc. Deze primaire deeltjes hebben energieën variërend van 10^2 eV tot 10^{20} eV. De deeltjes met lagere waarden voor energie zijn bijvoorbeeld deeltjes uitgezonden door de zon. De deeltjes met hogere energiewaarden ($>10^{17}$ eV) hebben een energie die we op aarde in versnellers niet kunnen bereiken. Het noorderlicht ontstaat door deeltjes met een energie in de orde van een keV, die op stikstof- en zuurstofmoleculen botsen. Als primaire deeltjes energieën hebben in de orde van 10^{14} eV tot 10^{20} eV en op atomen in de atmosfeer botsen ontstaat een lawine van allerlei secundaire deeltjes, zie Figuur 1.1, dat een Extended Air Shower (EAS) wordt genoemd. Deze EAS reikt afhankelijk van de energie van het primaire deeltje en de hoogte van de eerste botsing tot het aardoppervlak. Victor Hess was de eerste die deze EAS of kosmische showers daadwerkelijk gemeten heeft tijdens diverse metingen met een luchtballon in 1912. Hess merkte dat de intensiteit van de achtergrondstraling hoger werd naarmate hij hoger in de atmosfeer kwam. Men dacht toen straling voornamelijk uit de aarde afkomstig moest zijn en de intensiteit dus zou moeten afnemen naar mate je verder van de aarde af kwam. Tegenwoordig wordt er veel onderzoek verricht aan kosmische straling en EAS, door onder andere de volgende onderzoeksgroepen: KASCADE, AUGER. In Nederland is dit op scholen mogelijk met HiSPARC.

2 HiSPARC

Het Nederlandse project HiSPARC is een samenwerking van middelbare scholen en universiteiten. Op deze scholen en universiteiten zijn detectie stations geplaatst waarmee we EAS kunnen meten en analyseren. Leraren en leerlingen installeren, beheren en onderhouden de stations, en houden de kwaliteit van de ermee verkregen meetgegevens in de gaten. Zo worden EAS in een groot oppervlak gemeten en worden middelbare scholieren betrokken bij wetenschappelijk onderzoek ondersteund door universiteiten. Het doel van HiSPARC is om met behulp van de stations op scholen onderzoek te doen aan deze kosmische showers. Onderzoeksvragen met betrekking tot kosmische straling zijn, waar deze vandaan komen en hoe ze ontstaan. De energie en richting zijn af te leiden uit de grootte van de EAS en de tijdsverschillen in de detectoren. Waar kosmische straling vandaan komt is gedeeltelijk bekend. Laag-energetische deeltjes komen van de zon (de zonnewind) en van sterren uit ons melkwegstelsel. Deeltjes met energieën tot ongeveer 10^{16} eV zijn afkomstig van supernova's. Deeltjes met nog meer energie kunnen aan magneetvelden van sterrenstelsels ontsnappen en zijn waarschijnlijk buiten ons melkwegstelsel ontstaan. Hierbij denkt men aan een oorsprong van primaire deeltjes uit Gamma-Ray Bursts (GRB), aan actieve kernen van ver weg gelegen sterrenstelsels, en aan andere verschijnselen die met zeer

¹Bij dit blad is ook een powerpoint beschikbaar, te vinden op: docs.hisparc.nl/ bij teaching material.



Figuur 1.1 – visualisatie van kosmische straling (bron: S. Swordy, Universiteit van Chicago).

energetische plasmajets gepaard gaan. Kosmische straling kan afkomstig zijn van zwarte gaten en actieve sterrenstelsels.

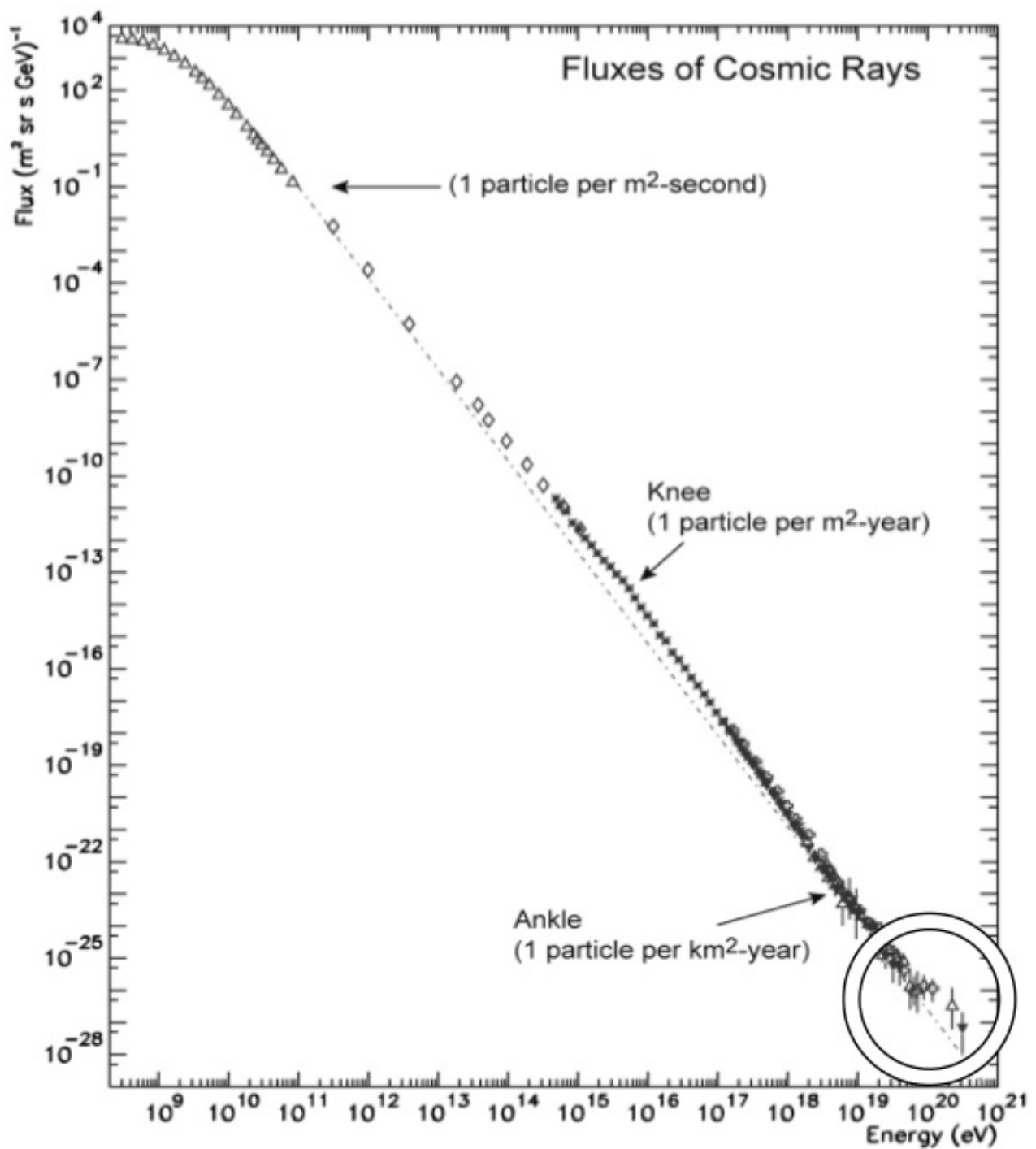
3 Aantal kosmische showers

Het aantal kosmische showers wat gemeten wordt, hangt sterk af van de energie van het primaire deeltje. Primaire deeltjes met een 10 maal zo hoge energie komen globaal 1000 maal zo weinig voor. In Figuur 3.1 zie je het diagram (op een dubbel logaritmische schaal) wat het overzicht geeft tussen de flux (aantal showers per tijdseenheid per oppervlak) tegen de energie van het primaire deeltje. Hierin is te zien dat het aantal deeltjes met een energie van 10^{19} eV één keer per jaar op een oppervlak van 1 km^2 komt, door één m^2 gaat per seconde gemiddeld een deeltjes met een energie van 10^{11} eV. Duidelijk is te zien dat de grafiek tussen 10^{20} eV tot 10^{21} eV ogenschijnlijk ophoudt. Deze grens wordt de ‘GZK cut-off’ genoemd. (Greisen–Zatsepin–Kuzmin limiet). Men vermoedt dat de ‘GZK’ bovengrens vormt voor de energie van kosmische straling. Zeker weten doen we dat niet omdat die energieën heel zeldzaam zijn.

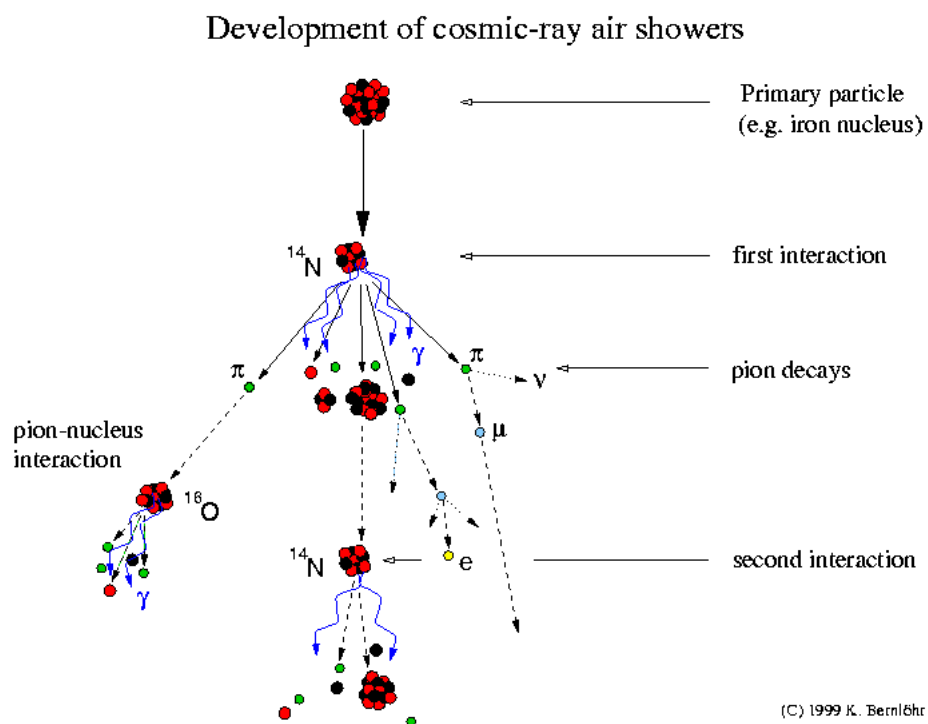
Je kunt het onderzoek van HiSPARC vergelijken met onderzoek van sterrenkundigen. Sterrenkundigen bestuderen sterren met behulp van het licht wat sterren en hemelobjecten uitzenden of terugkaatsen. De informatie die zij vinden en gebruiken zit ‘opgesloten’ in het licht wat opgevangen wordt. De mensen die de data van HiSPARC onderzoeken, bestuderen de kosmische showers aan de hand van de detectoren die op de scholen en universiteiten staan. Zij meten de hoeveelheid deeltjes per oppervlakte eenheid en kijken naar tijdsverschillen tussen aankomst van de deeltjes in de detectoren, daarmee kunnen ze informatie over de EAS herleiden. De HiSPARC stations meten de deeltjes van de EAS die het aardoppervlak bereiken en zijn via een netwerk verbonden met het Nikhef en de Universiteit van Nijmegen. De HiSPARC detectoren kunnen de fotonen, muonen en elektronen meten die in zo’n EAS voorkomen, zie Figuur 3.2. Een station bestaat uit twee of vier detectoren, die ieder een eigen signaal bij een detectie van een EAS geven; de pulshoogte. Is het signaal hoog genoeg en meten twee of meer detectoren binnen een kort tijdspanne een signaal, dan slaat het meetstation dit signaal als een event op in de database. Het registreren van een signaal in een detector wordt uitgebreid uitgelegd in het document "Inregelen PMT's". Web-adres: <http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/informatie-pakket/>. Per uur worden typisch zo’n 2000 tot 3000 events geregistreerd per station. Als meerdere detectoren of stations binnen een bepaalde tijd deeltjes detecteren dan spreken we van een coïncidentie. Bij een coïncidentie behoren dus alle metingen op dat moment bij één EAS.

4 Reconstructies uit de showers

Momenteel richt het HiSPARC onderzoek zich op het reconstrueren van de richting en energie van gedetecteerde showers. De benodigde data kun je opvragen van HiSPARC netwerk, via de volgende website, http://data.hisparc.nl/media/jsparc/data_retrieval.html Hoe de data retrieval tool werkt en hoe je er snelle analyses mee kunt doen en correlaties tussen verschillende grootheden kunt zoeken wordt uitgelegd in het infopakket van HiSPARC, in het bestand



Figuur 3.1 – Flux als functie van de energie van kosmische straling. Tussen 10^{11} en 10^{15} eV meten we bijna geen flux omdat showers die ontstaan door deeltjes met deze energieën de grond niet bereiken. (bron: S. Swordy, Universiteit van Chicago)



Figuur 3.2 – Als een primair deeltje op de atmosfeer komt, kan er een botsing plaatsvinden met een atoom, door die botsing ontstaan er andere elementaire deeltjes en fotonen. copyright: Konrad Bernlöhr

#	Date	Time	Timestamp	Nanoseconds	Pulseheight	Pulseintegral	Number of MIPs	Arrival time	Trigger time	trace
1	2014-10-25	00:00:03	1414195203	977621797	1455 509 737 106	23016 9014 10389 1625	7.1304 3.0017 3.1467 0.5549	22.5 15 22.5 27.5	25	show
2	2014-10-25	00:00:05	1414195205	472475018	204 238 10 11	3106 3138 0 0	0.9622 1.045 0 0	12.5 897.5 -999 -999	905	show
3	2014-10-25	00:00:06	1414195206	855008908	8 137 228 12	0 1221 3125 0	0 0.4066 0.9465 0	-999 427.5 15 -999	437.5	show
4	2014-10-25	00:00:10	1414195210	498442470	189 255 11 11	2352 2994 0 0	0.7287 0.997 0 0	297.5 12.5 -999 -999	307.5	show
5	2014-10-25	00:00:13	1414195213	61948153	314 270 10 10	3978 4361 0 0	1.2324 1.4523 0 0	50 15 -999 -999	55	show
6	2014-10-25	00:00:13	1414195213	452797061	312 9 9 190	4965 0 0 2187	1.5382 0 0 0.7468	20 -999 -999 12.5	25	show
7	2014-10-25	00:00:20	1414195220	392797033	233 8 9 195	3906 0 0 2701	1.2101 0 0 0.9223	892.5 -999 -999 12.5	897.5	show
8	2014-10-25	00:00:21	1414195221	466140517	8 445 603 10	0 7510 9336 0	0 2.5009 2.8278 0	-999 15 30 -999	32.5	show
9	2014-10-25	00:00:24	1414195224	37818560	8 466 10 341	0 7248 0 4990	0 2.4136 0 1.7039	-999 25 -999 15	30	show
10	2014-10-25	00:00:27	1414195227	113036891	172 62 229 11	2327 506 2875 0	0.7209 0.1685 0.8708 0	17.5 52.5 12.5 -999	27.5	show
11	2014-10-25	00:00:32	1414195232	675123796	2859 3904 3892 2651	53218 87964 96645 50240	16.4871 29.2928 29.2728 17.1553	22.5 10 35 37.5	25	show
12	2014-10-25	00:00:34	1414195234	543084674	6 8 404 197	0 0 5576 3148	0 0 1.6889 1.0749	-999 -999 27.5 15	32.5	show
13	2014-10-25	00:00:36	1414195236	777150328	155 8 515 11	2262 0 6880 0	0.7008 0 2.0839 0	642.5 -999 15 -999	655	show
14	2014-10-25	00:00:37	1414195237	497815531	6 9 195 184	0 0 3227 2326	0 0 0.9774 0.7943	-999 -999 10 22.5	32.5	show

Figuur 4.1 – Als met de (online) data-retrieval tool, data wordt gedownload dan zijn er een aantal belangrijke kolommen voor reconstructie te zien, zoals Arrival time, Pulseheight, Pulseintegral en Number of MIP's.

‘Data-retrieval’ op het webadres van infopakket: <http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/informatie-pakket/>

Als er data wordt gedownload via de data retrieval zie je dat er een aantal gegevens worden gemeten met de stations Figuur 4.1. Voor de reconstructie van de richting waaruit de kosmische shower komt en de energie van het deeltje zijn een aantal kolommen van belang, zoals de Arrival time, Pulseheight, Pulseintegral en Number of MIP's ².

De deeltjes, die geproduceerd worden in een kosmische shower, invallen op de detectoren kan uit de gemeten puls informatie worden gehaald, die leidt tot de kolommen: Arrival time, Pulseheight, Pulseintegral, Number of MIP's. Met de informatie in deze kolommen wordt de richting en energie van de kosmische showers zo nauwkeurig mogelijk gereconstrueerd. In Figuur 4.2 zie je dat elk meetstation per gemeten event per detector een signaal geeft, maar dat ze niet even hoog zijn, m.a.w. een lagere pulshoogte betekent dat er minder deeltjes geregistreerd zijn.

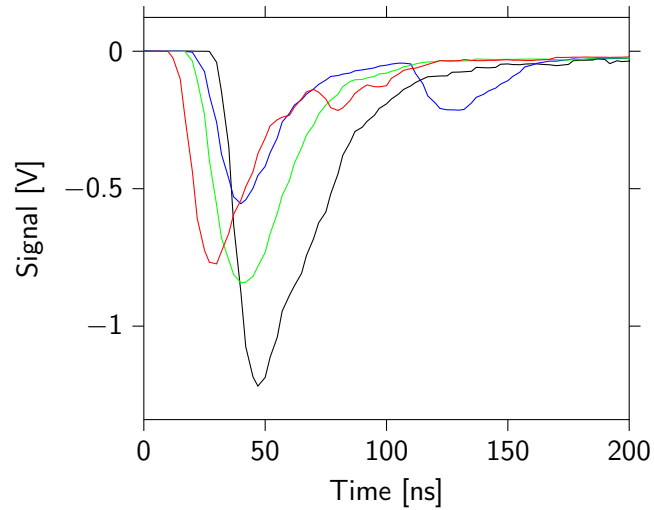
4.1 Reconstructie van shower richting

Je ziet in Figuur 4.3, dat de detectoren op verschillende tijdstippen hun puls beginnen. De zwarte grafiek in Figuur 4.3 heeft de laatste Arrival time. De Arrival time wordt bepaald zoals in Figuur 4.3 wordt getoond. De flank van de pulse moet over een bepaalde drempelwaarde heen gaan, dan wordt die tijd waarop dat gebeurt opgeslagen als Arrival time voor die puls. Nu we voor één event de Arrival times hebben bepaald kunnen we met goniometrische beschouwingen, de richting vanwaar deze shower kwam, uitrekenen. Hoe dit precies in zijn werk gaat is na te lezen in het infopakket van HiSPARC, in het bestand ‘richting reconstructie’ op het webadres: <http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/informatie-pakket/> Als leerlingen een richting-reconstructie willen doen dan kunnen ze dat oefenen met het werkblad ‘richting primair deeltje’ van het RouteNet materiaal op de website: <http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/routenetpad/>.

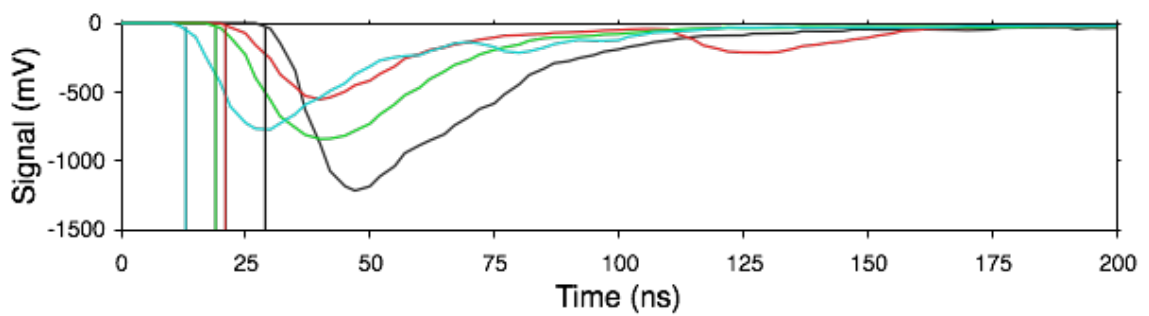
4.2 Reconstructie van energie

In Figuur 4.4 zie je de pulsen van twee detectoren (dit is dus een twee detector station of een vier detector station, waarbij twee detectoren ‘getriggerd’ zijn). De maximale waarde van de pulsen

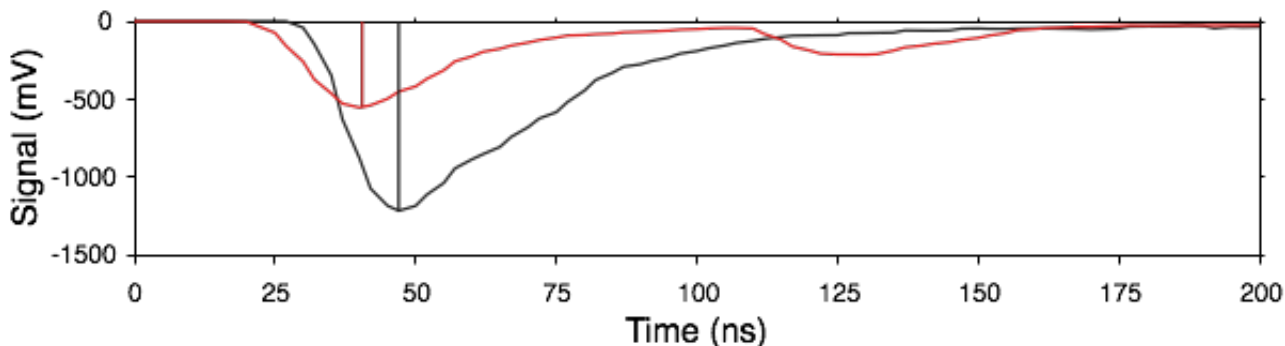
²Meer over de terminologie van kosmische showers vind je in het bestand ‘Terminologie’ van het infopakket



Figuur 4.2 – Één event gemeten door een station met vier detectoren, elke detector registreert een signaal (pulse) die op een eigen tijdstip begint (Arrival Time) en een eigen hoogte heeft (Pulse height).



Figuur 4.3 – Als de flank van de pulse over een bepaalde ingestelde drempelwaarde gaat, dan wordt dat tijdstip voor die pulse als Arrival time opgeslagen. Voor de cyaan kleurige puls komen we zo op een Arrival time van 12,5 ns. De Arrival times zijn altijd deelbaar door 2,5 ns, dit komt door de ADC converter in het HiSPARC kastje. Meer uitleg hierover in het bestand 'Uitlijnen van de ADC's' in het HiSPARC infopakket.



Figuur 4.4 – Pulseheights van twee detectoren aangegeven.

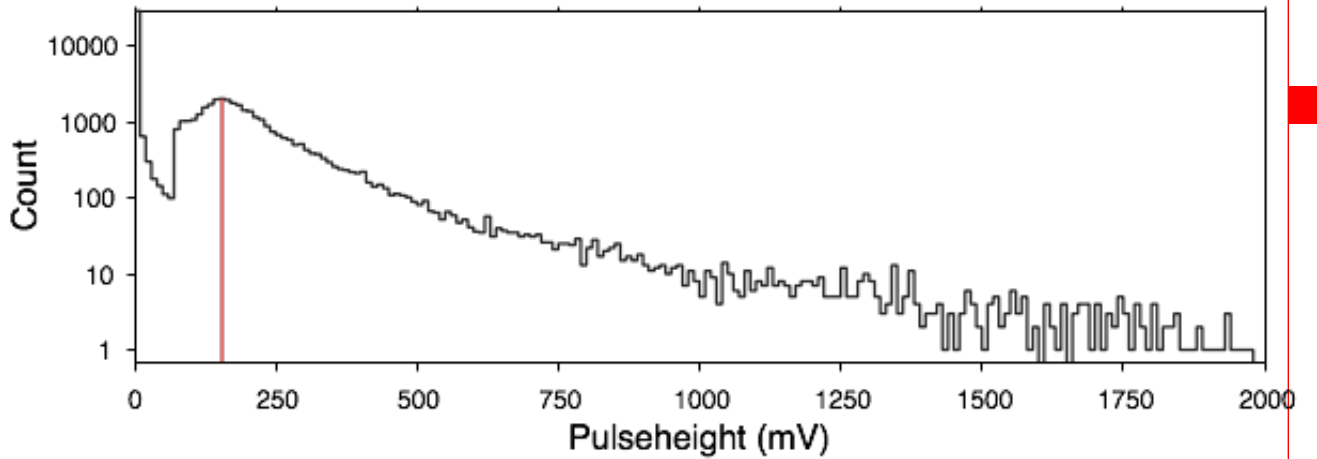
is daar aangegeven met een verticale lijn. De waarde van de potentiaal die bij dit punt hoort, wordt de ‘pulseheight’ of in het Nederlands ‘pulshoogte’ genoemd. Als we van alle events, die we op een dag meten met een station, alle gemeten ‘pulseheights’ plotten in een histogram dan krijgen we het plaatje zoals te zien is in Figuur 4.5. Daarin zetten we het aantal keer dat een bepaalde pulshoogte voorkomt uit tegen de spanningswaarde van de pulshoogte. De laagste piek van de pulshoogte komt het vaakst voor en deze waarde geeft dus een maat voor de detectie van precies één deeltje in een detector. Stel dus dat de waarde van de pulshoogte -180 mV heel vaak voorkomt op een dag. Dan zul je in het pulshoogte histogram een piek krijgen bij 180 mV (we nemen nu het potentiaalverschil positief), dit is dan de waarde die hoort bij één deeltje wat gedetecteerd is. Meet je bij een ander event in een detector een puls van -540 mV, dan zouden er 3 deeltjes zijn gedetecteerd zijn door deze detector. De piek in het pulshoogte histogram noemen we de MIP (Minimum Ionizing Particle) dat is waarde van de rode lijn in Figuur 4.5 (in dit geval ongeveer 180 mV). Deze waarde wordt voor elke set data per detector elke keer opnieuw bepaald en gebruikt als ijkmiddel om het aantal deeltjes te berekenen wat in één event is gedetecteerd. De waarde van de MIP varieert per detector en per meetperiode, omdat de MIP waarde afhankelijk is van temperatuur, spanning over de fotobuis, dikte van de scintillator, montage van de detector en leeftijd van de detector.

Nu we met behulp van de MIP³ piek van elke detector kunnen bepalen wat het aantal deeltjes in een detector per event is. Als het aantal deeltjes per detector bekend is kunnen we de energie van het primaire deeltje wat de shower veroorzaakt reconstrueren. Omdat we denken te weten hoe de shower zich ontwikkelt in de atmosfeer, kunnen we met onze metingen van het aantal deeltjes op de grond aan de hand van (4.1) een energie van het primaire deeltje reconstrueren.

Als we een coïncidentie hebben, waarbij meerdere stations dus dezelfde shower gemeten hebben, kunnen we het aantal gemeten deeltjes per detector plotten zoals in Figuur 4.6. Om nu achter de energie van de kosmische shower te komen moeten we de deeltjes dichtheid fitten aan formule (4.1). Waarin N_e het aantal deeltjes is van de shower (shower size), s de age parameter en r_0 is een aangepaste Molière straal. De waarden van de constanten zijn: $\alpha = 1.5$, $\beta = 3.6$, $r_0 = 40$ m en $s = 0.94$ ⁴. Als je meer informatie wilt over de ontwikkeling van een shower, kun je dat lezen in

³Meer over de MIP piek vind je in het bestand ‘inregelen PMT’s’ van het HiSPARC infopakket

⁴het uitleggen de constanten in de formule is erg lastig en vereist een gedegen kennis van de wiskundige ontwikke-



Figuur 4.5 – Een pulshoogte histogram, in dit diagram zijn de pulseheights van veel gemeten events door één detector uitgezet. De piek is de pulshoogte, die hoort bij de detectie van één deeltje. Dit is de MIP piek. In dit geval is de MIP ± 180 mV. De MIP piek wordt gebruikt om de deeltjes dichtheid in de detector voor alle geregistreerde events uit te rekenen.

het bestand ‘cosmic air showers’ in het HiSPARC infopakket (lees dan over het Heitler-model).

De deeltjes lawine wordt gemeten op het aardoppervlak. Midden in het oppervlak dat geraakt wordt, bevindt zich de kern van de deeltjeslawine, zie Figuur 4.6. De deeltjesdichtheid is hier het grootst. Naarmate we verder van de kern komen, daalt de deeltjesdichtheid. De laterale distributie functie beschrijft de verdeling van de deeltjes, die op een oppervlak vallen. Als de laterale distributie functie bekend is, dan kunnen we de plaats van de kern van de deeltjes lawine bepalen uit minimaal drie metingen van de deeltjesdichtheid. Het aantal deeltjes in de lawine is daarmee ook te bepalen, en dit is een maat voor de energie van het primaire deeltjes.

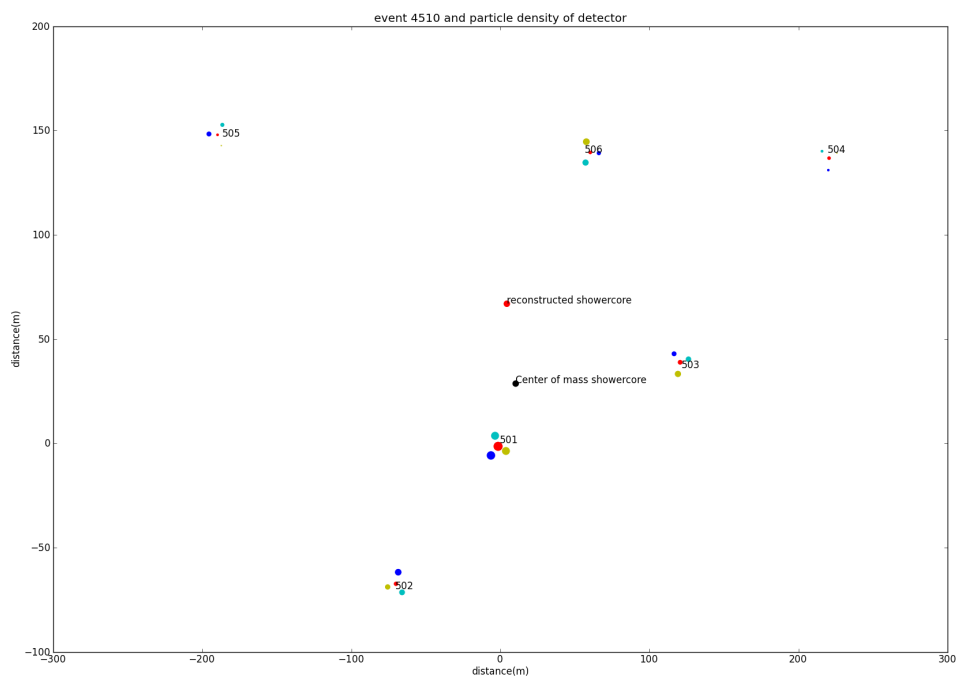
$$\rho(r) = N_e \cdot \hat{c}(s) \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{s-\alpha} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s-\beta} \quad (4.1)$$

met

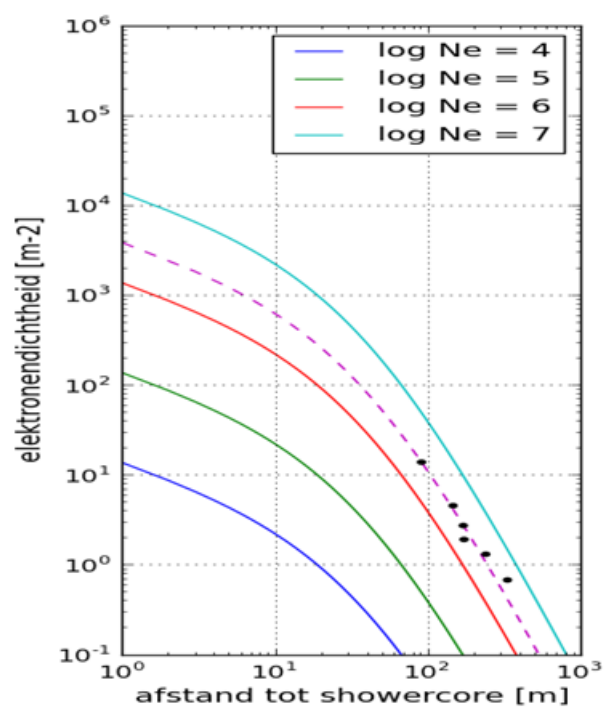
$$\hat{c}(s) = \frac{\Gamma(\beta - s)}{2\pi r_0^2 \Gamma(s - \alpha + 2) \Gamma(\alpha + \beta - 2s - 2)} \quad (4.2)$$

(4.2) waarin Γ de gamma functie is.

ling van de showers, maar als de parameter s is 1, dan is het aantal deeltjes in de deeltjeslawine maximaal.



Figuur 4.6 – Een geregistreerd event. De nummers van de stations van het Sciencepark cluster zijn aangegeven. Van elk station is de deeltjesdichtheid van de detectoren weergegeven door de grootte van de cirkels. Een grote cirkel komt dus overeen met een grote deeltjesdichtheid per detector. Als startwaarde voor de fit aan een LDF functie om de positie van een showercore te vinden, kan de ‘center of mass’ methode gebruikt worden. Deze methode berekent het gewogen gemiddelde van de gemeten deeltjesdichtheid en de afstand tot de stations. In dit figuur is ook een gereconstrueerde showercore te zien.



Figuur 4.7 – Een event is gefit aan de LDF (4.1). De lijnen geven LDF's van respectievelijk showergrootten van 10^4 a tot 10^7 aan. Het gereconstrueerde event (stippellijn) van 6 stations (gemiddelde deeltjesdichtheid per station) heeft een showersize tussen 10^6 en 10^7 deeltjes.