

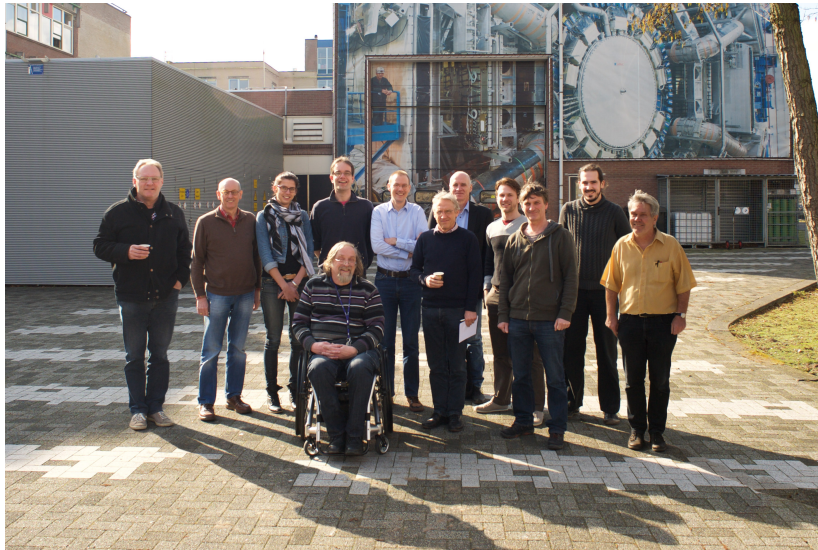
Leraar in Onderzoek 2015-2016

Hoogenergetische Kosmische Straling

eindredactie J.J.M. Steijger

*Nationaal Instituut voor subatomaire fysica (Nikhef),
Postbus 41882, NL-1009 DB Amsterdam, Nederland.*

29 juni 2017



vlr achterste rij: Hans Montanus, Jan-Willem van Holten, Sabine Beijen, Tom Kooij, David Fokkema, Niek Schultheiss, Gideon Koekoek en Arne de Laat.

voorstte rij: Jos Steijger, Bob van Eijk, Gerrit de Vries en Reno Beekman.

Inhoudsopgave

1	Introductie Leraar in Onderzoek	5	3.5	Resultaten	23
2	Extensive airshowers en bliksem: een verband?	7	3.5.1	Resultaten footprint methode .	23
2.1	Inleiding	7	3.5.2	Resultaten overlap-methode . .	31
2.1.1	Bliksem	7	3.5.3	Gebruik van een vierplaatstation en een tweeplaatstation	31
2.1.2	Extensive cosmic Air Shower (EAS)	8	3.6	Discussie en conclusies	32
2.1.3	Onderzoeksvraagstelling	10	4	Het verband tussen de afstand tussen meetstations en de zenithhoekverdeling van coïncidenties van showers in HiSPARC	37
2.1.4	Eerdere LiO-studies mbt Kosmische straling en bliksem	10	4.1	Samenvatting	37
2.2	Gebruikte meetgegevens: HiSPARC en KNMI	10	4.2	Inleiding	37
2.3	Combineren van meetgegevens tot coïncidenties	11	4.3	Driehoeken	38
2.3.1	Eerste selectie van EAS-en . . .	11	4.4	Model	38
2.3.2	UTC en GPS-tijd	11	4.5	Onderzoeksvraag	39
2.3.3	Coïncidenties in tijd en plaats .	11	4.6	Hypothese	39
2.4	Resultaten: gevonden coïncidenties nader bekeken	12	4.7	Welke driehoeken van meetstations zijn geschikt voor analyse?	39
2.5	Conclusie en discussie	13	4.8	Zijn de gemeten aankomsttijdverschillen geschikt voor nauwkeurige richtingsreconstructie?	39
3	Het HiSPARC-netwerk: Geschied voor de zoektocht naar UHE-CR's?	15	4.9	Detector tijd offset	40
3.1	Abstract	15	4.10	Station (GPS) tijd offset	40
3.2	Inleiding	15	4.11	Wat is het verband tussen constante C uit model vgl. 4.5 en de afstand tussen meetstations in driehoeken van het HiSPARC netwerk?	42
3.3	Achtergrond	16	4.12	Conclusie	43
3.3.1	HiSPARC-netwerk	16	4.13	Aanbevelingen	43
3.3.2	Op zoek naar (de gevolgen van) UHECR's	16	5	Een onderzoek naar de invloed van gebouwmassa op de detectie van kosmische straling	45
3.4	Methoden	17	5.1	Abstract	45
3.4.1	De footprint-methode	18	5.2	Inleiding	45
3.4.2	De overlap-methode	19	5.3	Onderzoeksvraag	48
3.4.3	Gebruik van een vierplaatstation en een tweeplaatstation	20	5.4	Werkwijze	49
3.4.4	Downloaden en analyseren van data	20	5.5	Resultaten en bespreking	52
3.4.5	Schatting van de verwachte hoeveelheid toevallige coïncidenties	21	5.6	Conclusies en aanbevelingen	55
3.4.6	Het schatten van de primaire energie	22	5.7	Bijlage	59
			6	De acceptantie van het HiSPARC experiment	71
			6.1	Acceptantie afhankelijk van de netwerk geometrie	72

6.2	De geometrie van het experiment . . .	72
6.3	Stations met twee detectoren	73
7	Conclusie	75

1 Introductie Leraar in Onderzoek

De STEM¹ Teacher Academy probeert de samenwerking tussen onderwijs en bedrijfsleven te versterken. Eén van de middelen om dit doel te bereiken is het LiO project *Leraar in Onderzoek* dat wordt uitgevoerd door de NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek) en de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM). Dit programma stelt leraren natuurkunde in de gelegenheid om een jaar lang, één dag in de week, onderzoek uit te voeren bij een aan FOM gelieerde wetenschappelijke instelling. Op deze wijze komen docenten uit het voorgezet middelbaar onderwijs een jaar lang in nauw contact met de academies, nemen nader kennis van de huidige wetenschappelijke wijze van werken, en ontwikkelen hun eigen onderzoeks vaardigheden. De kwaliteit van het onderwijs wordt vooral bepaald door de kwaliteit van de leraren. Zij zullen hierdoor waarschijnlijk enthousiasme voor een universitaire studie natuurkunde aan scholieren weten over te brengen. Studenten aan wie het bedrijfsleven zo'n behoefte heeft.

Nikhef stelt in dit project jaarlijks ruimte en begeleiding voor 5 à 6 leraren beschikbaar. Dit programma voorziet in een behoefte zoals blijkt uit het feit dat het aantal sollicitaties voor een LIO positie elk jaar weer het aantal beschikbare plaatsen overtreft. Er is ook ieder jaar weer een positieve evaluatie van de deelnemende docenten.

In het Nikhef is al sinds 2004 een *outreach* project actief onder de naam HiSPARC (High School Project on Astrophysics Research with Cosmics). Dit project

heeft als doel dat middelbare scholen samen met wetenschappelijke instellingen een netwerk vormen om kosmische straling met extreem hoge energie te kunnen meten. HiSPARC biedt daarom scholieren de gelegenheid om deel te nemen aan echt wetenschappelijk onderzoek, waarvan de resultaten daadwerkelijk worden gebruikt om meer over deze mysterieuze en zeldzame kosmische deeltjes te weten te komen. Bovendien kunnen scholieren hun deelname aan het experiment gebruiken ter invulling van het profielwerkstuk voor het eindexamen. Om deze reden combineert Nikhef deze twee projecten, en biedt de leraren de gelegenheid om hun onderzoek te doen met de HiSPARC data.

Tijdens het academische jaar 2015/2016 hebben vijf docenten onderzoek uitgevoerd op dit gebied van de subatomaire natuurkunde. Reno Beekman, Sabine Beijen, Gideon Koekoek, Tom Kooij en Gerrit de Vries zijn werkzaam geweest bij Nikhef in Amsterdam. In HiSPARC wordt door op meer dan 120 scholen een voor die scholen passende detector te installeren, een groot netwerk gecreëerd dat voor wetenschappelijke instituten en het LiO project interessant is. Leerlingen maken met behulp van *hun* detector kennis met wetenschappelijk onderzoek Dit resulteerde al in tientallen profielwerkstukken. Bij het hoger onderwijs werden in dit kader door studenten diverse bachelor en master theses geschreven. Ook heeft de eerste promotie met dit experiment plaats gevonden en zal spoedig de tweede volgen. In het LIO programma maken de HAVO/VWO docenten kennis met deze academische kant van het HiSPARC experiment.

¹Science, Technology, Engineering and Mathematics.

In de volgende hoofdstukken doen de vijf leraren verslag van hun eigen wetenschappelijk onderzoek. Naast dit onderzoek hebben de docenten ook bijdragen geleverd aan de ontwikkeling van lesmateriaal voor het voortgezet onderwijs in het kader van dit project.

Tenslotte beschrijft Niek Schultheiss zijn activiteiten om de interessante fysika en onderzoeks methoden en -middelen die in het HiSPARC project aan bod komen naar de klas toe te brengen.

Begeleiding: Bob van Eijk, Jan-Willem van Holten, Arne de Laat, Niek Schultheiss en Jos Steijger².

²Dit document (en de rapporten uit 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 en 2014/2015) zijn ook elektronisch beschikbaar via de HiSPARC website www.hisparc.nl)

2 Extensive airshowers en bliksem: een verband?

Reno Beekman



Reno Beekman is als eerstegraadsdocent natuurkunde verbonden aan het Gemeentelijk Gymnasium Hilversum. Hij heeft aan de Rijksuniversiteit Leiden (1975) zijn doctoraal experimentele natuurkunde behaald. Na zijn studie natuurkunde heeft hij aan de RUL in 1984 zijn doctoraal geneeskunde afgelegd, waarna hij (1989) is gepromoveerd op de vrije-calcium concentratie in hartspiercellen. Hij heeft (1993) de opleiding tot klinisch fysicus radiotherapie afgerond en is in aansluiting daarop als universitair docent Medische Informatiekunde verbonden geweest aan de UvA op het AMC. Hij is vanaf 1996 als klinisch fysicus werkzaam geweest bij het Arnhems Radiotherapeutisch Instituut. Sinds

2007 geeft hij daarnaast les in NLT en natuurkunde aan het Gemeentelijk Gymnasium Hilversum.

2.1 Inleiding

In het gangbare fysische model voor het ontstaan van bliksem zijn zowel het aantal vrije ladingsdragers als de elektrische veldsterkte in de atmosfeer ontoereikend om een ontlading te kunnen starten. Extensive Air Showers geïnitieerd door cosmic rays (EAS) worden gezien als mogelijke leverancier voor het tekort aan vrije ladingsdragers in de atmosfeer. Om in het tekort aan vrije ladingsdragers te kunnen voorzien moet de EAS als leverancier van vrije ladingsdragers direct aan de bliksem voorafgaan. Het is overigens omgekeerd ook denkbaar dat bliksem een EAS beïnvloedt. Daarvoor moet de EAS juist direct op de bliksem volgen.

2.1.1 Bliksem

Bliksem ontwikkelt zich in fases: door het opbouwen van elektrische spanning in een wolk, vervolgens groeit een geleidende bliksemboom (streamers) en dan vindt er langs de *stepped leader* kortsluiting plaats met sterke stromen en fel licht in het hete plasma, de bliksem die wij zien: de returnstroke. Donder is het gevolg van variaties in druk door de thermische uitzetting van datzelfde kanaal. De onderzijde van een onweerswolk is meestal positief geladen ten opzichte van het aardoppervlak en wat hoger in de wolk is negatief geladen.

Met name de 2^e fase van de kortsluiting is nog niet goed begrepen. De doorslagspanning van lucht is ruwweg 30 kV/cm bij de hoogtes waarop bliksem ontstaat. Bij die spanning ontstaan er door ionisaties meer elektronen dan er worden ingevangen door

luchtmoleculen.

- De met ballonnen gemeten wolkenpotentialen van 100MV op 10km zijn daarvoor veel te laag. Dat is 100V/cm vergeleken met de minimaal vereiste 30kV/cm. Voor het verklaren van het bestaan van bliksem wordt gedacht aan ijskristallen die afhankelijk van hun vorm veldversterking kunnen leveren. Bestudering van dit voor bliksem benodigde elektrische veld ligt buiten het bestek van de onderzoeksvraag.

- Maar ook het aantal vrije ladingdragers is te laag voor het starten van een ontlading. Vrije negatieve ionen fungeren als condensatiekernen voor waterdamp en vormen waterclusters die niet makkelijk elektronen afgeven. Ook de achtergrondstraling van de zon die op wolkenhoogte vrije elektronen kan genereren, genereert onvoldoende daarvan. Voor het verklaren van het bestaan van bliksem wordt gedacht aan EAS-en. Het aantal vrije ladingdragers dat wordt gegenereerd in een EAS van deeltjes die het gevolg is van een inkomend kosmisch deeltje is wel voldoende groot om het starten van een ontlading mogelijk te maken, althans in een voldoende sterk elektrisch veld.

2.1.2 Extensive cosmic Air Shower (EAS)

Dat een geïsoleerde elektroscop of een ionisatiekamer schijnbaar spontaan ontaardt was bekend. De oorzaak werd gezocht in straling uit de aarde. Balloonexperimenten van Hess in 1912 en later gaven een steeds snellere ontlading aan voorbij een hoogte van 1 km. Gedacht werd, ondermeer door Millikan, aan gammastralen vanwege hun sterk doordringend vermogen. Vandaar de naam kosmische straling.

Het idee dat het juist voornamelijk gaat om geladen deeltjes die de aardatmosfeer binnenkomen, kwam voort uit metingen op verschillende breedtegraden en het effect van het aardmagnetisch veld op geladen deeltjes. Men dacht aan elektronen. De hogere intensiteit gemeten vanuit het westen vergeleken met die vanuit het oosten wees op positieve deeltjes en de meest waarschijnlijke kandidaat leek het onlangs ontdekte positron. In 1939 werd door Schein et al. met ballonexperimenten vastgesteld dat de inkomende kosmische deeltjes voor het grootste deel protonen zijn. Later zijn naast protonen ook atoomkernen tot

en met die van ijzer aangetroffen, waarbij de kernen van Li, Be en B oververtegenwoordigd zijn in vergelijking met hun voorkomen in het heelal.

Een EAS is de deeltjesregen die het gevolg is van een hoogerenergetisch kosmisch deeltje dat de aardatmosfeer binnendringt en daar met een atoomkern botst. Het betreft meest (84%) protonen. Loodrecht op de bewegingsrichting heeft de daaropvolgende deeltjesregen de vorm van een pannenkoek. De EAS beweegt met een snelheid dicht tegen de lichtsnelheid aan.

De energie van het inkomende kosmisch deeltje waarvan de EAS relevant zou kunnen zijn voor onweer én waarvan de EAS met HiSPARC is te detecteren, ligt tussen de 10^{14} en 10^{15} eV. Inkomende deeltjes met een energie lager dan 10^{14} eV kunnen met HiSPARC niet worden waargenomen [1] (pag 23). Inkomende deeltjes met een energie hoger dan 10^{15} eV komen niet frequent genoeg voor om bij bliksem een rol te kunnen spelen. Dat zijn er bij 10^{15} eV al 10^3 minder dan bij 10^{14} eV.

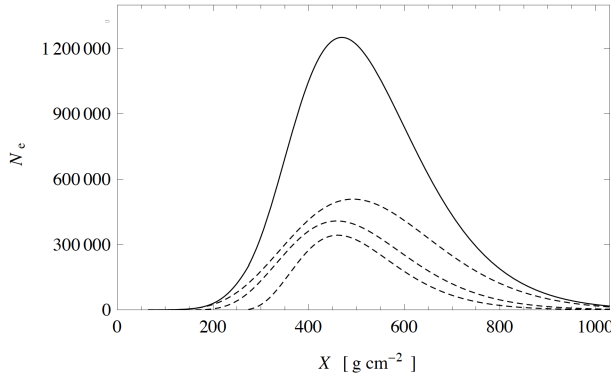
Het maximale aantal elektronen en positronen dat bij een EAS uit een inkomend proton wordt gevormd is volgens een aangepast Heitler-Matthews model [2]:

$$N_e \approx 0.57 \cdot E_0^{1.019} (E_0 \text{ in GeV}) \quad (2.1)$$

Figuur 2.1 toont het longitudinale profiel van de elektromagnetische shower van een inkomend proton met een energie van $1.4 \cdot 10^{15}$ eV. Met maximaal 10^6 elektronen en positronen bij een diepte in de atmosfeer van $X_{\max} = 470 \text{g/cm}^2$. Deze atmosferische diepte komt overeen met een hoogte van ongeveer 6,6 km [2].

Behalve het longitudinale profiel van het aantal geladen deeltjes van de EAS, is het laterale profiel van de EAS van belang om dichtheid van deze deeltjes op de hoogte van de bliksem te kunnen inschatten. Figuur 2.2 toont het laterale profiel van de elektromagnetische shower, op zeeniveau, van een inkomend proton met een energie van 10^{15} eV [1].

Met het longitudinale en de transversale elektromagnetische profiel van een EAS is de dichtheid van vrije ladingdragers ter plekke van de kortsluiting waarmee de bliksemontlading start, te schatten. Een EAS heeft geen scherpe grens, maar we kunnen de EAS als een kegel voorstellen. Wanneer we als straal van de

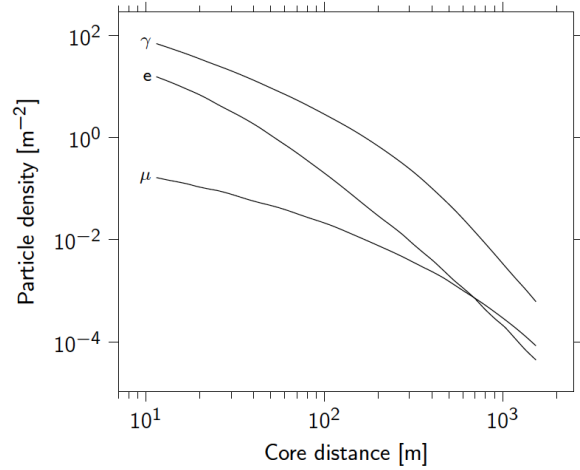


Figuur 2.1: Het longitudinale elektromagnetische profiel (doorgetrokken lijn) van een EAS en zijn samenstellende subshowers (stippellijnen) voor een inkomend proton met 1.41015eV . X is de atmosferische diepte.

kegel op zeeniveau 100m nemen, is het grondoppervlak van de EAS voor een loodrecht inkomend deeltje $3,1 \cdot 10^4\text{m}^2$. De diepte waarop het inkomend proton voor het eerst een interactie aangaat is afhankelijk van de energie. Bij een inkomend proton met een energie van $1,4 \cdot 10^{15}\text{eV}$ is de diepte $65\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Dit komt overeen met een hoogte van 23,2km. Ook de diepte waarop het aantal ontstane hoogenergetische elektronen/positronen maximaal is (X_{max}) hangt af van de energie van het inkomend proton. Bij een inkomend proton met een energie van $1,4 \cdot 10^{15}\text{eV}$ is X_{max} $470\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Dit komt overeen met een hoogte van 6,6km. Het oppervlak van de doorsnede van de EAS op 6,6 km wordt geschat $2 \cdot 10^4\text{m}^2$.

Gemiddeld is de dichtheid aan hoogenergetische elektronen op die hoogte dan $10^6/2 \cdot 10^8\text{cm}^2 = 0,005/\text{cm}^2$. Aangezien het aantal te vormen ionparen op zeeniveau $12,4/\text{cm}^3$ is, is dat op 6,6km hoogte de helft: $6/\text{cm}^3$ [3].

Het aantal laagenergetische vrije elektronen in een EAS, als gevolg van een inkomend proton met een energie van $1,4 \cdot 10^{15}\text{eV}$, wordt daarmee gemiddeld $0,03/\text{cm}^3$ op 6,6km hoog. In de core zal het aantal laagenergetische vrije elektronen aanzienlijk hoger liggen. Dat is in het transversale profiel in figuur 2.2 voor het zeeniveau zichtbaar.



Figuur 2.2: Het transversale profiel van een EAS op zeeniveau voor een inkomend proton met 10^{15}eV .

In simulaties met CORSIKA bij een inkomend proton met een energie van 10^{16}eV vinden we op 5,5km hoogte $28 \cdot 10^6$ deeltjes, waarvan $5,4 \cdot 10^6$ elektronen en positronen zijn, met een gemiddelde energie van $1,9 \cdot 10^9\text{eV}$. Op 5,5km hoog zit daarvan 99% in een diameter van $53 \cdot 10^3\text{m}$. Binnen een diameter van 1m op 5,5km hoogte bevinden zich $246 \cdot 10^3$ deeltjes, waarvan $46 \cdot 10^3$ geladen zijn. Dat betekent voor een plakje van 1 cm hoog, waarvan de inhoud $7,8 \cdot 10^3\text{cm}^3$ is, en waarbij op die hoogte 5,6 ionparen per deeltje worden gegenereerd, 12,4 bij ntp [3]: dat er 32 laagenergetische elektronen per cm^3 worden gegenereerd. Bij $5 \cdot 10^{16}\text{eV}$ zijn de dichtheden ongeveer vijf keer zo groot, dus ongeveer 150 laagenergetische elektronen per cm^3 op 5,5km hoogte binnen een diameter van 1m. Bij $5 \cdot 10^{15}\text{eV}$ zijn de dichtheden ongeveer twee keer zo klein, dus worden er ongeveer 16 laagenergetische elektronen per cm^3 op 5,5km hoogte binnen een diameter van 1m.

Deze dichtheden van $16 - 150/\text{cm}^3$ passen bij de aannames die worden gedaan bij het mogelijk maken van bliksemontlading in aanwezigheid van grote ijskristallen en EAS-en [4]. Daar wordt aangenomen dat er bij showers, veroorzaakt door protonen met energieën tussen $5 \cdot 10^{15}\text{eV}$ en $5 \cdot 10^{16}\text{eV}$, in de core maximaal $100/\text{cm}^3$ laagenergetische elektronen aanwezig zijn.

2.1.3 Onderzoeksvraagstelling

Vanuit de hypothese dat EAS-en inderdaad de leveranciers zijn van de benodigde vrije ladingsdragers bij het starten van de ontlading die het begin vormt van de bliksem, is de vraagstelling van dit onderzoek geformuleerd:

Is er een relatie tussen het vóórkomen van een shower en een bliksemontlading in het gebied van de shower, door te onderzoeken of er een plaatsrelatie en een tijdsrelatie is tussen shower en bliksem?

2.1.4 Eerdere LiO-studies mbt Kosmische straling en bliksem

- 2010/2011 Remon Kniest (Kennemer College Beverwijk): Reageren de detectoren op bliksemontladingen? Naar aanleiding van de opvallende toename van het aantal events per uur (count rate) bij een onweersbui bij Eindhoven op 14 juli 2010.
- 2011/2012 Paul Neuraj (St-Joris College Eindhoven): Plaatsbepaling en tijdsbepaling met Boltek-LD250 detectoren ter vervanging van de ontoereikend geachte gegevens van het KNMI.
- 2012/2013 Matthijs van Vulpen (Joke Smit School Amsterdam) Nadere bestudering KNMI-gegevens naast Boltek-LD250 detectoren bij de HiSPARC-installaties.

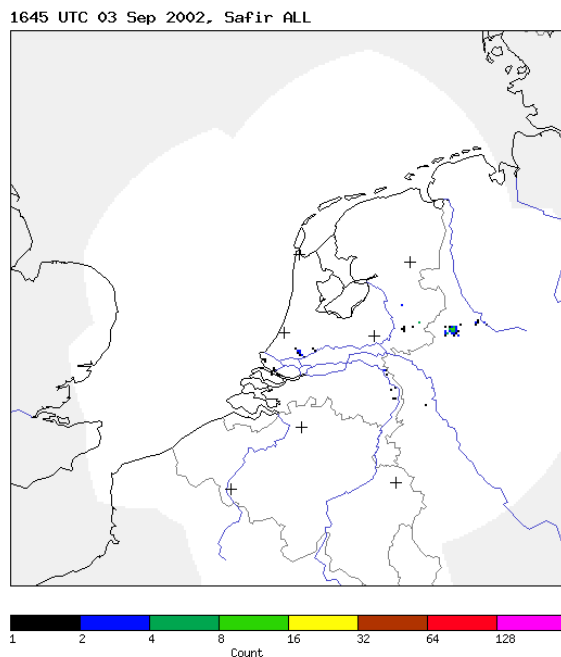
2.2 Gebruikte meetgegevens: HiSPARC en KNMI

Voor het onderzoeken van de vraag of er een plaats- en tijdsrelatie is tussen EAS en bliksem, hebben we gebruik gemaakt van HiSPARC-gegevens over EAS en van KNMI-gegevens over bliksems, beide vanaf 2004. Vanwege de vereiste uniformiteit in de registratie van de tijd in de HiSPARC-metingen hebben we ons beperkt tot de periode 2010-2015 en tot grond-wolk bliksems.

De ons ter beschikking staande meetgegevens van het KNMI over bliksem, gemeten met FLITS, vier antennes in Nederland en drie antennes in België beslaan

de periode 2004-2015. Zie figuur 3 [5]. De voor onze onderzoeksvraag belangrijkste gegevens zijn:

- Bliksemlokaties met aangegeven positienauwkeurigheid van 2-4 km, door middel van kruispeiling.
- Bliksemtype: grond-grond, wolk-wolk, grond-wolk.
- Tijdstip van de bliksem met een nauwkeurigheid van 0,1ms.



Figuur 2.3: De posities van de antennes van het KNMI. Wanneer er bliksems zijn geregistreerd, wordt de intensiteit van de bliksem met kleurcodering aangegeven.

De meetgegevens van HiSPARC over EAS-en in de periode 2004-2015 zijn gemeten zoals elders beschreven [1] (hoofdstuk 2): De voor onze onderzoeksvraag belangrijkste gegevens zijn:

- EAS-lokaties op basis van GPS-lokatie van het station dat de shower waarneemt

- Tijdstip vd EAS met een nauwkeurigheid van 1ns.

2.3 Combineren van meetgegevens tot coïncidenties

Voor het vinden van coïncidenties tussen bliksem en extensive airshowers is gebruik gemaakt van gegevens uit het bliksembestand van het KNMI en de EAS-registraties van HiSPARC tussen 2004 en 2015. In plaats van werken op het totale bestand van HiSPARC-registraties zijn de EAS-en tussen 60s voor en 60s na de grond-wolkbliksems uit dat HiSPARC-bestand geselecteerd. De andere types door het KNMI geregistreerde bliksems zijn buiten beschouwing gelaten.

Overigens zijn niet alle EAS-en uit heel nederland geselecteerd, maar uitsluitend die EAS-en die zijn gemeten door op dat moment operationele HiSPARCstations op maximaal 10km afstand van de positie van de bliksem, zoals aangegeven door het KNMI. Vanwege de positie-onnauwkeurigheid van maximaal 5km in de positie van de bliksem is voor 10km gekozen.

2.3.1 Eerste selectie van EAS-en

Van de volledige KNMI bliksem gegevens, die zijn opgeslagen in een .h5 bestandsformaat, *Lightning-data* tussen 2004 en 2015, zijn eerst de grond-wolk bliksems (type 4) geselecteerd. De overige bliksemtypes zoals grond-grond en wolk-wolk niet. Vervolgens zijn daaruit de 10354 bliksems geselecteerd die op minder dan 10km afstand van een werkend HiSPARC-station insloegen (dat wil zeggen een station met meetgegevens op het moment dat de bliksem insloeg).

Met het pythonprogramma *script0416.py* zijn deze 10354 geselecteerde grond-wolk bliksems opgeslagen met onder andere hun tijdstip, positie en positie-nauwkeurigheid in het werkbestand *lightning.csv*. Zie ter illustratie van welke gegevens dat betreft tabel 2.1. NB voor nadere analyse is daarna de afstand tot een werkend HiSPARC-station vergroot van 10km tot 50km, hetgeen 75119 type 4 grond-wolk bliksems oplevert.

Voor alle geselecteerde 10354 bliksems in het werkbestand *lightning_10km.csv*, zijn vervolgens de HiSPARC

EAS-en uit de werkende stations binnen 10km van de bliksempositie en met ruime tijdsmarge, 60s voor en 60s na de bliksem, uit het HiSPARC SAPHIRE bestand binnengehaald met het pythonprogramma *read-csv&writeh5.py* en in het bestand *lightning0416-10000.h5* geplaatst.

2.3.2 UTC en GPS-tijd

Om de coïncidentie van bliksem en EAS wat preciezer te kunnen bestuderen, zijn daarna precieze tijden, timestamps, in s en ns toegevoegd aan de geselecteerde EAS-en met het pythonprogramma *write_timestamps_to_h5.py*. KNMI bliksem-tijd en HiSPARC EAS-tijd blijken niet op dezelfde manier opgeslagen. KNMI gebruikt UTC en HiSPARC heeft aanvankelijk ook UTC gebruikt, maar is geleidelijk overgestapt naar GPS-tijd. Deze twee tijdsystemen verschillen in secondes die ter correctie periodiek aan UTC worden toegekend. Bij GPS loopt de tijd zonder onderbreking door. In de overgangperiode zijn de HiSPARC-tijden feitelijk niet goed bekend omdat de datum van overschakelen per station op verschillende momenten is gebeurd. Er is voor gekozen om de tijden van de bliksems en de EAS-en op elkaar af te stemmen door de bliksemtijden gedeeltelijk met *correct_lightning_timestamps.py* aan te passen. Vóór 1-1-2006 met -13s; van 01-01-2006 tot 01-01-2009 met -14s; van 01-01-2009 tot 01-06-2011 met -15s. Na 01-06-2011 zijn HiSPARCtijden correct GPS.-tijd. Het bestand dat het pythonprogramma *correct_lightning_timestamps.py* produceert heet *lightning_10km*. Dat bestand is hernoemd tot *lightning_10km_120sec.h5*, het bronbestand van de EAS-en 60s voor en na een grond-wolk bliksem op minder dan 10km van een werkend HiSPARC-station. Maar nu met op elkaar afgestemde tijdstippen van de bliksems en de EAS-en.

2.3.3 Coïncidenties in tijd en plaats

Voor de onderzoeksvraag, is er een relatie tussen het vóórkomen van een EAS en een bliksemontlading in het gebied van de EAS, willen we weten of er een tijdsrelatie én een plaatsrelatie is. Voor de plaatsrelatie hebben we al een maximale afstand van 10km

	Tijd(s)	Tijd(ns)	Lat	Long	Error	Rise-t	Decay-t	Current	Stats	Stats	
1	1081331634	51650000	0	52.365	4.8591	430.0	5.125e-06	3.2e-05	27290.0	2	2,501

Tabel 2.1: Een regel uit het bestand *lightning_10km.csv*. Dit bestand bevat alle grond-wolk bliksems op minder dan 10km van een werkend HiSPARC station.

	Bliksemnr	Stationnr	Eventnr	Tijd(s)	Tijd(ns)	Pulshoogte	Pulsintegraal	4×MIP	4×tijd	Trigger
372	3671	21	14310	1307792968	878600720	62	7514	2.46	20.0	2142.5
						66	4398	1.55	270.0	
						-1	-1	-1.0	-1.0	
						-1	-1	-1.0	-1.0	

Tabel 2.2: Een regel uit het bestand *coincidences0416_100000.txt*. Dit bestand bevat alle EAS-en die binnen 0,2 ms voorafgaan aan (of volgen op) grond-wolk bliksems op minder dan 10km van een werkend HiSPARC station.

genomen. Voor de tijdsrelatie zoeken we EAS-en die binnen de 0,1ms nauwkeurigheid van de bliksem-tijd direct (0,2ms) voorafgaan aan (of volgen op) de grond-wolk bliksems uit het hiervoor genoemde bronbestand. Het pythonprogramma *lightningcoin.py* schrijft hiervoor de EAS-en die binnen 0,2 ms van de al geselecteerde bliksems plaatsvinden naar *coincidences0416_100000.txt*. Dat zijn de coïncidenties van bliksem en EAS-en in tijd (0,2ms) en plaats (10km) waar we naar op zoek zijn. Van de EAS-en zijn een aantal gegevens van het gemeten signaal meegenomen teneinde de geselecteerde EAS-en te kunnen beoordelen. Zie daarvoor ter illustratie tabel 2.2.

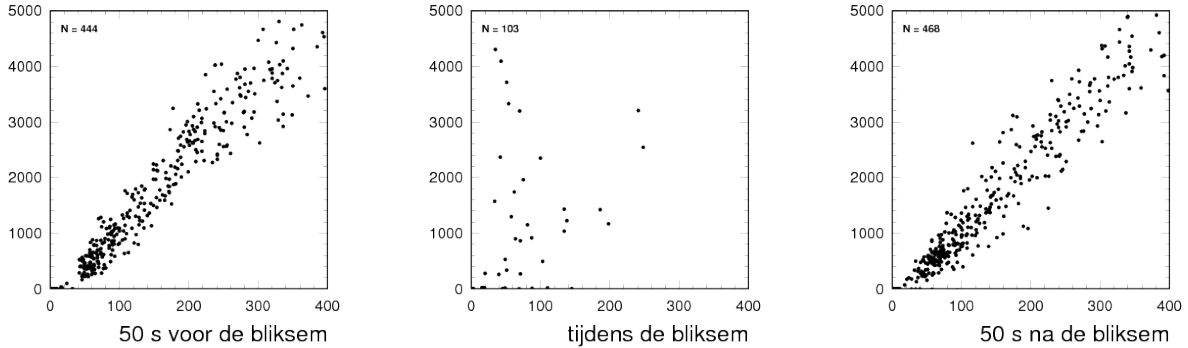
Het blijkt dat er van 2004 tot 2015 599 coïncidenties tussen bliksem en EAS-en zijn. Bij nadere controle van de EAS-en, op de kwaliteit van het signaal, blijkt dat bij een groot deel van de events geen bruikbare verhouding van pulshoogtes en pulsintegralen aanwezig is. Voor midden 2010 zijn er zelfs vrijwel geen bruikbare pulshoogtes en pulsintegralen. Daarom laten we de eerste 365 coïncidenties (tot en met ID 2898) van events met grond-wolk bliksems buiten beschouwing, dat zijn de coïncidenties van vóór 10-07-2010. Vanaf 10-07-2010 tot en met 31-

12-2015 resteren er dan 234 coïncidenties (in de file *li_sh_10km_0.0002.csv*).

2.4 Resultaten: gevonden coïncidenties nader bekeken

Nader geanalyseerd zijn de tussen 10-07-2010 en 31-12-2015 gevonden 234 coïncidenties (in de file *li_sh_10km_0.0002.csv*) van EAS-en op minder dan 10km afstand en binnen 0,2ms voorafgaand of volgende op een door het KNMI geregistreerde grond-wolkbliksem. Weliswaar bevatten de EAS-en van deze 234 coïncidenties pulshoogtes en pulsintegralen, maar de correlatie tussen de pulshoogte en de pulsintegraal ervan blijken, tegen de verwachting in, niet aanwezig. Zie figuur 2.4. Teneinde een beter idee te krijgen van de detectiemogelijkheden van EAS-en tijdens bliksem is de correlatie tussen pulshoogte en pulsintegraal op verschillende tijdsintervallen voor en na de bliksem geïnventariseerd. Pulshoogte en pulsintegraal blijken ook van 5s tot 0,05s voor de bliksem goed gecorreleerd. Zo ook van 0,05s tot 5s na bliksem.

Ook is de frequentie van de geregistreerde EAS-en bij



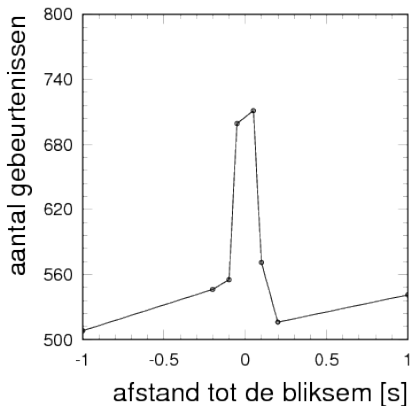
Figuur 2.4: De correlatie van de pulshoogte en de pulsintegraal blijkt aanwezig 50s voor de bliksem en 50s na de bliksem, maar afwezig *tijdens* de bliksem.

diezelfde tijdsintervallen geïnventariseerd. Tot 0,1s voor de bliksem blijft de frequentie van EAS-en stabiel en loopt die licht op to 0,05s voor de bliksem. Vanaf 0,1s na de bliksem blijft de frequentie van EAS-en stabiel en loopt die tot 0,05s na de bliksem licht op. Zie figuur 2.5. Behalve de afwezigheid van de cor-

het normeren van de pulsintegraal naar het aantal minimum ionizing particles (MIP) 50s voor en 50s na de bliksem, zoals verwacht, MIP 1.0 te zijn met rms 1.3 en tijdens de bliksem, tegen de verwachting in, MIP 2.5 te zijn met rms 2.5.

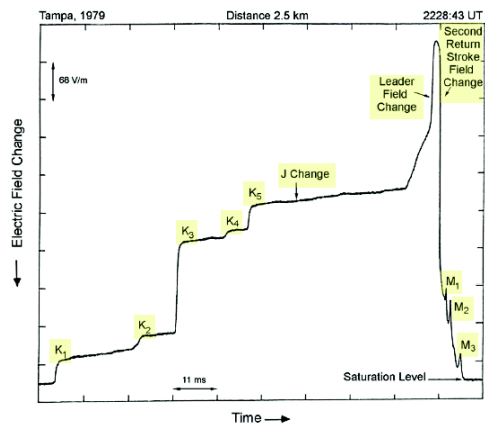
2.5 Conclusie en discussie

De ontbrekende correlatie in de signalen binnen 0,2ms voor of na de grond-wolkbliksem tussen pulshoogte en pulsintegraal, alsook het sterk verhoogde aantal minimum ionizing particles wijzen in de richting van het, tijdens een bliksem, niet betrouwbaar kunnen registreren van een EAS door de HiSPARC-detectoren. De vastgestelde, maar niet betrouwbare, coïncidenties binnen 0,2ms voor of na de grond-wolkbliksem zijn daarom waarschijnlijk te wijten aan het verstoren van de elektronica van de HiSPARC-detectoren door de bliksem. Met HiSPARC kunnen we hierdoor binnen 0,2ms geen plaats- en tijdsrelatie tussen grond-wolkbliksems en EAS-en vaststellen in de periode 2010-2015. Tot 0,1s voor en vanaf 0,1s na de bliksem vinden we echter zowel in de frequentie van EAS-en als in de correlatie tussen pulshoogte en pulsintegraal aanwijzingen dat de HiSPARC-stations wél betrouwbaar kunnen registreren. Aangezien het 100 μ s duurt, zie figuur 2.6 [6], voordat de *stepped leader* van een bliksem leidt tot de *return stroke*, zou het moge-



Figuur 2.5: De frequentie van EAS-en, als functie van het tijdsverschil met de bliksem blijkt constant tot vlak voor (0,1s) en vanaf vlak na (0,1s) de bliksem.

relatie tussen pulshoogte en pulsintegraal blijkt bij



Figuur 2.6: Het elektrische veld bij een ontlading in Florida in 1979 om 22:28:43 UTC op 2,5km afstand. [6].

lijk moeten zijn om 0,1s voor de *return stroke* met HiSPARC wel EAS-en te detecteren tot 0,1s voor de grond-wolkbliksem.

3 Het HiSPARC-netwerk: Geschikt voor de zoektocht naar UHECR's?

Sabine Beijen



Sabine Beijen is als eerstegraadsdocent Natuurkunde verbonden aan het Candea College te Duiven. Zij heeft aan de Universiteit Twente in 2009 haar master in Biomedical Engineering behaald. Daarna is zij via het programma *Eerst de Klas* gestart in het onderwijs. Tijdens *Eerst de Klas* heeft zij, naast de opgedane leservaring, haar eerstegraadsbevoegdheid voor Natuurkunde behaald aan de Universiteit Utrecht en heeft zij n dag in de week deelgenomen aan een leiderschapsprogramma. Met ingang van schooljaar 2014-2015 is Sabine ook werkzaam als docent Onderzoek en Ontwerpen binnen het Technasium op het Candea College.

3.1 Abstract

In augustus 2014 is door Abbasi en anderen in de *Astrophysical Journal Letters* een hotspot gerapporteerd. De hotspot is gesitueerd op rechte klimming $146,7^\circ$ en declinatie $43,2^\circ$; voor kosmische straling waarbij voor het primaire deeltje geldt dat $E > 57$ EeV. In eerder onderzoek is aangetoond dat de hotspot niet waargenomen kan worden in HiSPARC-data met alleen de detectoren op het Science-Park. In dit onderzoek is gekeken welke verdere mogelijkheden het HiSPARC-netwerk biedt om hoog-energetische gebeurtenissen te detecteren.

3.2 Inleiding

Het HiSPARC-project is een project waarin middelbare scholen actief een bijdrage leveren aan de wetenschap.

Zij plaatsen een detector op het dak die showers kan detecteren die het gevolg zijn van kosmische straling. Inmiddels bestaat het HiSPARC-netwerk uit 126 meetstations en een aantal teststations [7].

In het LIO-onderzoek van 2014/15 [8] is er gekeken of het mogelijk is om een gerapporteerde hot-spot waar te nemen in HiSPARC data. Dit bleek niet mogelijk ten gevolge van verschillende oorzaken. Eén van die oorzaken is het feit dat de verkregen dataset teveel showers bevatte die afkomstig waren van te laag energetische primaire deeltjes. De volgende stap is duidelijk: er moet een dataset komen waarin de opgenomen gebeurtenissen het gevolg zijn van grotere primaire energieën. Hier belanden we dan ook direct bij de voortdurende moeilijkheid die in dit onderzoeksgebied optreedt: het willen meten aan voldoende hoog energetische showers leidt tot relatief kleine datasets, er komen er van deze showers im-

mers niet zoveel voor. Toegeven op de energie leidt tot grotere datasets, maar zorgt er dus al snel voor dat je niet langer in het interessante gebied kijkt.

In dit onderzoek wordt op drie verschillende manieren gekeken of het mogelijk is om tot voldoende geregistreerde ultra-hoog energetische events te komen met behulp van het huidige HiSPARC-netwerk. Deze manieren zijn:

- Gebruik 3 stations die een voldoende groot meertoppervlak bestrijken (orde 1-10 km²), zodanig dat deze overeenkomt met de verwachte footprint van showers op het aardoppervlak
- Gebruik 3 stations met de grootste onderlinge afstand minimaal gelijk aan 0,8 km en ga na of er dan ruimte voor de showercore overblijft zodat deze binnen een straal van 1,0 km van alle drie de stations valt.
- Gebruik een combinatie van een vierplaatstation en een tweeplaatstation die ongeveer een kilometer uit elkaar liggen.

Vanzelfsprekend leiden deze punten tot een aantal onderliggende vragen als: *Welke vierplaatstations er zijn in het netwerk en waar bevinden deze zich?* en *Hoe is de ligging van de detectoren ten opzichte van de GPS van de vierplaatstations?*

Dit brengt een ander probleem voor het voetlicht: Door de jaren heen is er het nodige veranderd aan het HiSPARC-netwerk. Er kwamen stations bij, maar tevens veranderden bestaande stations: de detectorconfiguratie wijzigde, stations werden elders geplaatst, de GPS of het HiSPARC-kastje werd vervangen of een station werd uitgebreid van twee detectorplaten naar vier detectorplaten. Hoewel wijzigingen natuurlijk altijd gemaakt worden vanuit verbeteringsoogpunt, heeft het er ook bij een aantal stations in geresulteerd dat één of meer parameters onbekend zijn. Om tot maximale benutting van het netwerk te komen is het dus zaak dat er tijd geïnvesteerd wordt in het up-to-date maken van stationskenmerken als positie en configuratie.

Al deze bovengenoemde zaken zullen dit LIO-jaar aan bod komen. De centrale vraag die in dit onderzoek beantwoord wordt, luidt:

In hoeverre is het mogelijk om, gebruikmakend van het volledige HiSPARC-netwerk, te komen tot selectie van showers die het gevolg zijn van Ultra High Energy Cosmic Rays?

3.3 Achtergrond

3.3.1 HiSPARC-netwerk

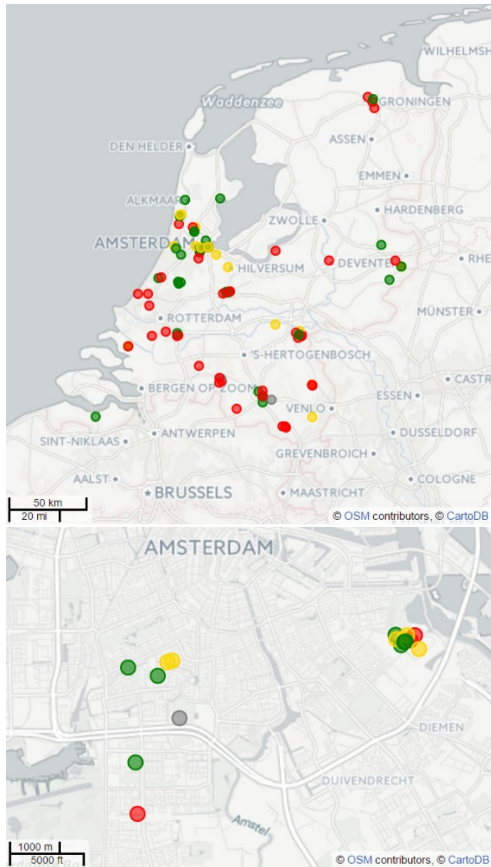
HiSPARC (Hishoel Project on Astrophysics Research with Cosmics) slaat een brug tussen het uitvoeren van wetenschappelijk onderzoek enerzijds en het actief betrekken van middelbare-school leerlingen bij dit onderzoek anderzijds. Middelbare scholen worden aangemoedigd deel te nemen aan het project. Zij schaffen een detector aan die airshowers detecteert. Doordat er inmiddels een groot aantal scholen meedoet, is er al een groot netwerk van detectoren ontstaan. Dit staat weergegeven in figuur 3.1a. Ieder bolletje geeft een detector aan. Een aantal staan dusdanig dicht op elkaar dat het niet helder is dat er zich een hele verzameling aan detectoren onder bevindt. Een voorbeeld hiervan staat in figuur 3.1b. Hier zijn zowel een verzameling stations in Amsterdam-Zuid te zien, als een opeenhoping van stations die zich op het Science-Park bevindt. Behalve in Nederland zijn er ook stations in Groot-Brittannië en Denemarken gesitueerd.

Het gehele netwerk bestaat op dit moment uit 126 meetstations en een aantal testopstellingen [7].

Het overgrote deel van de meetstations bestaat uit twee scintillatoren. 27 stations hebben echter vier scintillatoren. Met deze stations kan onder bepaalde omstandigheden ook van individueel geregistreerde events de aankomstrichting gereconstrueerd worden. Bij een tweeplaatstation is altijd tenminste één ander station in coincidentie nodig, voordat de richting gereconstrueerd kan worden.

3.3.2 Op zoek naar (de gevolgen van) UHECR's

Het ontstaan van Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR's) is nog altijd een onderwerp van discussie. Hoewel vanwege de grote mate van isotropie breed wordt aangenomen dat uhecrs van extra-galactische



Figuur 3.1: Weergave van Nederlandse en Amsterdamse HiSPARC-stations. 1a (boven) Nederland; 1b (onder) Amsterdam.

komaf zijn, gaan er langzaam ook stemmen op dat zij mogelijk wel degelijk van galactische aard zijn [9]. Het is ook juist deze isotropie, of beter gezegd: een geconstateerde afwijking daarin, die de vraag opwierp waaruit dit onderzoek is voortgekomen. In 2014 werd er namelijk door Abbasi en anderen een *hotspot* gerapporteerd voor UHECR's met $E_{\text{prim}} > 57 \text{ EeV}$ [10]. Vanaf een positie op rechte klimming $146,7^\circ$ en declinatie $43,2^\circ$ werden onevenredig veel UHECR's gemeten met genoemde primaire energie en hoger. UHECR's worden op aarde gemeten aan de hand van de deeltjeslawines die zij veroorzaken. Deze lawines worden ook wel airshowers genoemd. De literatuur

beschrijft een aantal typische kenmerken die bij dit soort UHECR's en bijbehorende airshowers horen. Zo wordt geschat dat er op jaarbasis ongeveer één shower van $1 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ per vierkante kilometer zal neerkomen. Voor een 10^{20} eV shower wordt dat geschat op 1 per eeuw per vierkante kilometer [11]. Daarnaast blijkt een shower van 10^{19} eV op de grond een footprint van ongeveer 10 km^2 te hebben [11] en dit leidt ertoe dat detectoren voor dergelijke showers in de ordegrootte van een kilometer uit elkaar kunnen staan [11].

Een praktisch voorbeeld hiervan is zichtbaar in de opstelling van de surface-detectors van het Pierre Auger Observatory. Met deze opstelling richt men zich op het detecteren van UHECR's met $E_{\text{prim}} > 10^{18} \text{ eV}$. De detectoren bestaan uit lichtdichte watertanks met daarin drie fotomultiplifiers. Deze registreren Cherenkov-straling die wordt veroorzaakt door passerende deeltjes uit een airshower. De detectoren staan steeds op 1,5 km van elkaar en bestrijken samen een oppervlakte van rond de 3000 km^2 [12, 13].

3.4 Methoden

Hoewel het HiSPARCnetwerk qua omvang niet te vergelijken is met een opstelling als bijvoorbeeld het Pierre Auger Observatory, is het wel degelijk de moeite waard om te bekijken in welke mate UHECR's met behulp van HiSPARC geregistreerd kunnen worden. In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe dat is aangepakt. Er worden achtereenvolgens drie manieren van stationselectie toegelicht:

1. Selectie van drie stations, zodanig dat de footprint van de shower bij benadering overeenkomt met de omvatte oppervlakte: de *footprint methode*;
2. Selectie van drie stations, zodat een gebied overblijft waarbinnen de showercore mag vallen zodanig dat alle drie de stations zich op een afstand van maximaal 1,0 km bevinden: de *overlap methode*;
3. Selectie van een twee- en een vierplaatstation die op een onderlinge afstand van ongeveer 1,0 km.

In alle drie scenario's zijn combinaties van stations bekeken die zich binnen een (sub)cluster bevinden. Er is aangenomen dat door stations tussen verschillende subclusters te combineren er alleen maar zeer grote oppervlakten en/of afstanden zullen ontstaan, waar niets anders meer gemeten wordt dan ruis. Subclusters die uit twee of minder stations bestaan, zijn als gevolg hier van niet meegenomen in de analyse.

3.4.1 De footprint-methode

De eerste manier om mogelijk hoog-energetische gebeurtenissen te selecteren, is door stations te kiezen die samen een voldoende groot oppervlakte bestrijken. De grootte van dit oppervlakte moet in de orde grootte liggen van de footprint van een hoog-energetische shower. Om te voorkomen dat teveel kleine showers worden opgenomen, moet er een ondergrens aan de combinatie van stations worden gesteld. Dit leidt samen tot de volgende twee criteria:

1. Het door de drie stations omvatte oppervlakte is groter dan $1,0 \text{ km}^2$
2. De grootste afstand tussen de drie stations is minimaal $1,0 \text{ km}$.

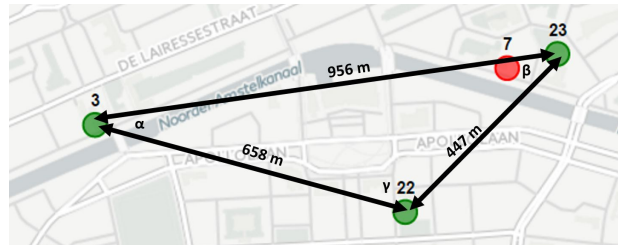
Omdat het niet in één oogopslag duidelijk is hoe de door de stations omvatte oppervlakte is gedefinieerd, zijn er drie mogelijkheden onderzocht. Deze worden toegelicht in paragrafen 3.4.1.1 t/m 3.4.1.3.

3.4.1.1 Schatting van oppervlakte als driehoek

Met behulp van SAPHIRE is voor alle clusters nagegaan op welke onderlinge afstand stations liggen en welke oppervlakte van driehoek daarmee bestreken wordt. In figuur 3.2 staat een voorbeeld weergegeven. Belangrijk om op te merken dat bij deze afstanden geen rekening is gehouden met mogelijke hoogteverschillen van stations ten opzichte van elkaar.

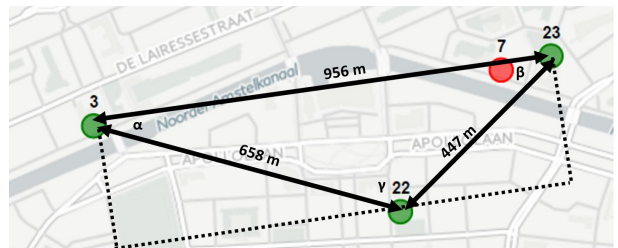
3.4.1.2 Schatting van oppervlakte als rechthoek

Deze methode werkt analoog aan de in 3.4.1.1 gepresenteerde methode, alleen wordt de oppervlakte van



Figuur 3.2: Drie stations in Amsterdam met onderlinge afstanden aangegeven. Uit deze afstanden kan vervolgens met de cosinus-regel worden berekend dat: $\alpha = 24^\circ$; $\beta = 37^\circ$; $\gamma = 119^\circ$. Vervolgens kan via geometrische relaties worden uitgerekend dat de oppervlakte van de driehoek gelijk is aan $0,13 \text{ km}^2$

de driehoek nu met twee vermenigvuldigd, zodat de oppervlakte van een rechthoek ontstaat. Dit staat weergegeven in figuur 3.3.



Figuur 3.3: Drie stations in Amsterdam met onderlinge afstanden aangegeven. Uit deze afstanden kan vervolgens met de cosinus-regel worden berekend dat: $\alpha = 24^\circ$; $\beta = 37^\circ$; $\gamma = 119^\circ$. Vervolgens kan via eenvoudige geometrie worden uitgerekend dat het oppervlak van de rechthoek gelijk is aan $0,26 \text{ km}^2$.

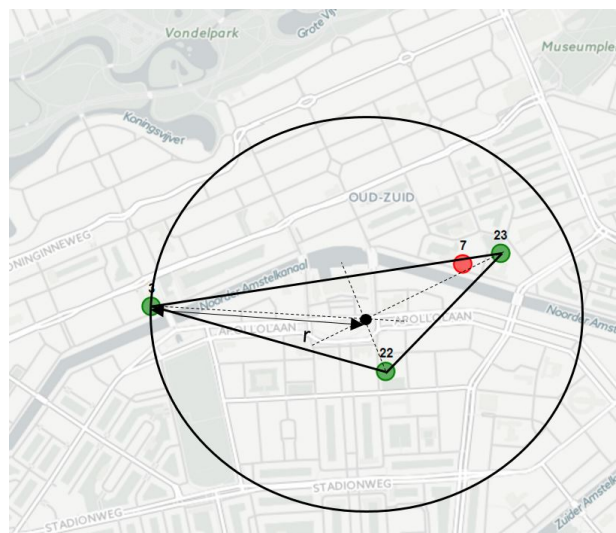
3.4.1.3 Schatting van oppervlakte als cirkel

Een derde manier om tot een schatting van de oppervlakte te komen, is door de oppervlakte te schatten als een cirkel. Hiervoor zijn meerdere mogelijkheden, denk aan de ingeschreven cirkel en de omgeschreven cirkel. Het zal duidelijk zijn dat deze cirkels sterk afwijkende oppervlakte-schattingen zullen geven vergeleken met de voorgaande twee manieren van schat-

ten. De ingeschreven cirkel zal altijd een oppervlakte geven dat kleiner is dan de oppervlakte die via een driehoek wordt geschat. De omgeschreven cirkel zal, met name bij *platte* driehoeken, het detectieoppervlak zeer sterk overschatten. Daarom is gekozen voor een derde methode.

Als eerste wordt met SAPHIRE het zwaartepunt van de door de stations gevormde driehoek bepaald. Vervolgens wordt gekeken hoe ver iedere detector van het zwaartepunt verwijderd ligt. De grootste van deze drie afstanden wordt gebruikt als schatting van de straal van de detectiecirkel.

Een voorbeeld van deze procedure staat weergegeven in figuur 3.4.

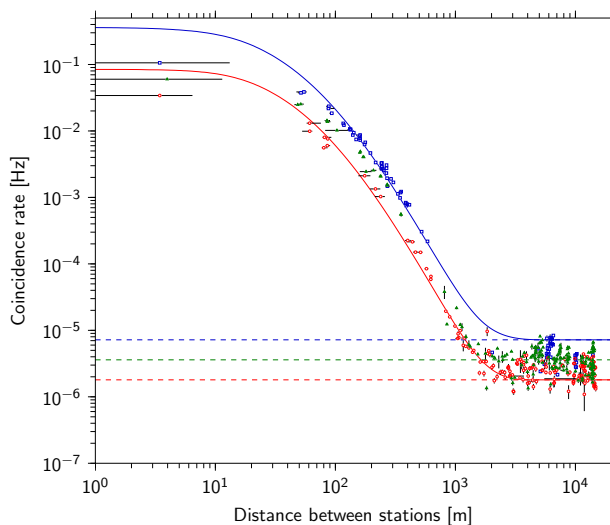


Figuur 3.4: Vaststellen van het detectie-oppervlak als een cirkel. In dit geval wordt het detectieoppervlak vastgesteld op $1,0 \text{ km}^2$.

3.4.2 De overlap-methode

De tweede manier om tot geschikte combinaties te komen is door het vaststellen van een oppervlakte dat niet gerelateerd is aan het *passend krijgen* van de shower, maar wat vastlegt waar de showercore mag vallen zodat het showerfront nog door de drie stations gedetecteerd kan worden.

In hoofdstuk 3.3 staat aangegeven dat een shower met primaire energie van 10^{19} eV een footprint op het aardoppervlak had in de ordegrrootte van 10 km^2 . Nemen we deze oppervlakte als cirkeloppervlak, dan zou deze cirkel een straal van $1,8 \text{ km}$ moeten hebben, wat dan ook direct de maximale afstand tussen de stations zou mogen zijn. De $1,8 \text{ km}$ lijkt echter te groot in vergelijking met de $1,0 \text{ km}$ die in hetzelfde artikel van Watson [11] genoemd wordt. De afstand van $1,0 \text{ km}$ is tevens bevestigd voor het HiSPARC-netwerk door A. de Laat [14]: vanaf deze onderlinge stationsafstand verdwijnt het aantal gemeten coïncidenties in de gemeten ruis. Een voorlopig resultaat van zijn onderzoek staat weergegeven in figuur 3.5.



Figuur 3.5: Relatie tussen onderlinge stationsafstand en de frequentie waarmee coïncidenties worden vastgesteld. Bron: A. de Laat, 2016.

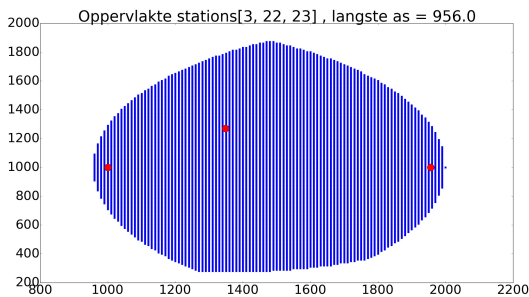
Wat hier echter de invloed van toevallige coïncidenties zal verkleinen, is het feit dat er nog een derde station in coïncidentie geëist wordt. De kans dat drie stations binnen het triggerwindow afgaan zonder dat er een airshower op valt is weer beduidend kleiner. Voor een verdere analyse van de hoeveelheid toevallige coïncidenties, zie paragraaf 3.4.5.

Op basis van deze overwegingen is ervoor gekozen te selecteren op stationscombinaties:

- waarvan de langste as minimaal 0,80 km lang is en
- waarbij er een oppervlakte overblijft waar de core kan terechtkomen onder het criterium dat de afstand tot alle drie de stations maximaal 1,0 km is.

Dit laatste punt betekent ook dat er een bovengrens aan de langste as gezet kan worden. Wordt deze immers langer dan 2,0 km, dan zal er altijd een oppervlakte van 0 m² ontstaan, omdat er geen enkel punt meer is dat binnen een afstand van 1,0 km van alle stations ligt.

Om de selectie uit te voeren, worden de stations op een grid gelegd, wat in stappen van 10 × 10 meter wordt doorlopen. Vervolgens wordt voor alle punten gekeken wat de maximale afstand tot de drie stations is. Is deze afstand voor minstens één station groter dan 1,0 km, dan wordt het punt niet meegenomen in de vastgestelde oppervlakte. Een voorbeeld van zo'n vastgesteld oppervlak is weergegeven in figuur 3.6.



Figuur 3.6: Vastgestelde oppervlakte (gearceerd gebied) waar de showercore mag vallen zodat de maximale afstand tot alle drie de stations nog 1,0 km bedraagt. Zowel op x- als y-as staat de positie ten opzicht van 0,0 weergegeven in meter. De oppervlakte in dit voorbeeld is gelijk aan 1,27 km²

3.4.3 Gebruik van een vierplaat-station en een tweeplaat-station

Een laatste methode om tot gebruik van het hele netwerk te komen, is door een combinatie te maken van

een vierplaat-station en een twee-plaat station. Door een voldoende grote afstand te kiezen tussen deze beide stations, kan een coïncidentie over deze grote afstand worden aangemerkt als gevolg van een hoog energetische shower. De richtingsreconstructie kan vervolgens aan de hand van de signalen in de platen van het vierplaatstation worden uitgevoerd.

In tabel 3.1 staan de verschillende vierplaatstations uit het HiSPARC-netwerk aangegeven. Daar achter staat aangegeven welke twee-plaatstations er op geschikte afstand in de buurt liggen (peildatum: 4 juli 2016). Als criterium is gebruikt dat de afstand tussen de twee stations groter is dan 900 m en kleiner is dan 2,0 km (voor verantwoording, zie hoofdstuk 3.2).

Het zal duidelijk zijn dat ook deze methode beperkt wordt door enerzijds de opbouw van het netwerk en de positionering van stations daarbinnen en anderzijds door het ontbreken van detectorposities van vierplaatstations.

Vergelijking reconstructie resultaten drie stations en één vierplaatstation

Fokkema beschreef eerder de mate van overeenstemming tussen richtingsreconstructie van showers tussen verschillende stations [15]. Daaruit werd duidelijk dat er een grote mate van overeenstemming voor de azimuthhoek is, maar daarentegen een veel mindere overeenstemming in gereconstrueerde richting van de zenithhoek. Met deze onzekerheden zal rekening gehouden moeten worden.

3.4.4 Downloaden en analyseren van data

Voor iedere combinatie van twee of drie stations wordt nu gekeken op welke momenten deze tegelijkertijd online waren vanaf het moment dat het HiSPARC-project is gestart tot 3 april 2016. De coïncidenties in deze tijdslots worden gedownload en daarvan wordt vervolgens de richting gereconstrueerd op basis van de combinatie van drie stations (methode 1 en 2) of op basis van het vierplaatstation (methode 3). Dit alles is uitgevoerd met behulp van SAPHIRE [16]. In december 2015 is de window-grootte van de ESD verhoogd van 2 μs naar 10 μs. Alle analyses zijn uitgevoerd op deze window-breedte, omdat de stations

4-plaat-station	2-plaat-station ($0,9 < r < 2,0$ km)	Opmerkingen	4-plaat-station	2-plaat-station ($0,9 < r < 2,0$ km)	Opmerkingen
3	2, 23	Geen detectorposities 4-plaat station	510	Geen	
9	2,3,5,13,22		511	Geen	
10	geen		1009	1002	
101	103	Geen detectorposities 4-plaat-station	1010	1006,1007	Geen detectorposities 4-plaat-station
201	Geen		3101	3102, 3101	Geen detectorposities 4-plaat station
501	Geen		3201	Geen	
502	Geen		3202	Geen	
503	Geen		7301	Geen	
504	Geen		8003	Geen	
505	Geen		8101	8102, 8105	
506	Geen		13001	13004	Geen detectorposities 4-plaat station
507	Geen		14001	Geen	
508	Geen		70001	Geen	
509	Geen				

Tabel 3.1: Overzicht van vierplaatdetectoren en tweeplaatdetectoren die hemelsbreed op een afstand van meer dan 900 m liggen, doch niet verder dan 2,0 km.

op een relatief grote afstand van elkaar liggen. Wanneer een shower in het uiterste geval *horizontaal* zou arriveren en zich met de lichtsnelheid zou voortbewegen, zouden stations op een afstand van $3,0 \cdot 10^3$ m nog met elkaar in coïncidentie kunnen zijn.

3.4.5 Schatting van de verwachte hoeveelheid toevallige coïncidenties

In de gedownloade coïncidenties zal een aantal toevallige coïncidenties voorkomen. Naar voorbeeld van Fokkema [15] is een schatting gemaakt van het aantal te verwachten toevallige coïncidenties.

Voor twee stations S1 en S2, kan de verwachte hoeveelheid toevallige coïncidenties als volgt worden be-

schreven:

$$N_r = 2f_1f_2\tau T \quad (3.1)$$

Hierin is N_r het aantal toevallige coïncidenties, f_1 en f_2 de triggerrates (Hz) van respectievelijk station 1 en 2, τ de ingestelde grootte van het coïncidentiewindow (s) en T de tijdsduur waarin er naar coïncidenties is gezocht (s).

Geschreven als frequentie van toevallige coïncidenties levert dit:

$$f_{1,2} = 2f_1f_2\tau \quad (3.2)$$

Willen we nu de toevallige coïncidentie-rate van een combinatie van drie stations weten, dan voegen we samen met in vergelijking 3.1, resulterend in de hoeveelheid verwachte random coïncidenties in een jaar

bij een window-grootte van $10 \mu\text{s}$ en een triggerrate van $0,8 \text{ Hz}$ [15]:

$$N_{r123} = 4f_1f_2f_3\tau^2T \quad (3.3)$$

$$= 4 \cdot 0,8^3 \cdot (10 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 31536000 \quad (3.4)$$

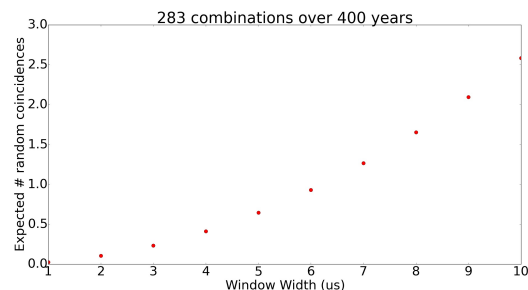
$$= 6,46 \cdot 10^{-3} \text{jaar}^{-1} \quad (3.5)$$

Daarna kan voor het totaal aantal toevallige coïncidenties deze hoeveelheid per jaar worden vermenigvuldigd met de totale waarnemingstijd in jaren. Deze totale waarnemingstijd wordt bij het downloaden door SAPPHiRE vastgesteld, door de tijden waarin de stations binnen een combinatie tegelijkertijd online waren bij elkaar op te tellen.

Intermezzo: De triggerrate nader bekijken

Om meer gevoel te krijgen voor de triggerrate van stations, zijn er voor 19 vierplaatstations en voor 19 tweeplaatstations events gedownload die plaatsvonden in januari 2016. Uit de totale tijd waarin data gedownload is (tot op het uur nauwkeurig vastgesteld) en de hoeveelheid gevonden events kan door een eenvoudige deling de triggerrate worden vastgesteld. Geïnccludeerde tweeplaatstations: 6, 22, 104, 202, 203, 304, 401, 1006, 2008, 2103, 2201, 3001, 3301, 3302, 3401, 7002, 7201, 8002, 8008. Opmerking: stations 2103 en 2201 bleken geen events te kennen in de maand januari en zijn niet opgenomen in onderstaand gemiddelde. Geïnccludeerde vierplaatstations: 3, 9, 101, 201, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 3201, 3202, 8003, 14001. De gemiddelde triggerrates die gevonden werden gedurende deze maand waren $0,58 \text{ Hz}$ ($\sigma = 0,16 \text{ Hz}$) voor vierplaatstations en $0,34 \text{ Hz}$ ($\sigma = 0,12 \text{ Hz}$) voor tweeplaatstations.

De hoeveelheid toevallige coïncidenties wordt, behalve door triggerrate en waarnemingstijd, beïnvloed door de breedte van het window waarin er naar coïncidenties gekeken wordt. Deze relatie staat weergegeven in figuur 3.7. Er is te zien dat door het vergroten van het coïncidentiewindow in de ESD de



Figuur 3.7: De relatie tussen windowbreedte bij coïncidentie-zoektocht en de verwachte hoeveelheid toevallige coïncidenties bij een waarnemingstijd van 400 jaar. De gebruikte triggerrate is $0,8 \text{ Hz}$.

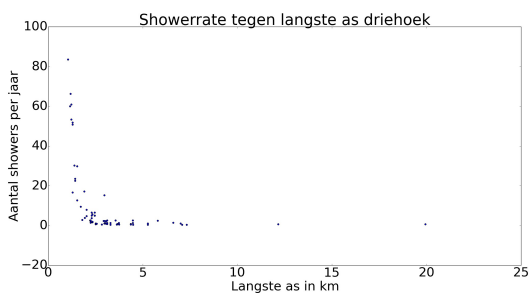
hoeveelheid toevallige coïncidenties met ongeveer een factor 10 stijgt.

3.4.6 Het schatten van de primaire energie

Tot slot is de laatste stap om tot een uitspraak te komen over de primaire energie van de geregistreerde shower. Voor iedere combinatie van stations wordt de totale uptime in jaren bepaald. Het aantal gedetecteerde showers in deze periode wordt dan gedeeld door de uptime, zodat als uitkomst voor iedere stationscombinatie het aantal showers-jaar⁻¹ verkregen wordt. Voor de footprintmethode wordt vervolgens de rate nog gedeeld door het geschatte detectieoppervlak, zodat er geëindigd wordt met een hoeveelheid showers-jaar⁻¹·km⁻². Vervolgens worden deze waarden gemiddeld en wordt de standaarddeviatie bepaald. Uit de zo gevonden showerrate kan vervolgens een vergelijking worden gemaakt met het bekende energiespectrum van kosmische straling, of met de waarden uit paragraaf 3.3.2. Op deze wijze kan een indruk worden gekregen waar in het energiespectrum de gemeten resultaten zich ongeveer zullen bevinden. Alle geregistreerde showers per combinatie worden gebruikt voor het bepalen van de showerrate en dus nadrukkelijk niet alleen de succesvol gereconstrueerde showers. Tevens is er voor gekozen om de showerrate op twee manieren te bepalen: één keer door het gemiddelde te nemen over alle drietallen die op tenminste één moment samen in de lucht waren ook al

werden er geen showers geregistreerd in die periode, en één keer door alleen het gemiddelde te nemen over de drietallen die gedurende hun gezamenlijke uptime ook daadwerkelijk showers hebben gemeten. Deze twee waarden geven de randen aan van het gebied waarbinnen de daadwerkelijke showerrate zich zal bevinden, waarbij de eerste methode een onderschatting en de tweede methode een overschatting van de showerrate zal geven.

Bij de overlapmethode en de combinatie van een twee- en vierplaatstation kan bovenstaande methode niet zomaar worden toegepast, omdat er geen schatting van het meetoppervlak voorhanden is. Als alternatief wordt van de grootste dataset van de footprint-methode een grafiek gemaakt van showerrate in showers·jaar⁻¹ tegen de langste afstand van de gebruikte meetdriehoek, zie figuur 3.8. Van de overlapmethode en twee- en vierplaatcombinatie kan



Figuur 3.8: Verband tussen het aantal showers per jaar en de langste zijde van een driehoek van stations.

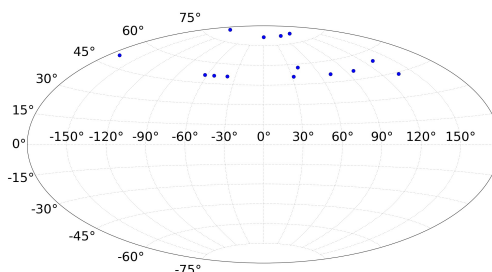
vervolgens wel het aantal showers·jaar⁻¹ bepaald worden en via de grafiek kun je alsnog tot een uitspraak komen over waar in het energiespectrum je je ongeveer bevindt.

3.5 Resultaten

3.5.1 Resultaten footprint methode

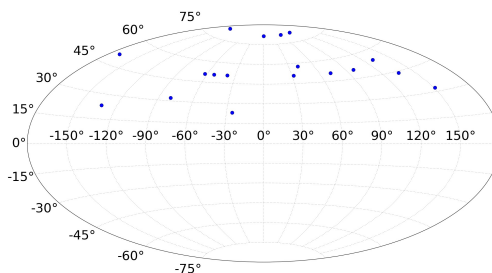
De resultaten van de footprint methode staan weergegeven in tabel 3.2 en 3.3. Op pagina 26 t/m 30 staat per manier van oppervlakte-schatting in een histogram aangegeven hoe vaak bepaalde groottes oppervlakte voorkomen, gecombineerd met

een weergave van het aantal gemeten coïncidenties per oppervlakte-groep. Kijkend naar het detectieoppervlak als driehoek leidt dit tot een verzameling van 282 combinaties, waarvan er 250 combinaties daadwerkelijk gemeten hebben, met daarin 38 waargenomen coïncidenties. Na de richtingsreconstructie blijven er 14 coïncidenties over. Deze 14 coïncidenties zijn in figuur 3.9 weergegeven in een Aitoff-weergave.



Figuur 3.9: Aitoff weergave 14 resterende gebeurtenissen (rechte klimming en declinatie).

Het blijkt dat de 38 aanvankelijk gevonden coïncidenties zich allemaal afspelen in driehoeken tot een maximaal oppervlak van 11 km². De totale verdeling van meetoppervlakte over alle 282 driehoeken staat weergegeven in figuur 3.10. Daaronder zijn de verdelingen van de groottes van oppervlakten n de



Figuur 3.10: Aitoff weergave 18 resterende gebeurtenissen (rechte klimming en declinatie).

verdelingen van het aantal gemeten coïncidenties per oppervlaktegroep weergegeven. Hoewel het in figuur

Window-grootte		Aantal opgenomen combinaties	Aantal combinaties met tenminste één gezamenlijk tijdslot voor meting	Aantal combinaties met waargenomen showers	Waarnemingstijd gesommeerd over alle combinaties (jaren)	Aantal verwachte toevallige coïncidenties [2]	Gemiddelde lengte van de langste as (km)	Aantal waargenomen coïncidenties	Aantal succesvol gereconstrueerde coïncidenties
Driehoek	10 μ s	282	250	15 (6%)	376	2,4	10,4 ($\sigma = 5,7$)	38* Uit unieke showers: 32	14** Uit unieke showers: 14
Rechthoek	10 μ s	341	300	30 (10%)	456	2,9	9,4 ($\sigma = 5,8$)	132* Uit unieke showers: 105	18** Uit unieke showers: 17
Cirkel	10 μ s	452	381	71 (19%)	595	3,8	8,1 ($\sigma = 5,7$)	1233* Uit unieke showers: 1042	660** Uit unieke showers: 569

Tabel 3.2: Resultaten bij verschillende schattingen van het meetoppervlak.

* Bij het aantal waargenomen coïncidenties lijken achtereenvolgens 6 (16%), 27 (20%) en 191 (15%) registraties van dezelfde shower afkomstig ($\Delta t < 10\mu s$).

** Bij het aantal gereconstrueerde coïncidenties lijken achtereenvolgens 0 (0%), 1 (6%) en 91 (14%) registraties van dezelfde shower afkomstig ($\Delta t < 10\mu s$).

3.15 en 3.16 lijkt alsof er coïncidenties voorkomen in een oppervlakte-bin die leeg is, is dat niet het geval. De lijnen van de figuren lopen daar precies over elkaar. Duidelijk wordt dat de grootste bijdrage in aantallen coïncidenties geleverd wordt door de groepen relatief kleine oppervlaktes. Kijkend naar de showerate van $0,63 \text{ showers} \cdot \text{jaar}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, dan is te concluderen dat we boven de 10^{18} eV aan primaire energie zouden zitten en zelfs richting de 10^{19} eV kruipen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de standaarddeviatie erg groot is. Gezien de maximale geschatte footprint op $11,0 \text{ km}^2$ ligt zou dit wel consistent zijn met het gegeven uit paragraaf 3.3.2 dat

een shower van 10^{19} eV een footprint van ongeveer 10 km^2 kent op het aardoppervlak.

Wanneer het oppervlak als rechthoek wordt geschat, dan leidt dat tot 341 combinaties, waarvan er 300 daadwerkelijk hebben gemeten. Hierin worden 132 coïncidenties waargenomen. In de uiteindelijke set met succesvol gereconstrueerde gebeurtenissen zijn nog 18 coïncidenties over. Deze coïncidenties staan weergegeven in figuur 3.10.

Bij de als rechthoek geschatte oppervlakten wordt als laatste een coïncidentie gevonden bij een geschat detectie-oppervlak van $22,0 \text{ km}^2$. Het betreft dan een combinatie van station 3, 9 en 21. Dit is na-

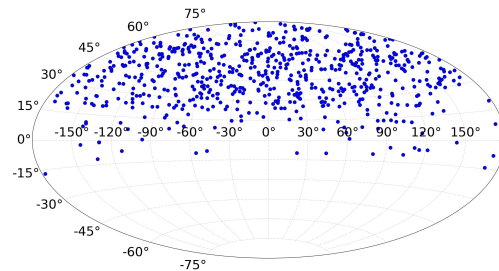
	Showerrate alle metende combinaties (showers/jaar)	Showerrate alle combinaties die tenminste 1 shower hebben vastgelegd (showers/jaar)	Showerrate alle combinaties die tenminste 1 shower hebben vastgelegd S(showers/jaar/km ²)
Driehoek	0,06 ($\sigma = 0,3$)	0,97 ($\sigma = 0,9$)	0,63 ($\sigma = 0,8$)
Rechthoek	0,3 ($\sigma = 1,6$)	2,9 ($\sigma = 4,4$)	2,0 ($\sigma = 3,4$)
Cirkel	0,7 ($\sigma = 4,7$)	10,0 ($\sigma = 18,5$)	4,7 ($\sigma = 12,0$)

Tabel 3.3: Resultaten berekende showerrate bij verschillende schattingen van het meetoppervlak.

tuurlijk dezelfde combinatie die bij een schatting van het oppervlak als driehoek ook de coïncidentie voor het grootst mogelijke oppervlak gaf, namelijk die bij 11,0 km². Het wordt duidelijk dat door het schatten van de oppervlak als rechthoek er met name in de groep relatief kleine oppervlakten een flinke toename zichtbaar is in het aantal coïncidenties.

Deze toename zien we ook terug in de geschatte showerrate van 2,0 showers·jaar⁻¹·km⁻² (met wederom een relatief zeer grote standaarddeviatie). Dit zou betekenen dat je in het energiespectrum lager terecht bent gekomen. Dit lijkt in tegenspraak met het feit dat de maximale footprint op 22,0 km² wordt geschat, wat betekend zou hebben dat de shower meer energie had dan 10¹⁹ eV.

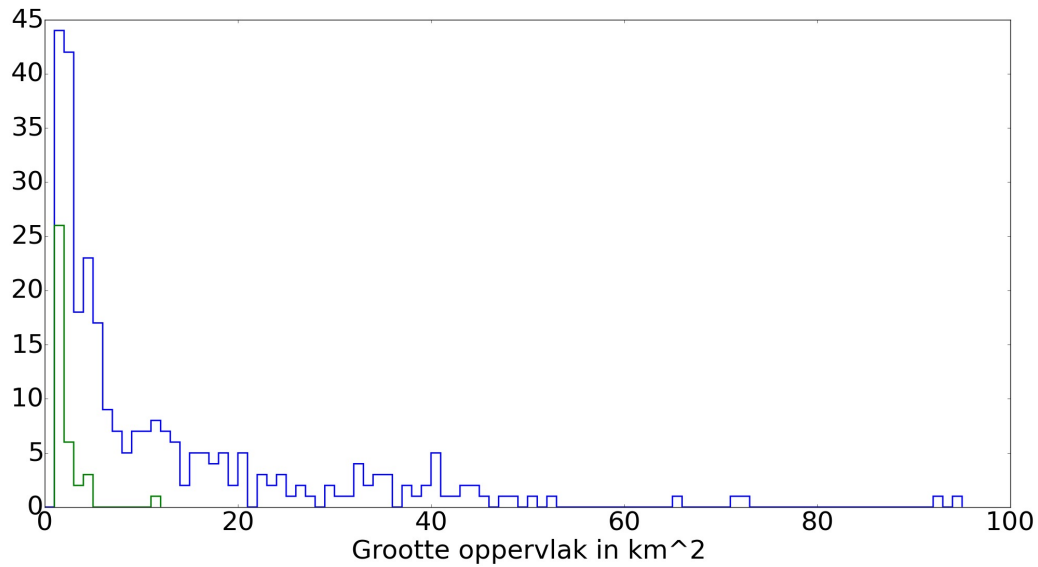
Wanneer naar een schatting als cirkel gekeken wordt, resulteert een set van 452 combinaties. In de uiteindelijke set met succesvol gereconstrueerde gebeurtenissen zijn dan nog 660 gebeurtenissen over. Deze staan in een Aitoff-projectie weergegeven in figuur 3.11. Het blijkt dat de kleinste oppervlak waarbij coïncidenties gevonden worden (169 stuks) gelijk is aan 1,2 km². Deze wordt gevormd door de stations (2001,2002,2006). De grootste oppervlakte waar nog coïncidenties gevonden worden (nog 1) is 552 km², gevormd door (8001,8005,8009). Ook bij de cirkelschattingen geldt dat de kleinst geschatte oppervlak-



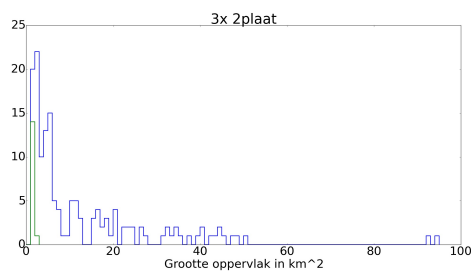
Figuur 3.11: Aitoff weergave 660 resterende gebeurtenissen (rechte klimming en declinatie).

tes het meest bijdragen aan het aantal geregistreerde coïncidenties. Zie ook figuur 3.22 t/m 3.26. Het effect dat steeds reeds bij de rechthoeken beschreven werd, namelijk de tegenstelling tussen stijgende showerrate en daarmee daling van de

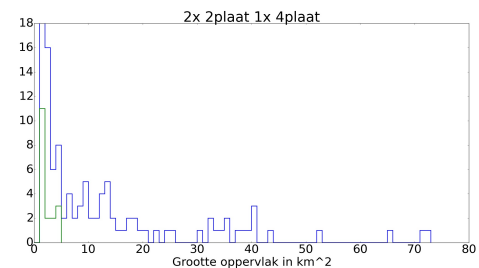
Verdelingen bij driehoeken



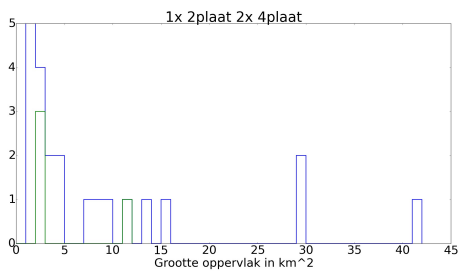
Figuur 3.12: In blauw de verdeling van geïncludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als driehoek. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coincidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km².



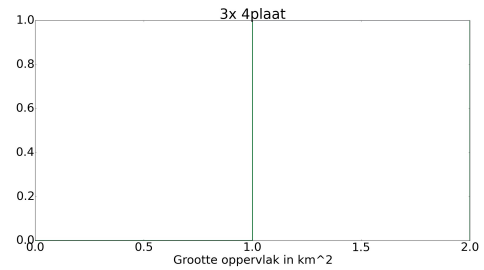
Figuur 3.13: In blauw de verdeling van geïncludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als driehoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 3 tweeplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coincidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km².



Figuur 3.14: In blauw de verdeling van geïncludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als driehoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 2 tweeplaatstations en een vierplaatstation. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coincidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km².

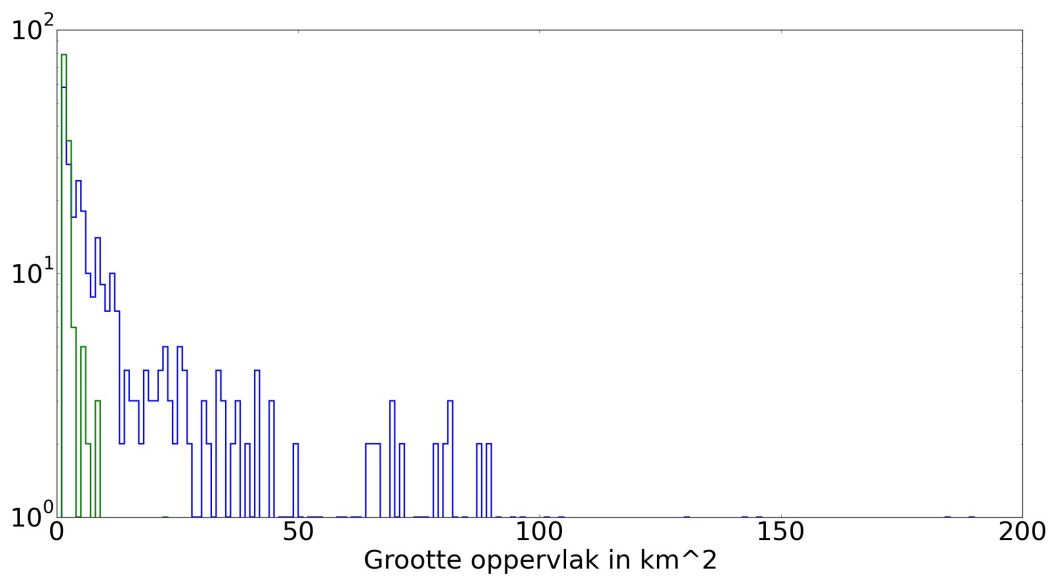


Figuur 3.15: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als driehoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 1 tweeplaatstation en twee vierplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km^2 .

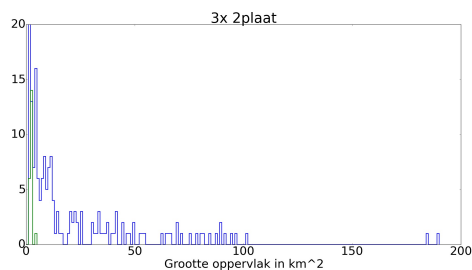


Figuur 3.16: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als driehoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 3 vierplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km^2 .

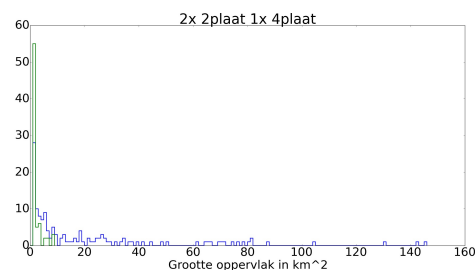
Verdelingen bij rechthoeken



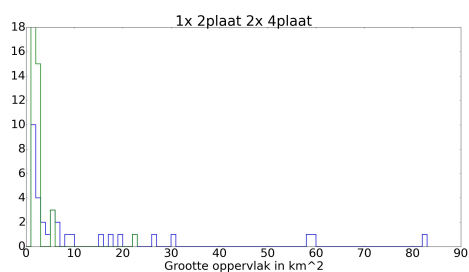
Figuur 3.17: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als rechthoek. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km^2 .



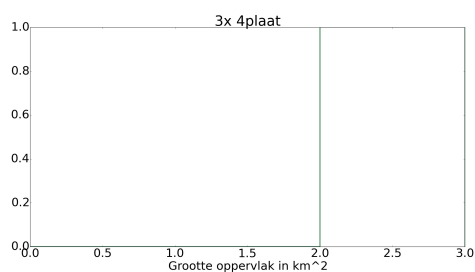
Figuur 3.18: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als rechthoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 3 tweeplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km².



Figuur 3.19: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als rechthoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 2 tweeplaatstations en een vierplaatstation. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km².

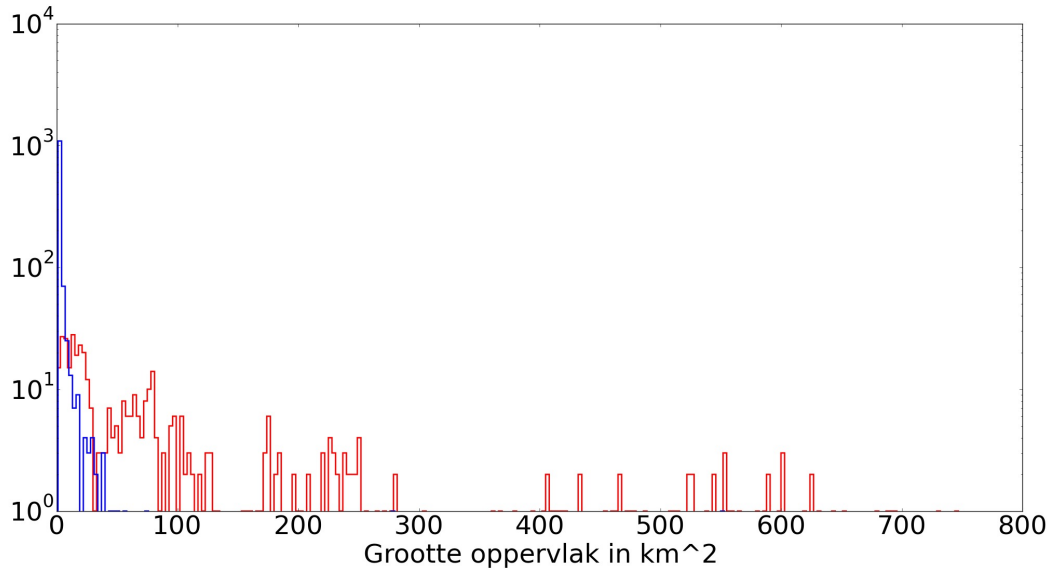


Figuur 3.20: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als rechthoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 3 vierplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km².

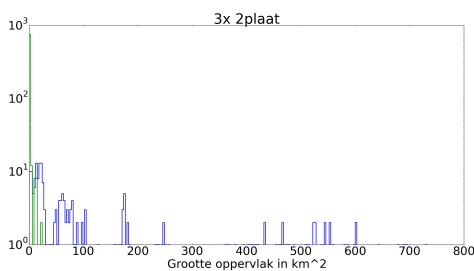


Figuur 3.21: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als driehoek en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 3 vierplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is ingesteld op 1 km².

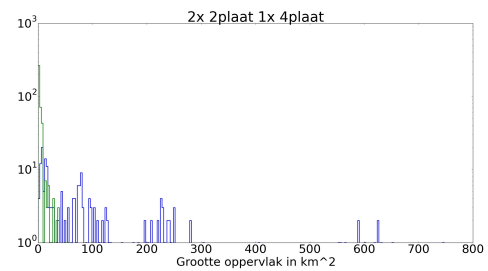
Verdelingen bij cirkels



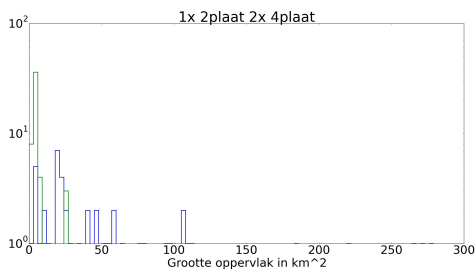
Figuur 3.22: In rood de verdeling van geïncludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als cirkel. In blauw staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is op 3 km^2 ingesteld.



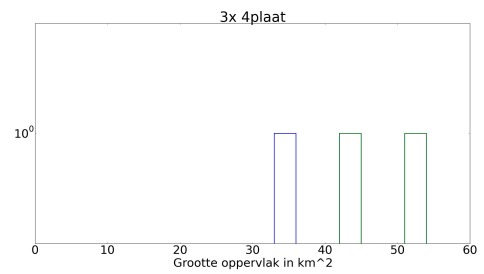
Figuur 3.23: In blauw de verdeling van geïncludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als cirkel en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 3 tweeplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is op 3 km^2 ingesteld.



Figuur 3.24: In blauw de verdeling van geïncludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als cirkel en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 2 tweeplaatstations en een vierplaatstation. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is op 3 km^2 ingesteld.



Figuur 3.25: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als cirkel en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 1 tweeplaatstation en twee vierplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is op 3 km^2 ingesteld.



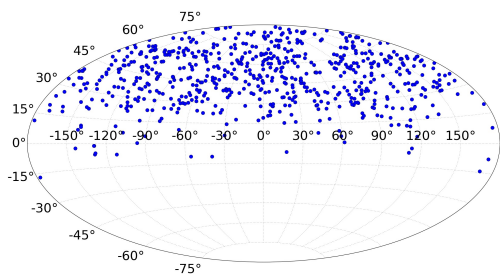
Figuur 3.26: In blauw de verdeling van geïnccludeerde meetoppervlakten wanneer deze geschat zijn als cirkel en wanneer we alleen kijken naar combinaties van 3 vierplaatstations. In groen staat weergegeven in welke oppervlakten de gemeten coïncidenties gevonden zijn. De bingrootte is op 3 km^2 ingesteld.

primaire energie enerzijds, en grotere geschatte footprint en daarmee stijging van de primaire energie anderzijds, lijkt hier nog sterker op te treden.

Wanneer de cirkelschatting vergeleken wordt met de schatting als driehoek en rechthoek, dan valt op dat de hoeveelheid verwachte toevallige coïncidenties maar weinig toeneemt, hoewel het aantal waargenomen coïncidenties juist heel sterk toeneemt.

3.5.2 Resultaten overlap-methode

Wanneer gekeken wordt welke combinatie van stations een langste as hebben met een lengte van tenminste 0,80 km, aangevuld met de eis dat er een oppervlak over moet blijven waar de showercore mag vallen, zodat de afstand tot ieder van de drie stations kleiner is dan 1,0 km, dan blijven er 31 combinaties over die in deze subset worden opgenomen. Zie ook tabel 3.4. Van deze 31 combinaties zijn er 20 combinaties die ook daadwerkelijk op één of meer dezelfde tijdslots online waren. Er worden hiermee 1284 coïncidenties uit 1149 unieke showers waargenomen, waarvan er na reconstructie nog 656 registraties uit 572 unieke events overblijven. Deze 656 reconstructies staan in figuur 3.27 weergegeven in een Aitoff-projectie.



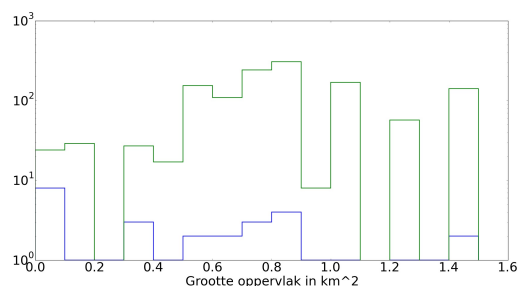
Figuur 3.27: Weergave van de 656 succesvol gereconstrueerde events uit het gehele netwerk, wanneer er gebruik wordt gemaakt van selectie via de overlap-methode.

Kijkend naar de oppervlaktes die gevonden worden, dan variëren deze tussen de 0,019 km² en 1,461 km². Kijkend naar de verdeling van oppervlakten en de verdeling van coïncidenties over de oppervlakten in

4-plaat station	2-plaat stations (0,9 < r < 2,0 km)
9	2,3,5,13,22
1009	1002
8101	8102, 8105

Tabel 3.5: De uiteindelijk opgenomen stationscombinaties.

figuur 3.28, dan is het opvallend dat bij deze wijze van schatten de bijdrage van de kleine oppervlakten veel



Figuur 3.28: Weergave van de verdeling van gevonden oppervlaktes met behulp van de overlap-methode, in blauw. In het groen staat weergegeven hoeveel coïncidenties er in ieder oppervlaktes-interval gevonden worden.

minder overheersend lijkt te zijn dan bij de footprint-methode.

De showerrate die met deze wijze gevonden kan worden, bedraagt 44,4 showers·jaar⁻¹, ook hier vergezeld van een standaarddeviatie die bijna even groot is.

3.5.3 Gebruik van een vierplaat-station en een tweeplaat-station

In tabel 3.5 staan de combinaties van vier- en tweeplaatstations weergegeven die gebruikt zijn voor de het downloaden van coïncidenties vanaf de start van het HiSPARC-project tot en met 3 april 2016.

Met de huidige inrichting van het netwerk hadden er 16 combinaties opgenomen kunnen worden, indien van alle vierplaat-stations de posities van de detectoren ten opzichte van de GPS bekend waren geweest

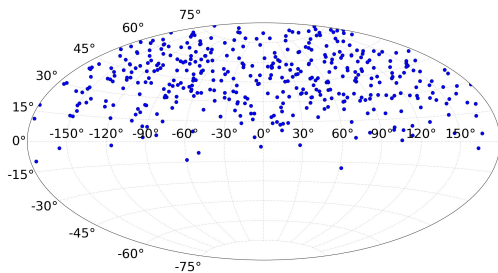
	Aantal opgenomen combinaties	Waarnemingstijd gesommeerd over alle combinaties (jaren)	Aantal verwachte toevallige coïncidenties [2]	Gemiddelde lengte langste as (km)	Aantal waargenomen coïncidenties	Aantal succesvol gereconstrueerde coïncidenties
Hele HiSPARC netwerk	31	36,0	0,23	1,4 ($\sigma = 0,34$)	1284* unieke showers: 1149	656** unieke showers: 572

Tabel 3.4: Weergave resultaten gebruik hele HiSPARC-netwerk in overlap-methode.

* Van deze 1284 coïncidenties lijken er 135 registraties (11%) registraties afkomstig van dezelfde shower, gedetecteerd door een andere combinatie van stations ($\Delta t < 10\mu s$)

** Van deze 656 gereconstrueerde coïncidenties lijken er 84 (13%) registraties afkomstig van dezelfde shower, gedetecteerd door een andere combinatie van stations ($\Delta t < 10\mu s$)

(zie tabel 3.1). Uiteindelijk zijn er op basis van de wel beschikbare posities 8 combinaties overgebleven om te analyseren. Deze leverden samen 422 gebeurtenissen die gereconstrueerd konden worden, zie tabel 3.6. Omdat de resultaten hier per stationscombinatie staan weergegeven is er niet gekeken of de gebeurtenissen allemaal uniek zijn wanneer de combinaties onderling vergeleken worden. De succesvol gereconstrueerde gebeurtenissen zijn in Aitoff-projectie weergegeven in figuur 3.29.



Figuur 3.29: Alle succesvol gereconstrueerde gebeurtenissen uit een combinatie van een 4plaat- en een 2plaat station (422 gebeurtenissen). Reconstructie is gebeurd op basis van het geregistreerde event in het 4plaat station.

Het is hier belangrijk op te merken dat, in tegenstel-

ling tot de vorige twee methodes, het aantal gemeten coïncidenties en de verwachte hoeveelheid toevallige coïncidenties sterk op elkaar lijken. Dit is (achteraf gezien) in overeenstemming met de resultaten van Arne de Laat [14], die ook vindt dat vanaf 1,0 km de hoeveelheid gemeten gebeurtenissen gelijk wordt aan de verwachte hoeveelheid toevallige coïncidenties.

3.6 Discussie en conclusies

In de eerste plaats brengt de gekozen aanpak een aantal beperkingen met zich mee. Deze zullen hier, samen met hun invloeden op de resultaten, besproken worden. Ten eerste een aantal opmerkingen die voor alle methodes van belang zijn, daarna wordt ingezoomd op de afzonderlijke methodes en tot slot volgen conclusies en aanbevelingen.

Algemene opmerkingen

In paragraaf 3.4.5 is besproken hoe de hoeveelheid verwachte toevallige coïncidenties is vastgesteld. Daarbij is uitgegaan van een triggerrate van 0,8 Hz, zoals ook is gebeurd in de thesis van D. Fokkema [15]. Uit het intermezzo blijkt dat de gemiddelde triggerrate mogelijk iets lager ligt dan deze 0,8 Hz en daarbij geldt dat een tweeplaatstation sowieso een lagere triggerrate kent dan een vierplaatstation. Het is daarom

Combinatie	Aantal gevonden coïncidenties	Aantal succesvolle reconstructies obv 4-plaat station	Totale waarnemingstijd (jaren)	Aantal verwachte toevallige coïncidenties
9,2	438	21	2,4	363
9,3	743	68	5,1	772
9,5	1597	109	4,2	636
9,13	796	104	6,1	923
9,22	965	103	4,3	651
1009,1002	geen	geen	0	0
8101,8102	22	geen	0,2	30
8101, 8105	382	17	3,0	454

Tabel 3.6: De gegevens bij downloads uit verschillende stationscombinaties Bij een triggerrate van 0,3 Hz voor een tweeplaatstation en 0,8 Hz voor een vierplaatstation, zie paragraaf 3.4.5 en [17]

te verwachten dat genoemde waarden voor de hoeveelheid toevallige coïncidenties per jaar een te hoge schatting van het daadwerkelijke aantal is in het geval van de methodes waarin drie stations worden gebruikt. In al deze gevallen geldt dat de gemeten hoeveelheid coïncidenties ruim boven de te verwachten toevallige hoeveelheid ligt, en met de wetenschap dat de verwachte hoeveelheid toevalligen eerder te hoog dan te laag ligt geeft dit vertrouwen in het feit dat gemeten coïncidenties ook daadwerkelijke coïncidenties zullen zijn.

Footprint methode

Bij de footprintmethode is het opvallend dat over de drie methodes gezien de gemiddelde lengte van de langste as afneemt. Dit is logisch te verklaren wanneer gekeken wordt naar de wijze van schatten van het oppervlak. Laat s de langste as van een drietal stations zijn en neem als ruwe benadering dat de straal van de zwaartepuntscirkel gelijk is aan $\frac{1}{2}s$ (zie ook figuren 3.2, 3.3 en 3.4). Het oppervlak van driehoek en rechthoek is dan evenredig met s , het oppervlak van de cirkel met $\frac{1}{4}s^2$. Dat betekent dat om het minimale oppervlak van 1 km² te krijgen, er bij de zwaartepuntscirkel met een kleinere langste as volstaan kan worden. In de cirkelschatting zullen dus naar rato meer combinaties met relatief kleine langste assen (echter nog steeds gebonden aan de ondergrens

van 1 km) voorkomen.

Het tweede punt dat duidelijk wordt, is dat bij de driehoeksschatting de langste as altijd langer moet zijn dan 1 km, om aan de grens van een oppervlakte van 1,0 km² te komen. In de dataset is de kortste langste as van een driehoek gelijk aan 1,8 km.

Wat vervolgens opvalt bij de schatting van het oppervlak als zwaartepuntscirkel versus het schatten van driehoek danwel rechthoek, is dat het aantal waargenomen coïncidenties sterk toeneemt door het detectieoppervlak als een cirkel te schatten, maar het aantal verwachte toevallige coïncidenties veel minder stijgt. Dit is weer gerelateerd aan de relatief kortere assen die er nu in de combinaties zijn opgenomen. De onderlinge afstand van de stations is niet van invloed op de vastgestelde rate van toevallige coïncidenties (zie ook vergelijking 3.1, 3.2 en 3.5). Hiervoor is alleen maar het gegeven relevant dat er nu meer combinaties zijn en er dus als gevolg daarvan een grotere gesommeerde waarnemingstijd is. De dataset wordt nu dus uitgebreid met een verzameling relatief dicht bij elkaar geplaatste combinaties die daardoor veel airshowers registreren. Dit is ook te zien in figuren 3.11, 3.16 en 3.21: relatief kleine oppervlakten dragen meer dan evenredig bij aan het aantal waargenomen coïncidenties. De hoeveelheid toevallige coïncidenties stijgt dus alleen maar ten gevolge van de grotere waarnemingstijd. Hierdoor is de toename in het aantal toevallige coïncidenties niet

evenredig met de toename in het aantal waargenomen coïncidenties.

Deze bijdrage van relatief dicht bij elkaar liggende stations geeft aan, uitgedrukt in de toegenomen showerrate, dat de primaire energie van de showers zal dalen ten opzichte van de dataset die uit de driehoeksschatting is verkregen. Het is dus aannemelijk dat zowel rechthoek als cirkel de grootte van de footprint van de shower overschatten en dat de driehoeksschatting voorlopig de beste optie is om aan te nemen als schatting van het detectie-oppervlak.

Overlap methode

Wat bij de overlapmethode opvalt vergeleken met de footprintmethode, is dat de relatief kleine oppervlaktes hier niet een onevenredig groot aantal showers toevoegen aan de dataset. Het is daarbij wel belangrijk op te merken dat de betekenis van *oppervlakte* in deze methode anders is dan in de footprintmethode. Bij de footprintmethode wordt het genoemde oppervlak gebruik als een maat voor het gezamenlijke detectieoppervlak van de detectoren, bij de overlapmethode geeft het de oppervlakte weer waarin de showercore terecht kan komen zodat detectie door alle omliggende stations redelijkerwijs mogelijk is.

Door dit verschil in betekenis van detectieoppervlak komt ook direct een tweede probleem naar boven, namelijk het maken van een schatting van de primaire energie. Uit de resultaten wordt duidelijk dat de hoeveelheid showers·jaar⁻¹ reeds een zeer grote standaarddeviatie kent. Deze zeer onzekere waarde zou vervolgens via figuur 3.8 kunnen leiden tot een verificatie van de langste as en daarmee uit de gegevens van de driehoeken weer leiden tot een schatting van de positie in het energiespectrum. Op deze wijze wordt echter onzekerheid op onzekerheid op onzekerheid gestapeld, met als gevolg dat de onzekerheid op de energieschatting dusdanig groot zal worden dat een zinvolle uitspraak niet meer mogelijk is.

Dus hoewel deze methode hoopvol lijkt qua bijdrage van de verschillende stationscombinaties, is het ontbreken van een goed werkende schatting van de primaire energie hier resultaatbepalend.

Gebruik vier- en tweeplaatstation

Kijken we tot slot naar de methode van het gebruik van een vierplaat- en een tweeplaatstation, dan valt als eerste op dat de gezamenlijke showerrate in showers·jaar⁻¹ erg hoog ligt vergeleken met beide andere methodes. Dit kan er op duiden dat het gebruik van slechts twee stations, ondanks een grote onderlinge afstand, leidt tot het vaststellen van teveel showers. Het is mogelijk dat het hier om showers van een te lage energie gaat, waarschijnlijker is echter dat we hier voor een groot deel naar ruis kijken. Het aantal verwachte toevallige showers ligt immers over het algemeen in dezelfde ordegrrootte als de hoeveelheid gemeten showers.

Al zouden we er in slagen, door verdere finetuning van de onderlinge afstand, tot data te komen die redelijkerwijs als het gevolg van daadwerkelijke showers aangemerkt kan worden, dan speelt ook in deze aanpak de doorstapelende onzekerheid weer een hele grote rol, analoog aan de stapelende onzekerheid in de overlapmethode.

Ten slotte, al zouden we er óók in slagen deze onzekerheid binnen acceptabele marges terug te brengen, dan nog is het belangrijk om op te merken dat de richtingsreconstructie op basis van een vierplaatstation de nodige onzekerheid met zich meebrengt. Dit heeft D. Fokkema in zijn thesis [15] laten zien in zijn hoofdstuk 6. Dus wanneer de dán overgebleven dataset voor vervolganalyse in bijvoorbeeld de Li-Ma procedure zou worden gebruikt, moet ook hier weer een grote mate van voorzichtigheid in acht worden genomen met betrekking tot de resultaten die dat zal opleveren.

Conclusies

Waar in het LiO-onderzoek van 2014-2015 al voor gevreesd werd, lijkt in deze inventarisatie bevestigd: het HiSPARC-netwerk in de huidige configuratie lijkt ongeschikt om coïncidenties ten gevolge van hoog-energetische gebeurtenissen te selecteren. Naast de configuratie is het ontbreken van een goede manier om tot de primaire energie van een shower te komen hier het tweede pijnpunt. Door het ontbreken van dit algoritme, is men genoodzaakt naar schattingen

te grijpen. Om tot zinvolle schattingen te kunnen komen is het hoe dan ook nodig dat:

1. er voldoende stations op grote, maar niet te grote, afstanden van elkaar liggen;
2. van deze stations de posities van detectoren ten opzichte van de GPS-antenne bekend zijn, zodat richtingsreconstructie aan de hand van een vierplaatstation plaats kan vinden; en
3. deze stations in redelijkheid continu aan het meten zijn.

Aan al deze randvoorwaarden wordt nog in te geringe mate voldaan. Het verdient dus hoe dan ook aanbeveling om bij de werving van nieuwe scholen voor deelname aan het HiSPARC-netwerk actief te kijken naar welke scholen zo gepositioneerd zijn dat zij nieuwe en relevante combinaties mogelijk maken en hoe de informatievoorziening van deze en reeds bestaande stations naar de database gewaarborgd kan worden.

Tot slot verdient het aanbeveling om te investeren in het actief draaiend houden van het netwerk en het ondersteunen van docenten wanneer daarom gevraagd wordt. Gedurende dit onderzoek zijn op meerdere momenten docenten actief benaderd met de vraag de detectorposities vast te stellen. Dit heeft geleid tot veel vragen, variërend van *hoe deze metingen uit te voeren* tot vragen als *Mijn detector is al geruime tijd offline, kunnen jullie me eerst helpen deze weer in de lucht te krijgen?*. Blijkbaar is het toch lastig op scholen om de boel voldoende werkend te houden. Door te investeren in extra ondersteuning van scholen kunnen twee vliegen in één klap worden geslagen: de uptime van de detectoren zal stijgen en het wordt mogelijk om sneller reactie te krijgen als er nieuwe informatie van een detector, zoals de posities ten opzichte van de GPS-antenne, nodig is.

4 Het verband tussen de afstand tussen meetstations en de zenithoekverdeling van coïncidenties van showers in HiSPARC

Tom Kooij



Tom Kooij is docent natuurkunde, wiskunde en NLT op het Coornhert Gymnasium Gouda. Na de studie Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek aan de TU Delft was hij korte tijd werkzaam in de vliegtuigbouw. Al snel lonkte het vak natuurkundeleraar. In 2005 heeft hij zijn eerstgraadsbevoegdheid natuurkunde gehaald en werkt nu ruim 10 jaar in het onderwijs. Dit is zijn tweede jaar als leraar in onderzoek bij HiSPARC.

4.1 Samenvatting

In dit onderzoek wordt de zenithoek verdeling van extensive air showers (EAS) onderzocht met behulp van het HiSPARC netwerk. Door aankomstrichtingen te construeren uit coïncidenties tussen driehoeken in het netwerk van verschillende grootte, worden showers geselecteerd op basis van de minimum energie die nog gedetecteerd wordt door de driehoek. Hieruit kan het verband tussen de zenithoek verdeling en de energie van de shower worden onderzocht.

De zenithoekverdeling wordt gemodelleerd volgens het model van [27] waarbij een parameter C wordt gefit die de absorptie van showers in de atmosfeer weergeeft. Uit het onderzoek blijkt dat er een sterk verband is tussen de parameter C afneemt en de grootste afstand tussen meetstations. Voor toenemende afstand tussen meetstations neemt de parameter C af.

Dit wordt verwacht en verklaard doordat de minimale energie van de gedetecteerde showers toeneemt bij toenemende afstand tussen de meetstations.

4.2 Inleiding

De zenithoekverdeling van extensive air showers (EAS) is door verschillende collaboraties onderzocht [27, 28]. Uit die data blijkt dat de zenithoekverdelingen een exponentiële functie zijn van $(\sec \theta - 1)$ [27]. De verdeling blijkt afhankelijk van de energie van het primaire deeltje dat de airshower veroorzaakt.

In dit onderzoek wordt met behulp van het HiSPARC netwerk de zenithoekverdeling van EAS onderzocht. Het HiSPARC netwerk bestaat uit meer dan honderd meetstations op daken van scholen en universiteiten in Nederland, Groot-Brittannië en Denemarken. Doordat de geometrie van het netwerk bepaald wordt

door de locatie van deelnemende scholen en universiteiten, is de afstand tussen de stations zeer onregelmatig. Hierdoor is het vaak niet mogelijk de plaats van het centrum van de shower (showercore) uit de meetgegevens te reconstrueren. Als de plaats van de showercore niet bekend is, dan is reconstructie van de energie van de shower onmogelijk. Wel zijn er in het netwerk veel combinaties van verschillende afstanden tussen meetstations. De afstand tussen de meetstations bepaalt de gevoeligheid voor verschillende energieën van gedetecteerde EAS. Als de afstand tussen meetstations toeneemt, dan neemt de minimum energie van showers die nog worden gedetecteerd toe. De maximale energie van showers die worden gedetecteerd hangt niet af van de afstand en is voor alle combinaties gelijk.

Door het verband tussen de afstand tussen meetstations en de zenithoekverdeling van EAS die in beide meetstations gedetecteerd worden (coïncidenties) te onderzoeken, kan een eerste indruk gekregen worden van het verband tussen zenithoekverdeling en energie van het primaire deeltje dat de airshower veroorzaakt.

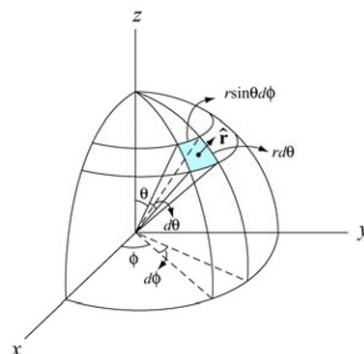
4.3 Driehoeken

De zenithoek van een gedetecteerde EAS kan worden bepaald uit de aankomsttijdsverschillen van de gedetecteerde deeltjes van de airshower [29]. Voor een succesvolle hoekreconstructie zijn minstens drie detectoren nodig die niet op een lijn liggen. Als we coïncidenties tussen twee meetstations beschouwen, waarbij de onderlinge afstand tussen de meetstations veel groter is dan de afstand tussen de detectoren in een meetstation, dan liggen de detectoren vrijwel op één lijn. Voor hoekreconstructie is nog een derde meetstation in coïncidentie nodig. We zoeken dus naar EAS die gedetecteerd worden in driehoeken van meetstations.

4.4 Model

Het aantal EAS dat een meetstation bereikt hangt o.a. af van de zenithoek vanwege absorptie van (een deel van) de shower in de atmosfeer. Om het effect

van de zenithoek te kunnen onderzoeken moet gecorrigeerd worden voor twee geometrische effecten: De openingshoek en het effectieve detector oppervlak. In figuur 4.1 is het effect van de openingshoek te zien.



Figuur 4.1: Oppervlak dA van de hemelbol boven een detector. De oppervlakte van de ring voor zenithoek θ is evenredig met $\sin \theta$. Bron: <http://web.mit.edu/8.02t/www/materials/modules/ReviewB.pdf>

Het relatieve oppervlak dA van de hemel dat een detector ziet voor zenithoek θ is evenredig met $\sin \theta$:

$$dA/d\theta \propto \sin \theta \quad (4.1)$$

Het effectieve detector oppervlak, is het detector oppervlak geprojecteerd op de richting van de shower. Dit oppervlak is evenredig met $\cos \theta$:

$$dA/d\theta \propto \cos \theta \quad (4.2)$$

Voor de geometrische effecten geldt dus:

$$dN/d\theta \propto \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (4.3)$$

Waarin N het aantal EAS is dat door een meetstation wordt gedetecteerd. Het aantal elektronen in een EAS als functie van de zenithoek wordt door [27] beschreven als:

$$N_e(\theta) = N_e(0)e^{-C(\sec \theta - 1)} \quad (4.4)$$

Waarin C een constante is die afhangt van de absorptie en de energie van het primaire deeltje. Showers

met een grote zenithhoek moeten een langere weg door de atmosfeer afleggen voordat ze het meetstation bereiken. De kans dat ze gedetecteerd worden is daarom kleiner. Maar hoe groter de energie van het primaire deeltje, hoe groter de kans dat een shower met een bepaalde zenithhoek nog gedetecteerd wordt. In dit onderzoek wordt getracht deze effecten aan te tonen, door de constante C te bepalen.

Combineren van vgl. 4.3 en vgl. 4.4 levert:

$$N = A \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot e^{(-C(\sec \theta - 1))} \quad (4.5)$$

Waarin A een evenredigheidsconstante is en C het gezochte verband tussen zenithhoek en energie van het primaire deeltje weergeeft.

4.5 Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag is: em Hoe hangt de zenithhoekverdeling van EAS uit coïncidenties tussen drie meetstations van het HiSPARC netwerk af van de afstand tussen de meetstations?

Om deze onderzoeksvraag te beantwoorden worden de volgende deelvragen beantwoord:

- Welke driehoeken van meetstations zijn geschikt voor de analyse?
- Zijn de gemeten aankomsttijdverschillen geschikt voor nauwkeurige richtingsreconstructie?
- Wat is het verband tussen constante C uit model vgl. 4.5 en de afstand tussen meetstations in driehoeken van het HiSPARC netwerk?

4.6 Hypothese

De breedte van de zenithhoekverdeling hangt volgens [27] af van de absorptie van de showers door de atmosfeer. Als de minimum energie van de gedetecteerde showers toeneemt bij toenemende afstand tussen meetstations, dan neemt het effect van absorptie van de showers af voor toenemende afstand. De parameter C van model vgl. 4.5 is dan kleiner voor grotere afstand tussen de meetstations.

De hypothese is: *Voor toenemende afstand tussen meetstations is het effect van absorptie op de zenithhoekverdeling van EAS uit coïncidenties tussen*

drie meetstations van het HiSPARC netwerk kleiner en daardoor de parameter C van model vgl. 4.5 kleiner.

4.7 Welke driehoeken van meetstations zijn geschikt voor analyse?

Van het gehele HiSPARC netwerk zijn alle driehoeken bepaald waarbij de maximale afstand tussen de stations kleiner is dan 1500 m. Deze afstand is gekozen omdat de kans op coïncidenties bij afstanden groter dan 1500 m zeer klein is. Voor richtingsreconstructie is nodig dat de kleinste hoek van de driehoek niet kleiner is dan 20 graden. Bij een kleinste hoek onder de 20 graden liggen de meetstations te veel op één lijn en is richtingsreconstructie vrijwel niet mogelijk. In het HiSPARC netwerk zijn 56 driehoeken gevonden die aan bovenstaande criteria voldoen, 44 van deze driehoeken zijn combinaties van de elf meetstations van het Science Park Array in Amsterdam. De driehoeken buiten het Science Park zijn weergegeven in tabel 4.1. Helaas hebben twee van deze driehoeken een uptime van 0 dagen, d.w.z. dat ze geen gemeenschappelijk data hebben en er geen coïncidenties zijn vastgelegd.

4.8 Zijn de gemeten aankomsttijdverschillen geschikt voor nauwkeurige richtingsreconstructie?

Richtingsreconstructie uit aankomsttijden van deeltjes van een airshower is beschreven in [29]. De nauwkeurigheid van de richtingsreconstructie wordt beïnvloed door afwijking van de gemeten aankomsttijden door statische variaties zoals de dikte van het showerfront en looptijd verschillen in de scintillator en fotomultiplierbuis. Deze statistische variaties zijn in de orde van 5 ns [29].

Vaak is ook een systematische tijdfout aanwezig, d.w.z. een verschuiving van gemeten tijd van de t.o.v. de werkelijke tijd (timing offset). Deze fouten kunnen veel groter zijn dan de statische meetfouten en hiervoor moet worden gecorrigeerd.

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen twee mechanismen waarbij tijd verschuiving optreedt [29]:

- Detector tijd offset

Nummer	Stations	Grootste afstand in driehoek [m]	Tophoek driehoek [graden]	Uptime [dagen]	Subcluster
1	(7001, 7002, 7003)	79	34	1481	Enschede
2	(102, 104, 105)	89	55	829	Zaanstad
3	(3201, 3202, 3203)	243	24	324	Middelharnis
4	(8001, 8004, 8008)	571	43	609	Eindhoven
5	(504, 505, 509)	580	30	1357	Science Park
6	(8004, 8008, 8009)	622	54	748	Eindhoven
7	(1002, 1003, 1008)	742	36	0	Utrecht
8	(3, 7, 22)	847	23	699	Amsterdam
9	(3, 22, 23)	953	24	117	Amsterdam
10	(2001, 2002, 2006)	1045	28	738	Nijmegen
11	(2, 22, 23)	1229	20	0	Amsterdam

Tabel 4.1: Gevonden driehoeken in het HiSPARC netwerk. Maximale afstand 1500 m. Minimale tophoek 20 graden. Van de driehoeken binnen Science Park Array in Amsterdam is alleen de grootste weergegeven.

- Station (GPS) tijd offset

4.9 Detector tijd offset

De detector tijd offset is een tijdsverschuiving van de door de elektronica vastgelegde aankomsttijd t.o.v. de GPS tijd van het station, bijvoorbeeld door afwijkende lengte van kabels en/of spreiding in eigenschappen van de elektronica. Deze verschuiving wordt dagelijks bepaald door middel van het gemiddelde van alle aankomsttijdsverschillen te bepalen. De aankomsttijdsverschillen hangen af van de richting van het showerfront en zijn normaal verdeeld met exponentiele staarten [30]. De spreiding in aankomstrijdingen van de showers kan isotroop worden verondersteld, zodat het gemiddelde van aankomsttijdsverschillen nul zou moeten zijn. De verschuiving van het gemiddelde is de detector tijd offset. Detector tijd offsets worden in het HiSPARC netwerk dagelijks bepaald. Aankomsttijden worden in richtingsreconstructie automatisch gecorrigeerd voor detector tijd offset [31].

4.10 Station (GPS) tijd offset

De GPS van een HiSPARC meetstation wordt gebruikt in overdetermined clock mode [29]. Omdat de positie

van een station vast ligt, kan de GPS gebruikt worden als nauwkeurige tijd bron, doordat de tijdinformatie van een groot aantal GPS satellieten een overbepaald stelsel van vergelijkingen oplevert, waaruit de tijd kan worden bepaald. De systematische fout is typisch 15 ns, maar kan in het HiSPARC netwerk oplopen tot 50 ns [31].

Voor dit onderzoek is het noodzakelijk om te corrigeren voor deze systematische fout, hierna station timing offset genoemd. Om deze offset te bepalen worden aankomsttijdsverschillen bepaald uit coïncidenties tussen twee stations. Door een normale verdeling te fitten aan de verdeling van aankomsttijdsverschillen kan de offset worden bepaald analoog aan de station timing offset.

Om de betrouwbaarheid te kwantificeren wordt voor elke station timing offset de standaard fout van het gemiddelde bepaald. Deze parameter is een maat voor de kwaliteit van de data en daarmee voor de kwaliteit van de bepaalde tijd offset. Deze parameter blijkt in dit geval beter te werken dan gereduceerde χ^2 -parameter. χ^2 geeft de kwaliteit van de fit weer en heeft onvoldoende correlatie met de kwaliteit van de dataset. Als er te weinig data is, kan de fit redelijk zijn, met een lage χ^2 als gevolg, terwijl de bepaalde timing offset onnauwkeurig is [31].

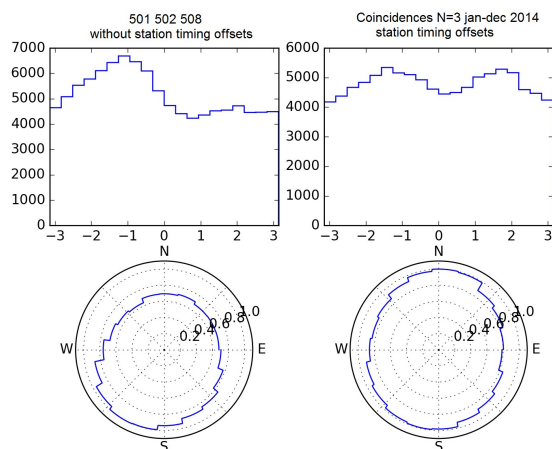
Als de afstand tussen meetstations toeneemt dan zijn

er minder coïncidenties tussen de meetstations. Dan is er een langere periode nodig om voldoende data te verzamelen om een offset te kunnen bepalen. Voor grote afstanden (meer dan een kilometer) is het aantal coïncidenties zo laag dat er vaak te weinig data is voor een betrouwbare fit van de normale verdeling. Daarom kan de timing offset niet altijd betrouwbaar worden bepaald als de afstand tussen meetstations groot is.

Om de timing offset tussen twee veraf gelegen stations te bepalen kunnen tussenliggende stations worden gebruikt. Voor een gebied met meerdere stations op relatieve korte afstand (honderden meters) zoals het Science Park Array in Amsterdam, kan de timing offset tussen relatief veraf gelegen stations, bijvoorbeeld tussen meetstations 505 en 509 (afstand 586 m) bepaald worden door de telkens de offset ten opzicht van meetstations op kortere afstand te gebruiken. In het voorbeeld van 505 naar 509 kan de offset van 505, via 511, 501 en 503 naar 509 bepaald worden.

Het richtingsreconstructie algoritme van SAPPHiRE probeert voor elke coïncidentie de timing offset tussen twee meetstations zo nauwkeurig mogelijk te bepalen door gebruik te maken van eventuele tussenliggende stations. Door een graaf te maken met de meetstations als knooppunt en de standaard fout van de timing offset als weging kan door middel van een kortste pad algoritme de standaard fout geminimaliseerd worden. De zo verkregen timing offset is binnen de grenzen van de beschikbare data de meest nauwkeurigste. Als de standaard fout groter is dan een vooraf ingestelde drempel (standard 100 ns) dan wordt de richtingsreconstructie afgebroken [31].

In figuur 4.2 zijn gereconstrueerde azimuthhoeken van driehoek 501, 502 en 508 weergegeven. In de linkerhelft van de figuur is niet gecorrigeerd voor station tijds offsets en in de rechterhelft is in dezelfde dataset wel gecorrigeerd voor station tijd offsets. De azimuthverdeling van de rechterhelft volgt de verdeling die verwacht wordt uit de geometrie van de driehoek. De lange zijde van de driehoek is oost-west georiënteerd. Verwacht wordt dat langs de lange as minder showers worden gedetecteerd, omdat de energie van de shower groter moet zijn voor grotere afstand tussen de meetstations. Na synchroniseren van de GPS klok is de azimuthverdeling zoals verwacht. Dit geldt voor al-



Figuur 4.2: Verdeling van gereconstrueerde azimuthhoeken voor de driehoek 501, 502, 508. De bovenste rij zijn histogrammen van de azimuth tegen de hoek in radialen in het ENU coördinatenstelsel van het cluster. In de onderste rij zijn de histogrammen op een windroos geprojecteerd. De lange zijde van driehoek 501, 502, 508 is oost-west georiënteerd, zodat in deze richting minder showers verwacht worden dan noord-zuid. De verdeling zonder correctie voor station timing offsets (links) voldoet niet aan de verwachting. Na correctie voor station timing offsets (rechts) is de azimuthverdeling zoals verwacht.

le driehoeken uit het onderzoek. De azimuthverdeling wordt gebruikt als kwaliteitscontrole van de data. Door de detector en station tijd offsets te bepalen wordt de data ook deels geverifieerd. Zo is een deel van de data van 2015 van de driehoek van station 102, 104 en 105 onbruikbaar doordat één van de stations de trigger tijd verkeerd verwerkte. Door het bepalen van station tijd offsets komt deze fout aan het licht en wordt de data niet gebruikt voor verdere analyse. Voor de meeste driehoeken is de station tijd offset te bepalen. Maar, hoewel de clusters in Nijmegen, Eindhoven en Amsterdam voldoende uptime hebben en daarmee voldoende coïncidenties hebben geregistreerd, is het (nog) niet mogelijk om een nauwkeurige station timing offset te bepalen, waardoor de GPS klokken niet gesynchroniseerd kunnen worden voor

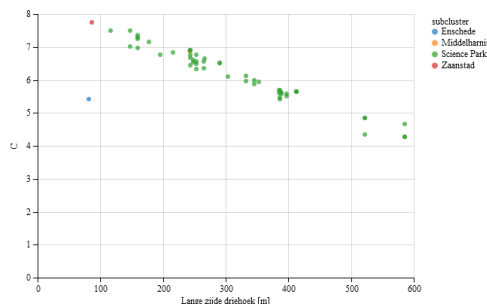
richtingsreconstructie. De precieze oorzaak is niet bekend. Mogelijk is de grote afstand tussen de meetstations, en daarmee het kleine aantal coïncidenties de oorzaak.

Door het ontbreken van station tijd offsets kunnen de klokken van de driehoeken Nijmegen, Eindhoven en Amsterdam niet worden gesynchroniseerd en is richtingsreconstructie niet mogelijk. Deze driehoeken kunnen niet gebruikt worden in het onderzoek.

4.11 Wat is het verband tussen constante C uit model vgl. 4.5 en de afstand tussen meetstations in driehoeken van het HiSPARC netwerk?

Voor de geselecteerde driehoeken van meetstations is alle beschikbare data sinds 2008 opgehaald. Uit de coïncidenties tussen de combinaties van drie meetstations zijn de richtingen gereconstrueerd waarbij rekening is gehouden met detector tijd offsets en station tijd offsets. Omdat niet alle stations sinds 2008 actief zijn en verschillende stations ook tussendoor offline geweest zijn is de hoeveelheid data veel kleiner dan acht jaar per driehoek.

In figuur 4.3 wordt de correlatie tussen de afstand tussen de meetstations (de grootste afstand in de

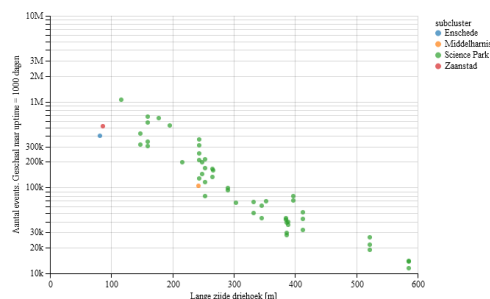


Figuur 4.3: Aantal events (coïncidenties waarvan de richting gereconstrueerd kon worden) versus de afstand tussen de meetstations. Het aantal coïncidenties is geschaald naar een uptime van 1000 dagen.

driehoek) en het aantal events (coïncidenties in de

driehoek waarvan de richting gereconstrueerd kan worden) weergegeven. Het aantal events is geschaald naar een uptime van 1000 dagen. In de figuur is het verband tussen de minimum energie van de gedetecteerde showers en de afstand tussen de meetstation duidelijk zichtbaar. Het aantal events neemt af doordat de shower flux sterk afneemt als de energie van de shower toeneemt.

In figuur 4.4 is de absorptie coëfficiënt C uit model vgl. 4.5 weergegeven tegen de afstand tussen de meet-



Figuur 4.4: Absorptie coëfficiënt C uit fit van model vgl. 4.5 tegen de afstand tussen de stations.

stations (de grootste afstand in de driehoek). Er is een duidelijk verband tussen C en de afstand tussen meetstations: Als de afstand tussen twee meetstations toeneemt dan neemt de parameter C van model vgl. 4.5 af.

Via het verband tussen de shower energie en de afstand tussen meetstations van figuur 4.3 is er ook een duidelijk verband tussen de shower energie en C : Als de shower energie toeneemt dan neemt de parameter C van model 4.5 af. Dit komt overeen met de hypothese dat voor toenemende afstand tussen meetstations zenithhoekverdeling minder beïnvloed wordt door absorptie van showers in de atmosfeer.

Omdat er ook een verband is tussen het aantal events en de afstand tussen meetstations (figuur 4.3) is onderzocht of het verband tussen C en de afstand tussen meetstations (figuur 4.4) onafhankelijk is van het aantal events. Daarvoor is voor elke driehoek een aselecte steekproef van tienduizend events getrokken en daaruit C bepaald. Hieruit volgt hetzelfde verband als figuur 4.4. Het aantal events heeft schijnbaar geen

invloed op het onderzochte verband.

De driehoek uit het cluster *Enschede* (meetstations 7001, 7002 en 7003) wijkt sterk af van de andere driehoeken. Dit is te verklaren doordat deze drie meetstations op de bovenste verdieping van een gebouw onder een betonnen dak staan. Aangenomen wordt dat door scattering in het beton de zenithhoekverdeling uitgesmeerd wordt. Daardoor is de parameter C dan verwacht op basis van de afstand tussen de meetstations.

4.12 Conclusie

Van de 56 geschikte driehoeken van meetstations in het HiSPARC netwerk zijn er tien driehoeken gevonden buiten het Science Park in Amsterdam. Daarvan hebben er drie onvoldoende data, d.w.z. de gemeenschappelijke uptime is niet groot genoeg om voldoende coïncidenties te verzamelen. Uiteindelijk zijn er 53 driehoeken onderzocht, waarvan zeven buiten het Science Park.

Voor richtingsreconstructie van coïncidenties tussen meetstations is het noodzakelijk om de GPS klokken van die meetstations te synchroniseren. Het is mogelijk uit coïncidenties tussen meetstations de tijddoorslag tussen de GPS klokken van meetstations nauwkeurig te bepalen en dit is geïmplementeerd in de analyse software van HiSPARC: SAPPHiRE. Door nog onbekende oorzaak is het synchroniseren (nog) niet mogelijk voor de driehoeken in Nijmegen, Eindhoven en Amsterdam. Deze driehoeken doen niet mee in het onderzoek. Daardoor blijven er slechts drie driehoeken over die niet op het Science Park liggen.

Verwacht wordt dat de afstand tussen twee meetstations een maat is voor de minimale energie van de gedetecteerde showers. Dit verband is in dit onderzoek aangetoond, zodat de afstand tussen twee meetstations gebruikt kan worden voor de (minimale) energie van de gedetecteerde showers.

Er is een sterk verband tussen de parameter C uit model vgl. 4.5 en de afstand tussen twee meetstations. De parameter C , d.w.z. de absorptiecoëfficiënt uit het model van [27], neemt af als de afstand tussen twee meetstations toeneemt. Dit komt overeen met de aanname dat de parameter C afneemt bij toenemende energie van de gedetecteerde showers, om-

dat de afstand tussen meetstations een maat blijkt te zijn voor de (minimale) energie van gedetecteerde showers. ‘

4.13 Aanbevelingen

Door onbekende oorzaak kunnen de GPS klokken van de driehoeken in Eindhoven, Nijmegen en Amsterdam niet worden gesynchroniseerd. Het is aan te bevelen om de oorzaak te onderzoeken en te proberen te verhelpen, zodat de beschikbare data van deze meetstations gebruikt kan worden en vergeleken kan worden met de resultaten van dit onderzoek.

In dit onderzoek zijn alleen driehoeken van meetstations onderzocht. In het HiSPARC netwerk zijn een flink aantal meetstations aanwezig met vier detectoren per meetstation, waarmee ook de richting van de showers gereconstrueerd kan worden. Het is interessant om de zenithhoek verdeling te vergelijken met de resultaten van dit onderzoek.

5 Een onderzoek naar de invloed van gebouwmassa op de detectie van kosmische straling

Gerrit de Vries



Gerrit de Vries is als eerstegraadsdocent Natuurkunde en NLT verbonden aan de Open Scholengemeenschap Bijlmer in Amsterdam. Hij heeft aan de Hogeschool Utrecht in 2016 zijn master docent natuurkunde behaald. Inmiddels is hij zes jaar werkzaam in het voortgezet onderwijs. Daarvoor was Gerrit werkzaam als architect.

5.1 Abstract

Kosmische straling op weg naar HiSPARC-detectoren, wordt soms tegengehouden door materiaal met een grotere dichtheid, bijvoorbeeld bouw materiaal als beton en ijzer. In dit verslag wordt deze afname van detectie onderzocht bij een detectiestation in een gebouw en bij twee stations die wel buiten staan, maar aan de voet van een 66 meter hoog gebouw. Hoewel in algemene zin wel beïnvloeding van gebouw op detectie kan worden aangetoond, is het exacte verband tussen de positie van gebouwmassa (tomografie) en richting van inkomende metingen moeilijker te geven.

5.2 Inleiding

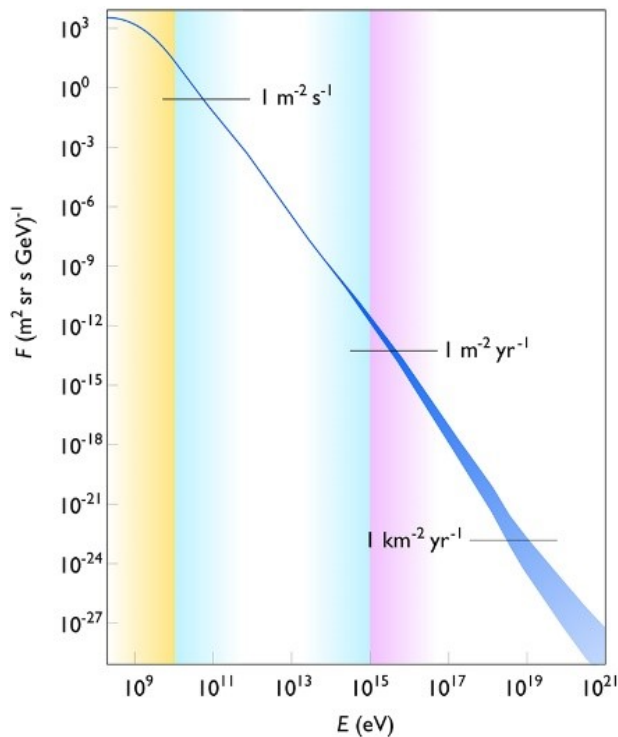
Inleiding

De aarde wordt continu gebombardeerd met kosmische straling. Dit zijn deeltjes uit de ruimte. De oorsprong van deze deeltjes varieert van de zon (met

als gevolg een waar te nemen effect als poollicht), sterren uit ons melkwegstelsel, exploderende sterren op het einde van hun levenscyclus, genaamd supernovae, zwarte gaten tot plaatsen ver buiten ons eigen melkwegstelsel. Van hoe verder weg ze komen, met hoe meer energie, in de vorm van bewegingsenergie, de deeltjes aankomen bij de aarde. Een paar getallen: deeltjes afkomstig van onze zon hebben energieën van $10^9 - 10^{11}$ eV³, van een supernova 10^{16} eV en dit kan oplopen tot 10^{21} eV, zodat ontsnapt kan worden aan galactische magneetvelden, buiten onze eigen Melkweg.

Hoe groter de energie, hoe minder deeltjes de aarde bereiken en worden gemeten. Dit wordt weergegeven in figuur 5.1 Te zien is bijvoorbeeld dat elke seconde op elke vierkante meter op aarde een deeltje afkomstig van de zon (met 10^{11} eV) neerkomt. Een deeltje

³We drukken alle energieën uit in electronvolts en veelvouden daarvan: $1 \text{ eV} = 1.6010^{-19} \text{ J}$.

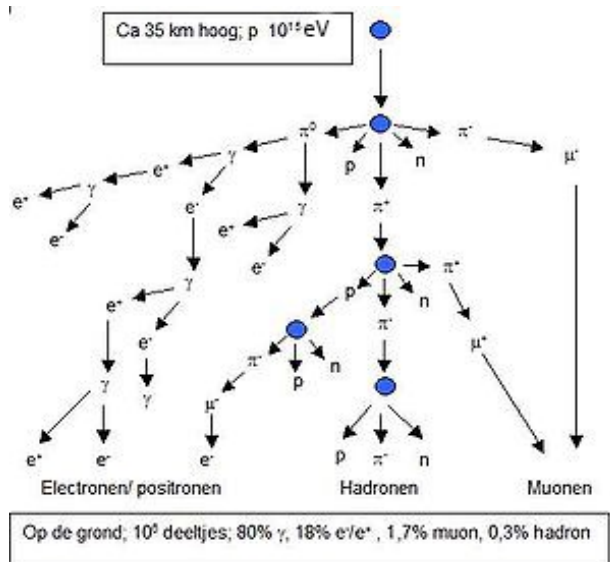


Figuur 5.1: Spectrum van kosmische straling (bron: Wikipedia)

van 10^{16} eV, wordt op elke vierkante meter slechts 1 keer per jaar gemeten en een extra-galactische deeltje maar 1 keer per jaar op een vierkante kilometer.

Uit wat voor deeltjes bestaat kosmische straling? Het zijn gamma's, elektronen en positronen, protonen en soms zwaardere kernen van helium tot ijzer. Als deze primaire deeltjes na hun tocht door de ruimte, bij de buitenste aardatmosfeer aankomen, vinden botsingen plaats met deeltjes die zich in de atmosfeer bevinden. Zo kan bijvoorbeeld een hoog-energetisch proton botsen met een zuurstof- of stikstofkern, de belangrijkste componenten van de dampkring. Dit gebeurt hoog in de atmosfeer. Door verschillende deeltjes-interacties kan zo een regen van secundaire deeltjes ontstaan, die een extended air shower (EAS) wordt genoemd [32]. Een voorbeeld kun je in figuur 5.2 zien.

Er zijn verschillende soorten airshowers. Een gamma-deeltje veroorzaakt elektromagnetische showers. De



Figuur 5.2: Deeltjeslawine (EAS) (bron: Wikipedia)

botsingen vinden plaats dieper in de atmosfeer, dus dichterbij het aardoppervlak. De wisselwerking is van elektromagnetische aard. De fotonen worden omgezet in paren van elektronen en positronen⁴, die op hun beurt, door passage van het elektrisch veld van een kern en door annihilatie, weer fotonen kunnen produceren. Hadronische showers⁵ ontstaan door de botsing van bijvoorbeeld een proton met een zuurstof- of stikstofkern en vindt hoger in de atmosfeer plaats. Hierbij vindt wisselwerking plaats door niet alleen de elektrische lading, maar vooral door de sterke krachten tussen de componenten van het proton (quarks, gluonen) en die van de kerndeeltjes in de stikstof- en zuurstofkern. Deze interacties leveren een grote bijdrage aan de toename van deeltjes in de airshower: grote aantallen mesonen, gebonden quark-antiquark paren. De lichtste en meest talrijk voorkomende mesonen zijn de pionen, die voorkomen in drie soorten:

⁴Te noemen botsingen: paar-productie, Compton verstrooiing, bremsstrahlung, Møller- Bhabhaverstrooiing.

⁵Hadronen zijn deeltjes die bestaan uit quarks en gluonen. Ze worden bijeen gehouden door de sterke wisselwerking; ze worden verdeeld in baryonen zoals protonen en neutronen, en in mesonen zoals pionen en kaonen.

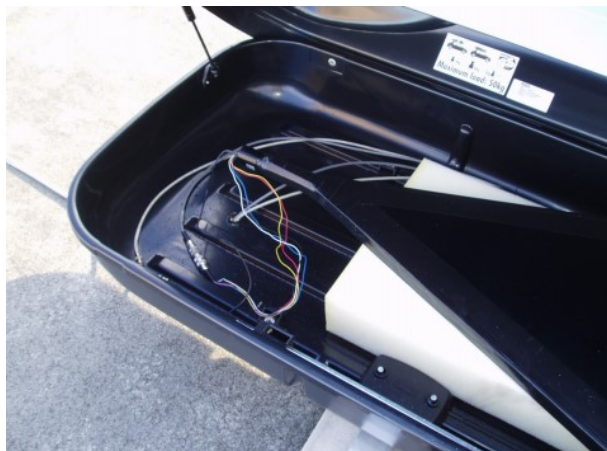
π^\pm met lading $\pm e$ (de elementaire lading), en π^0 zonder lading. Deze mesonen zijn niet stabiel, maar vervallen na korte tijd in andere deeltjes. Zo vervalt een π^\pm heel snel ($\tau \approx 10^{-8}$ s) in een muon (μ^\pm) en een bijbehorend (anti)neutrino ($\nu, \bar{\nu}$). Het ongeladen pion vervalt daarentegen nog sneller ($\tau \approx 10^{-16}$ s) in twee fotonen. Overigens is het zo dat bij de besturing van deze secundaire deeltjes vele subatomaire deeltjes voor het eerst zijn waargenomen [33].

Op grote hoogte is de bijdrage aan de deeltjes-lawine voor het grootste deel afkomstig is van de pionen, die met name muonen en gammas leveren. Op lagere hoogtes leveren gammas elektronen en positronen en andersom. Als de energie van het primaire kosmische deeltje hoog is komen de lawines op het aardoppervlak aan en is de samenstelling gamma's en elektronen/positronen plus wat muonen. Bij laag energetische deeltjes stopt de shower in de atmosfeer, maar halen muonen de grond wel. Dat komt omdat muonen zo doordringend zijn. Muonen hebben een 200 keer zo grote massa als het elektron, waardoor de factor bremsstrahlung die omgekeerd evenredig is met de 4e macht van de massa, geen beperkende factor meer vormt.

De op de grond aankomende deeltjes willen we waarnemen en bestuderen. Dat gebeurt in het HiSPARC⁶ project door middel van scintillatieplaten, die in skiboxen zitten, zie figuur 5.3. Deze liggen op daken van gebouwen op het Science Park en op die van veel scholen door het hele land en in sommige buurlanden. Heel soms zijn ze binnen een gebouw geïnstalleerd. Als deeltjes op weg naar de detectie gehinderd worden door een gebouw is het aannemelijk dat er meer interacties van de te meten deeltjes in het beton plaatsvinden dan in een vergelijkbare portie lucht door het grote verschil in dichtheid. Merk op dat deze interactie per deeltje verschilt. Interacties van fotonen (gamma-deeltjes), elektronen en muonen verschillen van elkaar.

Fotonen worden in de scintillatieplaat van de detector niet efficiënt gemeten. Onderweg daar naar toe, dus ook in het beton van tien stralingslengten dik, kan

⁶HighSchool Project on Astrophysics Research with Cosmics. Het project waarbij middelbare scholen samen met wetenschappelijke instellingen een groot netwerk vormen om kosmische straling met extreem hoge energie te kunnen meten.



Figuur 5.3: Foto van een detector in zijn doos. Binnen in de skibox is de lichtgeleider en fotomultiplier te zien.

naast Compton-verstrooiing, paarvorming plaatsvinden. Dat betekent dat er elektronen worden gevormd. Hoewel deze op hun beurt ook weer tot annihilatie kunnen overgaan en zo weer fotonen produceren. Zo kunnen de initiële fotonen voor meer elektronen zorgen. Elektronen worden wel in de detectieplaten gemeten.

Het is de ionisatie in de scintillatie-plaat die gemeten wordt, want die zorgt voor een lichtflitsje, welke op zijn beurt in de foto-multiplier, een te meten spanningspuls veroorzaakt. Naast ionisatie in de detector vindt bremsstrahlung plaats. Deze veroorzaakt echter geen lichtflitsje en wordt derhalve niet gemeten. Bremsstrahlung veroorzaakt door elektronen is veel groter dan het ionisatie verlies. Zoals beschreven is daarentegen bremsstrahlung veroorzaakt door muonen veel kleiner dan het ionisatie verlies. Muonen worden op dezelfde manier in de detector gemeten als elektronen. Onderscheid tussen elektronen en muonen kan met de detectie niet gemaakt worden, ondanks het feit dat een muon een 200 maal zo grote massa als een elektron heeft⁷ [34] [35]. Een muon gaat door dat verschil in massa daarom moeiteloos

⁷Dit kan wel door scintillatie te combineren met het meten van de Cherenkov-straling in bijvoorbeeld water. Een elektron vertoont veel vaker dit soort straling.

door het beton, ook al is dat tien stralingslengten dik. De invloed van een gebouw is dus dat het (bijna) alle elektronen/positronen stopt en de muonen meestal doorlaat. De verhouding in aantallen van fotonen, elektronen en muonen, die gemeten wordt, is als 100 fotonen, 90 elektronen en 9 muonen [36].

Tot slot van deze inleiding nog iets over het meten van de kosmische straling. Wat gemeten wordt, dus waargenomen, verschilt van wat op de grond aankomt. De meetstations waarmee ik gemeten heb bestaan uit vier scintillatorplaten (in vier skiboxen). Door de zogeheten triggerinstelling [37] worden alleen die events gemeten die minstens twee platen binnen een heel kort tijdsbestek raken. Dat voorkomt namelijk dat achtergrondstraling in een plaat ruis geeft; je meet dan ook de *singles*. De invloed van triggering (de tijdinstelling) verandert de aantallen deeltjes niet, maar wel de aantallen waargenomen deeltjes. Een signaal in één enkele scintillator wijst vooral op muonen, omdat er veel en veel meer laag-energetische kosmische deeltjes aankomen bij de aarde en het zijn de muonen die de grootste doordringing hebben en de grond halen; elektronen halen de grond dan niet. Twee scintillatoren naast elkaar, geven door de triggering een coïncidentie als er een lawine langs komt, maar die lawine bevat juist veel meer elektronen dan muonen, dus dan zie je hoofdzakelijk elektronen. HiSPARC doet dat laatste.

5.3 Onderzoeksvraag

HiSPARC stations bestaan uit twee of vier detectoren. Ze hebben vrij zicht op de hemel om kosmische straling op te vangen. Dat betekent dat vanuit alle windstreken en vanuit verschillende hoeken (van recht van boven tot onder een schuinere hoek richting horizon) alle deeltjes door het station moeten kunnen worden opgevangen. Daarom zijn HiSPARC stations normaliter op liefst hoge daken in de openlucht geïnstalleerd.

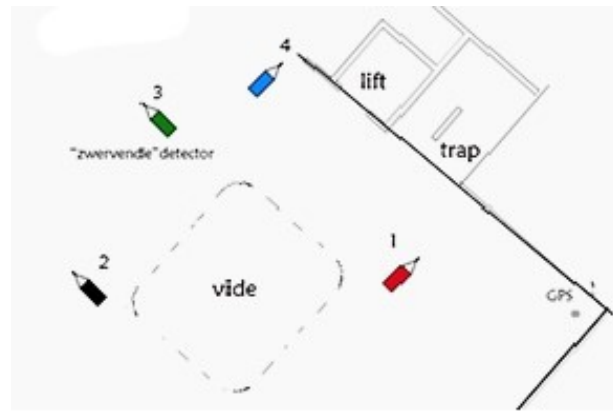
In de ontvangsthal van het Nikhef gebouw echter, is er /'e/'en die zich juist binnen een gebouw bevindt (zie figuur 5.4). Deze heet s507 en het is een 4-plaatsstation. Drie van de vier platen hebben een vaste plek aan het plafond gekregen in een bijna gelijkzijdige driehoek. De vierde detector is ook werk-



Figuur 5.4: S507, de *zwervende* detector als demonstratie model.

zaam, maar staat onder een hoek van ongeveer 30 graden ten opzichte van de horizontaal (figuur 5.5). Het is het een demonstratie model van een HiSPARC station voor bezoekers. De detector zit in een soort uitstalkast die los op de vloer staat. Dat is mooi voor bezoekers die de verschillende onderdelen kunnen zien.

Met behulp van dit station 507 zou de invloed van de aanwezigheid van materiaal waarvan het gebouw gemaakt is, kunnen worden bestudeerd. Want er be-



Figuur 5.5: De geometrie van station 507 in de receptie hal van Nikhef. De detectoren 1, 2 en 4 hebben een vaste positie aan het plafond. Detektor 3 heeft geen vaste positie in een gebied met een straal van ongeveer 2 meter.

vinden zich vier vloeren inclusief het dak boven, maar andere een bepaalde hoek kan de detector via een vide en daklicht rechtstreeks de hemel zien.

Naast het onderzoek aan s507 is de onderzoeksvraag uitgebreid naar een breder focus. Twee stations: s506 en s508 bevinden zich wel buiten op een dak, maar aan de voet van een gebouw van 66 m (zie figuur 5.6). Deze lijkt een kosmische schaduw te werpen op deze twee stations. Het leek mij een zinvol idee om in navolging van de gebouw-invloed op detectie van s507, ook eens te onderzoeken wat de invloed van de toren is op de genoemde andere stations.

Het doel van dit onderzoek bestaat uit vier delen. Ten eerste het optimaliseren van de afstelling van s507, zodat deze op gelijkwaardige manier meet in relatie tot de stations rondom. De gegevens van dit station zijn vergeleken met de buurstations op het dak, als in de buurt een shower werd gedetecteerd. De stations waarmee ik de meetgegevens heb vergeleken zijn 501, 505, 506, 508, 510, en 511, waaronder dus ook de eerder genoemde 506 en 508 zitten. De gegevens welke zijn onderzocht, zijn de volgende:

- stralingslengte in lucht en gebouwmassa.
- aantal events of de detectiefrequentie. Hoe vaak

(gemiddeld) per seconde een detectie plaatsvindt.

- pulshoogten. Informatie over de veroorzaakte signaalsterkte door de deeltjes.
- resultaten van de richtings reconstructie van de coincidenties. Azimut- en zenitverdeling⁸

Door het grote verschil in dichtheid zullen er hoogstwaarschijnlijk meer interacties van de te meten deeltjes in beton plaatsvinden dan in een vergelijkbare portie lucht. Het is wel zo dat deze interactie per deeltje verschilt, zoals in de inleiding beschreven. Interacties van fotonen (gamma-deeltjes), elektronen en muonen verschillen van elkaar. Vanwege de aanwezigheid van het bouw materiaal is het dan aannemelijk is dat er door s507 wellicht minder events gemeten worden. Dat komt door de verhouding in aantallen van fotonen, elektronen en muonen.

De vragen die ik uiteindelijk wil proberen te beantwoorden zijn de volgende:

- Kan een station binnen of nabij een gebouw gebruikt worden in het HiSPARC netwerk?
- Is er een verlies in efficiëntie en/of resolutie, en zo ja hoe groot is dat verlies?
- Zijn er educatieve voordelen te behalen als blijkt dat dit mogelijk is?

5.4 Werkwijze

Inregelen PMTs van s507.

Omdat fotomultiplierbuizen (PMTs) onderling sterk van elkaar kunnen verschillen, het zijn handgemaakte onderdelen, is het van belang hiermee rekening te houden. De bedoeling is dat de instelling van de hoogspanning over de dynodes⁹ van de buizen zodanig is dat de versterking dezelfde is als die bij andere stations om tot een juiste vergelijking van de data met andere stations te kunnen komen. Met behulp van het HiSPARC info blad Inregelen PMTs [38] heb ik per detector de spanning zodanig ingesteld dat de

⁸Zie bijlage voor verklaring van de begrippen.

⁹Zie bijlage

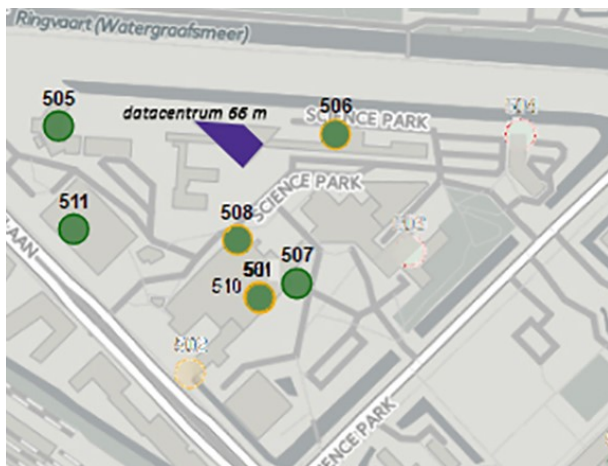


Figuur 5.6: Overzicht van de betrokken HiSPARC stations op het Science Park bij het onderzoek en de situering van de 66 m hoge toren van het Data Centre.

detectie van 1 MIP overeenkomt met een spanning van 200 mV. Het bleek een lastige klus te zijn want de pulshoogtehistogrammen van de vier detectoren bleven onregelmatige en verschillende curven vertonen.

Uiteindelijk bleek tijdens het vaststellen van de azimut- en zenitcorrelatie van twee stations, dat het uitsluiten van de data van detector 3 (die los op de grond staat) tot betrouwbaarder resultaten leidde. Dit is dan voor dit onderdeel van het onderzoek aangehouden.

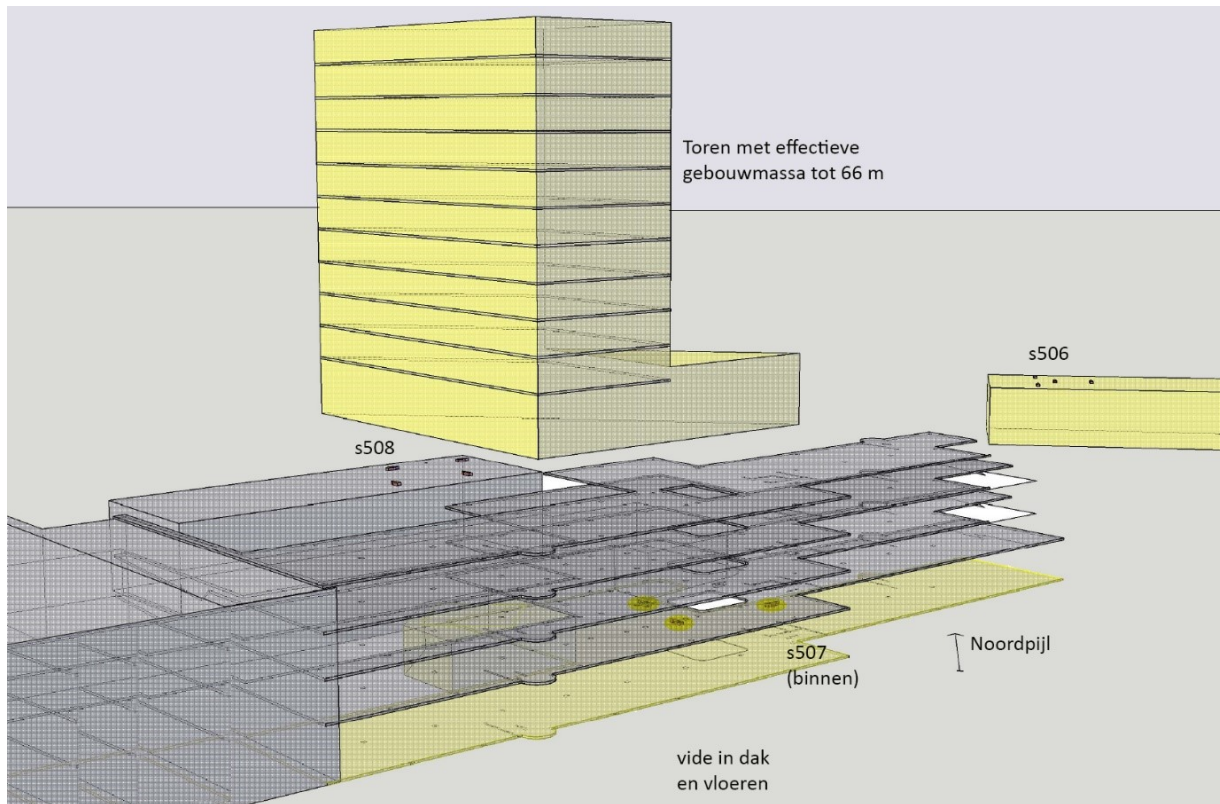
Voor het onderzoek heb ik naast de data van 506, 507 en 508, gebruik gemaakt van de data van de volgende stations: 501, 505, 510 en 511, tezamen dus zeven stations (zie figuur 5.7). Voor deze HiSPARC stations heb ik gecontroleerd of in een bepaalde periode alle detectoren van deze stations onafgebroken data hebben geproduceerd. Dit was het geval voor de periode van 4 oktober 2015 tot en met 16 februari 2016. Dit is de dataperiode, die ik voor alle deelonderzoeken heb aangehouden.



Figuur 5.7: Overzicht van de betrokken HiSPARC stations op het Science Park bij het onderzoek en de situering van de 66 m hoge toren van het Data Centre.

Vergelijking aantal events

Per uur worden typisch zowat 2000 tot 3000 events geregistreerd in een station. De vraag is wat s506, 507 en 508 laten zien. Na de check in de public database van de events/uur van alle dataleverende stations over de dataperiode, heb ik een vergelijking gemaakt van het aantal events in de dataperiode. De deeltjesdichtheid per detectorplaat is berekend door te kijken naar de MIP-waarden. Er is een onder- en bovendrempel van de MIP-waarde ingesteld voor de detectie van respectievelijk 0,65 en 11. Op deze manier zijn de counts (aantallen) per station vergelijkbaar en objectiviteit ingebouwd. Bij deze dataverzameling zijn alle vier detectoren van s507 meegenomen. Het gebruikte SAPHIRE-script: zie bijlage SCRIPT_aantallen events_4mnd_501505506507508510511



Figuur 5.8: Situatie ligging stations ten op zichte van gebouwmassa.

Vergelijking pulshoogten

Met gebruikmaking van dezelfde onder- en bovendrempel heb ik een vergelijking van de pulshoogten van een aantal stations zichtbaar gemaakt. Het gebruikte SAPHIRE-script in de bijlage SCRIPT_pulshoogten_events_4mnd_501505506507508510511_B

Vergelijking correlatie azimut- en zenitverdeling van een aantal stations

In dit onderdeel van mijn onderzoek zijn stations 501, 507 en 510 in de dataperiode paarsgewijs vergeleken wat betreft azimut- en zenitverdeling. Het is aanneemelijk dat deze stations de afzonderlijke airshowers op dezelfde manier zien en meten wat betreft de richting hoe ze op de grond aankomen. De correlatie

van respectievelijk de azimuthoek (ϕ) en de zenithoek (θ) per twee stations is hier zichtbaar gemaakt. Dit heet de richtingsreconstructies van de events. Het is gebleken dat het grootste aantal coincidenties gemeten wordt in het zenithoekbereik van 19° - 23° [39]. Bij een groter wordende hoek neemt de weg door de atmosfeer toe en het aantal stralingslengten. Detectie neemt derhalve af ondanks het feit dat airshowers wel onder grotere hoeken plaatsvinden. Bij kleinere hoeken dan 10° neemt de nauwkeurigheid van de zenithoekmeting af omdat de weglengteverschillen relatief kleiner worden¹⁰.

Omdat deze beperkingen gelden voor alle stations, waarmee ik s507 heb vergeleken, kan ik zo de resultaten van s507 op een juiste manier vergelij-

¹⁰Zie bijlage

ken met de andere stations. S501 en s510 hebben vrij zicht. Ook als er voorkeurshoeken in de azimut zouden kunnen bestaan, dan geldt dit voor alle te vergelijken stations omdat ze op een afstand van elkaar staan van niet meer dan 35m. Om tot een valide vergelijking te komen tussen de stations met s507, is steeds eenzelfde aantal events genomen en als correlatie uitgezet. Uit de data retrieval blijkt dat s507 88976 keer in coïncidentie is geweest in de dataperiode. Voor de correlatie vergelijkingen heb ik steeds met dit aantal (90.000) events de scatterplot laten maken om vergelijkbare plaatjes te krijgen. De onderzoeksvraag of s507 wel of niet hetzelfde beeld laat zien als de andere stations ga ik met deze werkwijze proberen te beantwoorden. Het gebruikte SAPHIRE-script staat in bijlage SCRIPT_correlatie_4mnd_501505506507508510511.

Vergelijking correlatie azimut- en zenitverdeling met gebouwmassa

In dit onderzoeksdeel heb ik voor de stations 506, 507 en 508 de gemeten events laten reconstrueren naar de verdeling van azimut en zenit in een polair diagram. Dat betekent dat de azimut van 0 naar 360° rondom de cirkel vanaf oost, tegen de klok in gaand, dus richting noorden, is uitgezet. De zenit is uitgezet van 0 naar 90° (in radialen¹¹) van het middelpunt tot de buitenzijde van de cirkel. In hetzelfde polair diagram is ook de gebouwmassa uitgezet. Hierbij heb ik gekeken, vanuit het zwaartepunt van de vier platen van de afzonderlijke stations naar de hoeveelheid gebouwmassa die ik in elke richting rondom (azimut) en naar hoogtegraad (zenit) tegenkom.

Voor s507, welke op de begane grond in de hal van een gebouw van vier bouwlagen staat, heb ik rekening gehouden met het feit dat s507 dichterbij de zuidoost-gevel hangt en dat zich daar een glasstrook ter plaatse van het trappenhuis bevindt. Hierbij is ook rekening gehouden met het feit dat temidden van de detectorplaten een vide is gesitueerd met afmetingen van 6 bij 6 m in vier vloeren van het gebouw. Zie hiervoor figuur 5.8.

Deze polaire verdeling van events in relatie met ge-

bouwmassa, heb ik ook gedaan voor de stations 506 en 508. Deze liggen weliswaar buiten op daken, maar zien in respectievelijk in westelijke richting op 65 m afstand en noordelijke richting op 70 m afstand een gebouw staan van 66 m hoog. Het is weer de vraag of de gebouwinvloed zichtbaar zal zijn in de verdeling van de events. De onderzoeksvraag komt neer of de massa van het gebouw te herkennen is in de polaire azimut- en zenitverdeling.

5.5 Resultaten en bespreking

Vergelijking aantal events

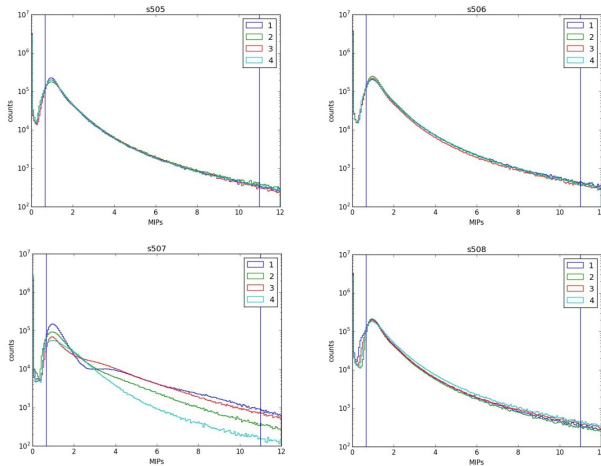
station	Aantal gemeten events in de dataperiode		
	alle	selectie	verhouding
501	32.739.792	15.331.505	1,00
505	28.562.900	14.198.984	0,93
506	31.922.584	15.902.819	1,04
507	17.502.580	8.213.764	0,54
508	27.902.456	14.101.678	0,92
510	26.009.996	13.246.343	0,86
511	27.341.716	14.104.617	0,92

Tabel 5.1: Aantal gemeten events in periode 4 oktober 2015 - 16 februari 2016. In de tweede kolom staan de totale aantallen en in de derde kolom de selectie tussen de MIP-waarden 0,65 en 11. In de laatste kolom staan de onderlinge verhoudingsaantallen

Uit tabel 5.1 en figuur 5.9, de weergave van de aantallen events in de dataperiode blijkt dat s507, binnen in de hal van het Nikhef-gebouw, eruit springt; het aantal events is beduidend minder. Grofweg registreert station 507 de helft van de omringende, buiten geplaatste stations. Zoals uiteengezet is in de inleiding is dit verschil in aantal te wijten aan het verschil in detectie van het aantal elektronen. Door de hoge graad van interactie in het beton (met name als bremsstrahlung) worden minder elektronen gedetecteerd. Muonen gaan deze interactie in het beton niet aan, maar door het verhoudingsgewijs groter aantal elektronen (10 keer zoveel), zien we het aantal events drastisch dalen in s507.

Voor s506 en s508 is er geen terugloop in het aantal geregistreerde events te zien.

¹¹360° komt overeen met 2π radialen



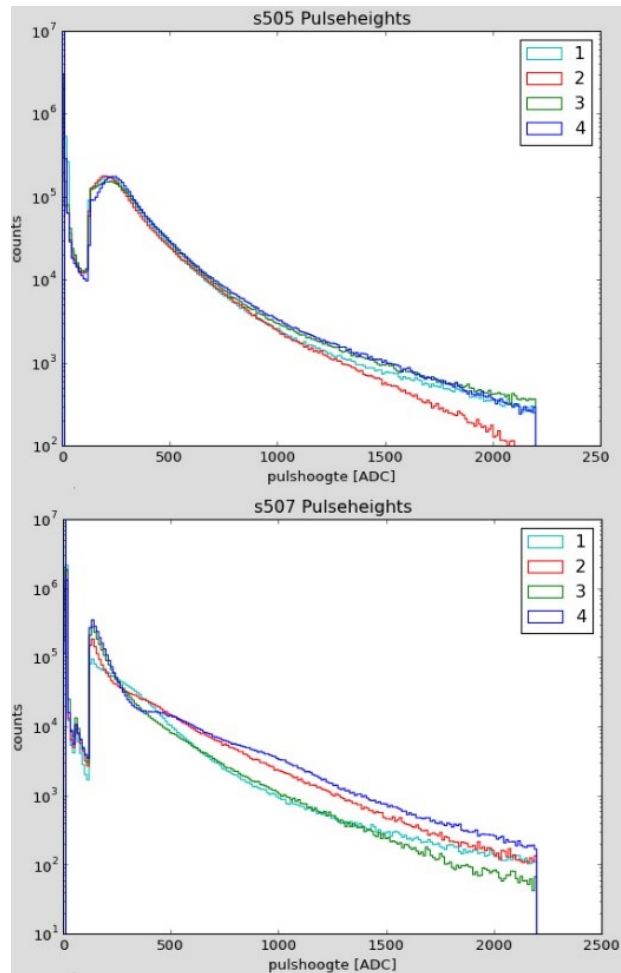
Figuur 5.9: Histogrammen van S505, 506, 507 en 508. De deeltjesdichtheid per detectorplaat is berekend door te kijken naar de MIP-waarden. Er is een onder- en bovendrempel voor de detectie ingesteld van respectievelijk 0,65 en 11 MIP.

Vergelijking pulshoogten

Figuur 5.10 toont de histogrammen van de pulshoogten van een aantal stations. Behalve s507 laten alle histogrammen hetzelfde beeld zien met inbegrip van s506 en s508, de stations aan de voet van het Data Centre. Deze gebouwmassa heeft kennelijk geen invloed op de pulshoogtenverdeling. Die van s507 laat een andere verdeling zien. Puntiger in de MIP pieken en grilliger, grotere pulshoogten. Het is moeilijk een verklaring te vinden hiervoor, gezien de inspanningen die zijn geleverd om de PMT-spanning af te stellen. Showering in beton is waarschijnlijk een reden.

Vergelijking correlatie azimut- en zenitverdeling van een aantal stations

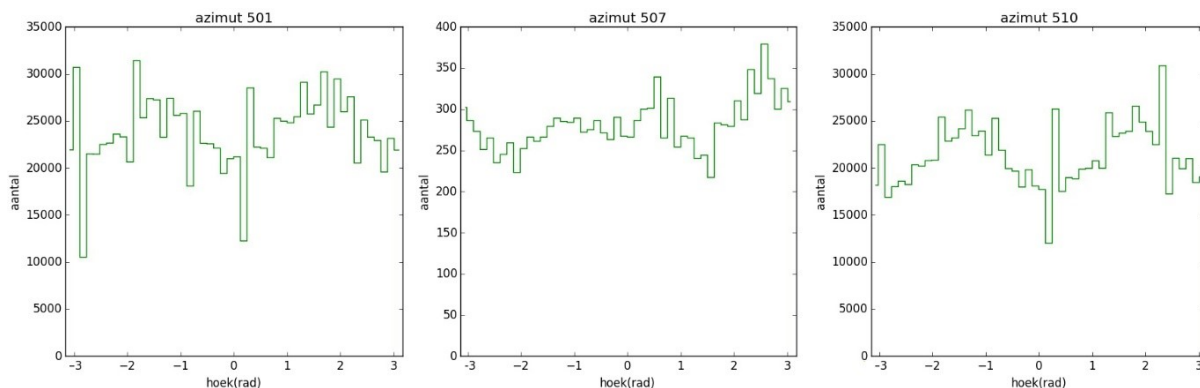
Bij de weergave van de single stations in figuur 5.11 en 5.12 vallen een aantal zaken op. De azimut verdeling van alle drie stations laat geen vlakke verdeling zien. Een verklaring hiervoor ligt in de configuratie van de ligging van de vier detectoren ten opzichte van elkaar. In de ruitvormige configuratie is een korte en een lange as. De coïncidentie van de platen op de



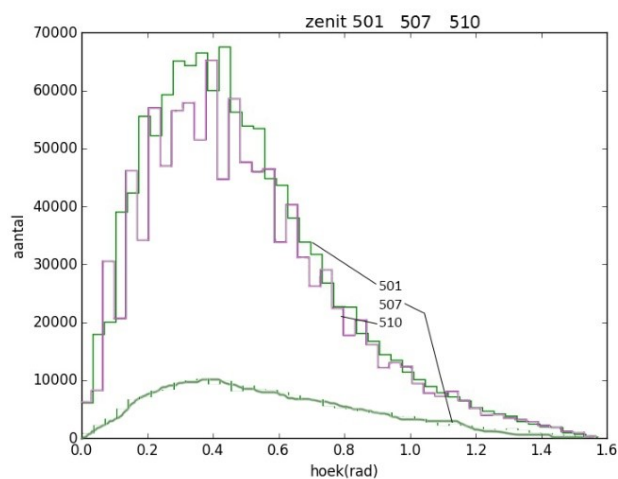
Figuur 5.10: Histogrammen van pulshoogten in S505 en 507.

korte as vindt vaker plaats dan die op de lange as, omdat dit simpelweg een kwestie van onderlinge afstand is. Dit resulteert aldus in een berg en een dal om de 90° . Een correctie hiervoor heeft niet plaatsgevonden. Verder is het aantal counts van de reconstructies van s507 100 keer minder dan van s501 en s510.

Vanwege deze constatering zijn de hiernavolgende gereconstrueerde richtingen gedaan met eenzelfde aantal events. Dit aantal is bepaald door de gemeten



Figuur 5.12: Resultaten van de richtingsreconstructie van de stations 501, 507 en 510. De azimuthhoek ϕ laat een niet-vlakke verdeling zien.



Figuur 5.11: Resultaten van de richtingsreconstructie van de stations 501, 507 en 510. De zenithoek θ laat een verdeling met de piek rond 0,36 rad (20°) zien.

events van s507. Na de correctie in aantallen events laat de correlatie waarbij s507 betrokken is een diffuser beeld zien van de verdeling (zie figuur 5.13 en 5.14. Dit aan duiden op meer verstrooiing in de gebouwmassa. Een geladen deeltje dat het beton passeert wordt afgebogen door veel kleine hoek verstrooiingen. De meeste afbuiging die hier plaatsvindt komt door Cou-

lomb verstrooiing van de kernen. Deze verstrooiing is tamelijk precies beschreven door de theorie van Molière en de gemiddelde verstrooiingshoek wordt gegeven door:

$$\theta_0 = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0}\right) \quad (5.1)$$

Waarbij p , βc en z , respectievelijk, de impuls, snelheid en lading van het passerende deeltje (hier elektron/positron); x/X_0 is de dikte van het beton in stralingslengten. Ingevuld met $x = 253 \text{ g/cm}^2$; $X_0 = 26,6 \text{ g/m}^2$ en $p = 1 \text{ s GeV/c}$ leidt dit tot: $\theta_0 = 0.04 \text{ rad}$ ($2,3^\circ$). Een bescheiden mate van multiple scattering is hier reden voor het beeld van de azimuth- en zenitverdeling gezien door s507 in de hal van het Nikhef-gebouw.

Vergelijking correlatie azimuth-/zenitverdeling met gebouwmassa

In figuur 5.15 is de azimuth- en zenitverdeling samen met gebouwmassa in een diagram te zien. De gekleurde stippen geven volgens legenda de aantallen coïncidenties aan op de gegeven posities voor elk afzonderlijk station. De zwarte contour geeft voor s506 en s508 de positie aan waar het Data Centre gebouw van 66 m het vrije zicht gezien vanuit het zwaartepunt van de stations het vrije zicht blokkeert. De

zwarte contour bij s507 geeft daarentegen de oriëntatie aan waar zich minder gebouwmassa bevindt, te weten de vide en de zuidoostelijke gevel.

In de polaire diagrammen van s506 en s508 zou slechts onderscheid in een verminderd aantal bins te ontdekken moeten zijn, binnen de sector van het gebouw, onder de zenithhoek groter dan 65 ($0,9$ rad). Dat is dus al tamelijk richting horizon. Dit is ook te volgen in de figuren 5.16 en 5.17.

De vermindering is ongeveer 30-40% in de genoemde bins van net onder de 10 coïncidenties (in de diagrammen de blauwe stippen). Figuur 5.17 geeft voor s506 en 508 een onderscheid in azimutverdeling voor kleinere en voor grotere zenithhoeken, wat neerkomt op respectievelijk ver van de horizon en meer richting horizon gezien, vanuit de detectoren. Voor de in de figuur 5.17 genoemde high- verdeling is er geen gebouwmassa en zou daarin geen invloed te zien moeten zijn. Voor de low-verdeling, die gesteld vanaf $0,87$ (50°), van waaraf het gebouw in beeld komt, zou een aftekening mogelijk kunnen zijn. In de verdeling van s508 is gezien in de richting van het Data Centre is een iets verlaagd aantal (1500) reconstructies gemeten.

5.6 Conclusies en aanbevelingen

De vaststelling dat er minder events door s507, binnen in het gebouw, worden gemeten is evident. De invloed van het gebouw doet zich hier gelden. De vermindering van het aantal events gemeten door s506 en 508, aan de voet van een hoog gebouw in de buurt, is echter niet vastgesteld. De diffuser verdeling van de azimut- en zenitverdeling bij een vergelijking van twee stations, waarbij s507 aanwezig is, is ook evident. De vraag is of de reden hiervoor gezocht moet worden in multiple scattering in het beton boven s507, want deze laat slechts een kleine hoekafwijking zien. Het is lastig gebleken om uit de vergelijking van de hoekenverdeling van gemeten coïncidenties met de gebouwmassa een correlatie vast te stellen. De beelden en aantallen geven te weinig aanleiding hiervoor. Wellicht zou met een nauwkeurigere tomografie en meer data een duidelijker beeld kunnen worden verkregen.

Hier volgen een aantal suggesties voor een vervolg

onderzoek.

Een HiSPARC detectiestation dichterbij de voet van het Data Centre plaatsen zou ook een bijdrage kunnen leveren om een verband in beeld te kunnen krijgen. Eventueel zou s506 op het dak van de oude versneller opgeschoven kunnen worden richting gebouw. Zo zou het gebouw ook al bij kleinere zenithhoeken zijn schaduw werpen, wat bij de positie in dit onderzoek pas het geval was vanaf 50° .

Een vlakker verdeling van azimut laten reconstrueren dan in onderhavig onderzoek (figuur 5.12) om tot een gemakkelijker vaststelling van afwijkingen te kunnen komen.

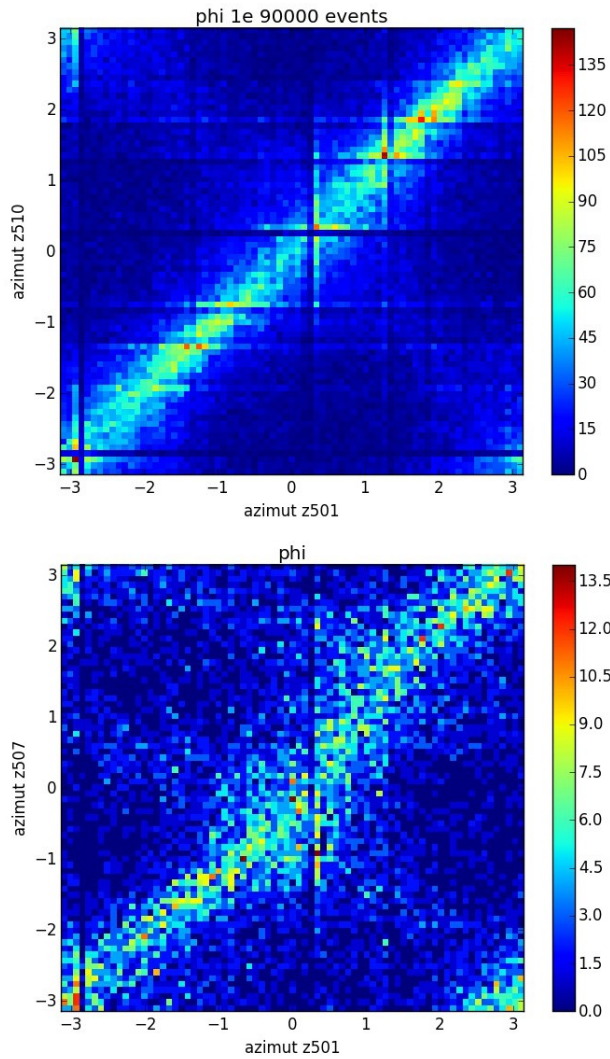
Pulshoogten nader te onderzoeken door betere afstelling pmts en gebruik van nog meer data.

Schoner data te verkrijgen door de data van een station te beschouwen in combinatie met twee andere naastliggende stations. Hierdoor kunnen alleen die data gebruikt worden die in coïncidentie zijn, waarmee grotere objectiviteit wordt gehaald.

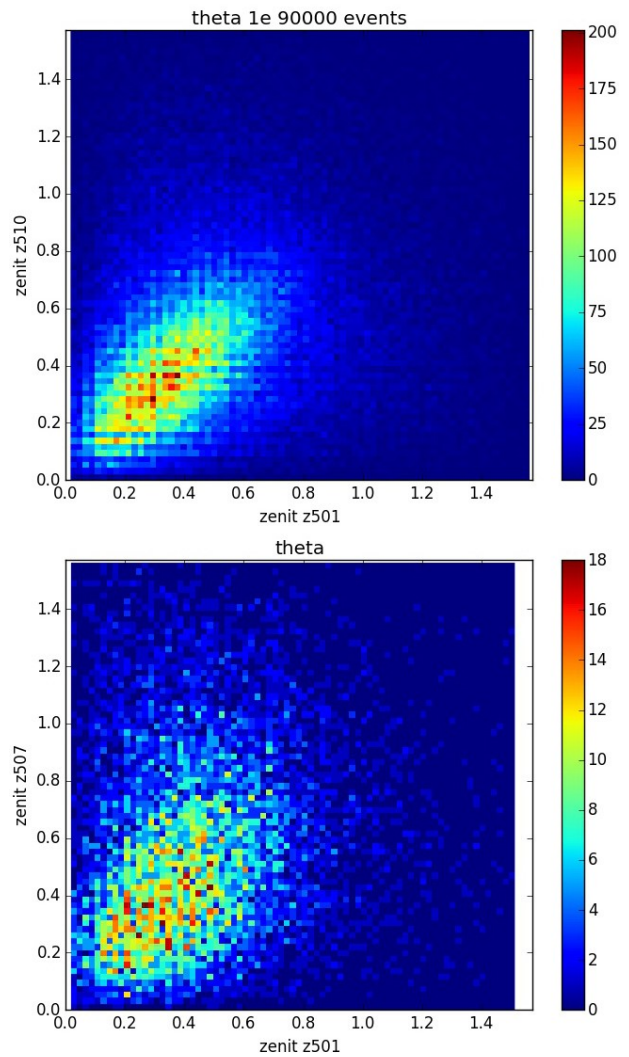
Mijn uiteindelijke conclusie is dat het zeker aanbeveling verdient om HiSPARC stations binnen te plaatsen. Naast het tonen van de detectoren is het de moeite waard om het verschil te onderzoeken veroorzaakt door gebouwmassa. Vervolg onderzoek zou ook gedaan kunnen worden met s1009, een meetstation die ook binnen staat in het FOM-gebouw in Utrecht.

Dankwoord

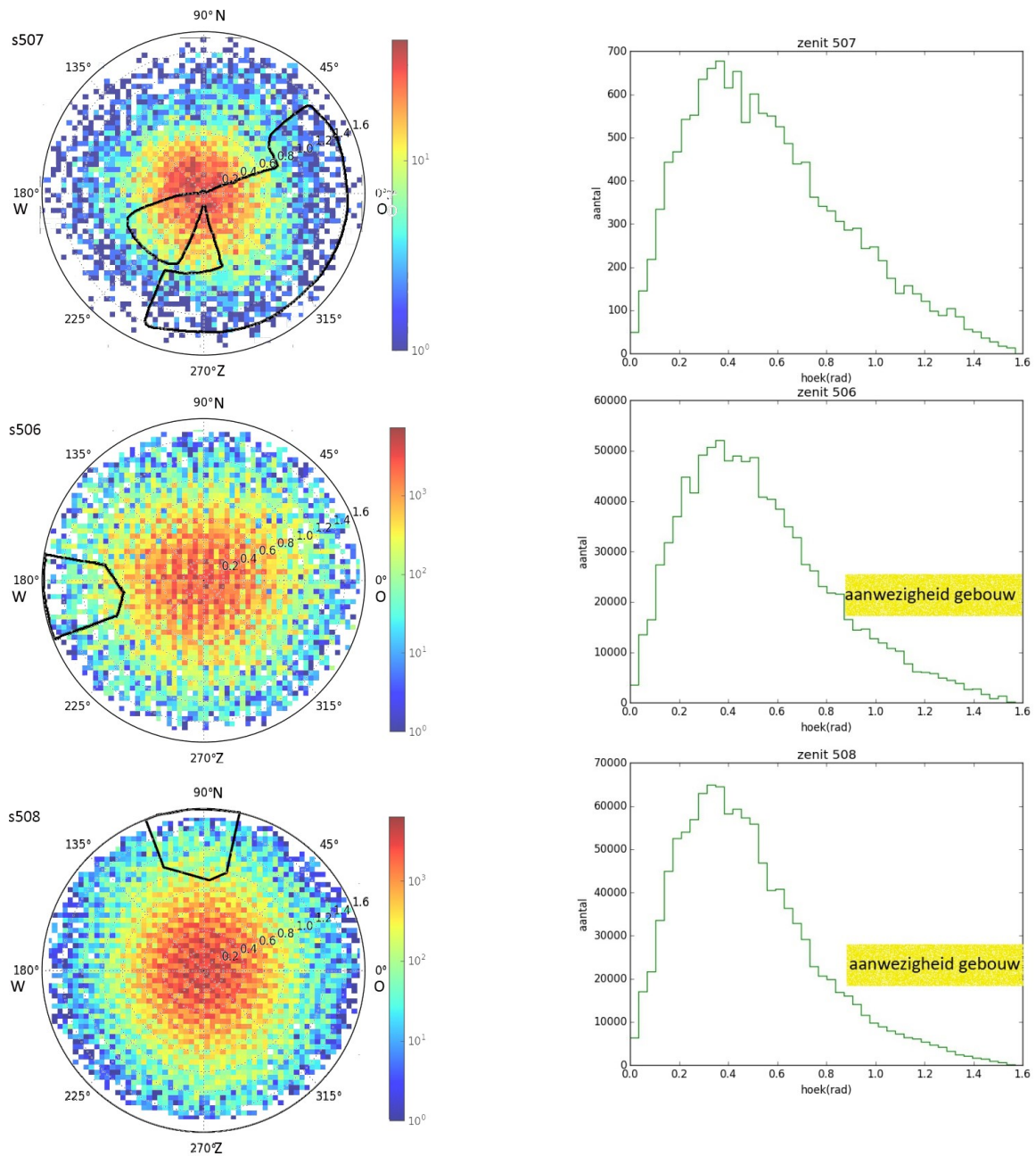
Ik had dit onderzoek met als resultaat dit verslag niet kunnen uitvoeren zonder de hulp van een aantal mensen die ik hier wil noemen. Ik dank prof. dr. ing. B. van Eijk die mij deze mogelijkheid gaf door mij als Leraar In Onderzoek aan te stellen voor het afgelopen jaar. Ik dank dr. J. Steijger met zijn aansprekende, kritische, verhelderende en scherpe begeleiding gedurende het hele jaar. De heren Arne de Laat, Niek Schultheiss en David Fokkema met hun onmisbare support op het gebied van de dataverwerking. En last but not least, dank voor de leuke gesprekken en gezelligheid op de werkkamers met Gideon, Sabine, Reno en Tom.



Figuur 5.13: Correlatie azimuthverdeling tussen twee stations. Om s507 goed te kunnen vergelijken heb ik naast de correlatie 501-510, de laatste ook gegeven van de eerste 90.104 coincidenties (van de 145.104). Dit is hetzelfde aantal als het totaal aantal coincidenties van s507 (88976).

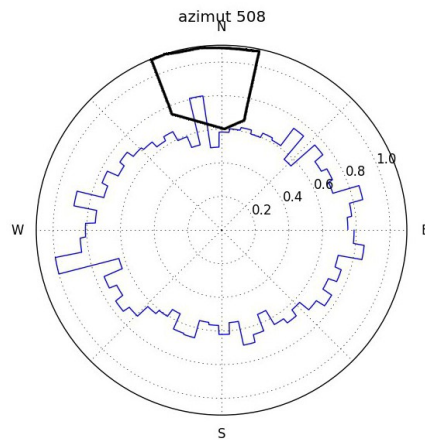
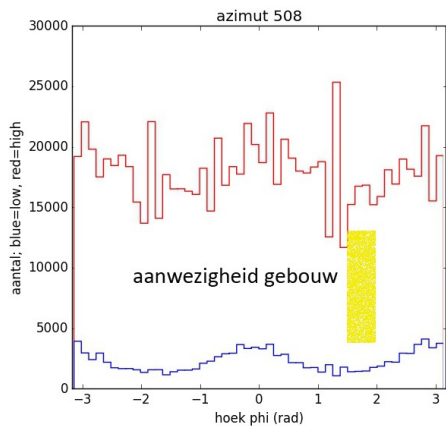
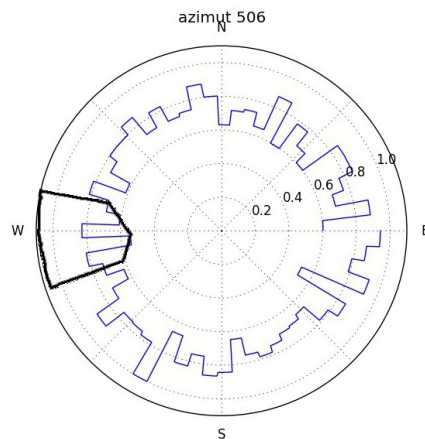
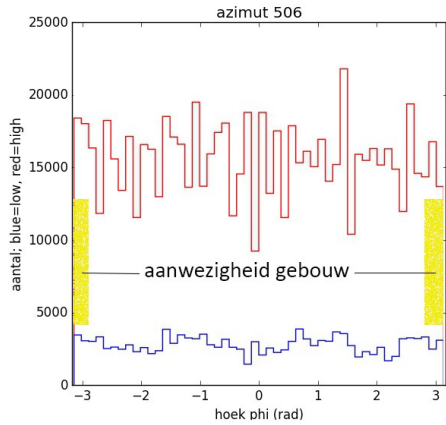
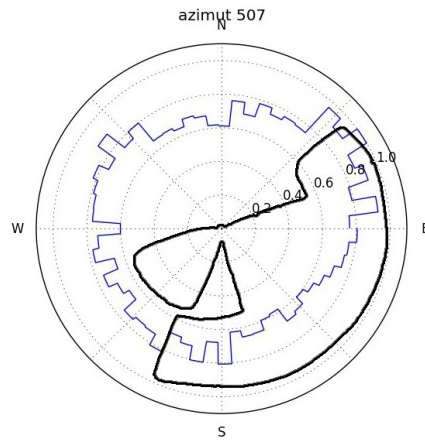
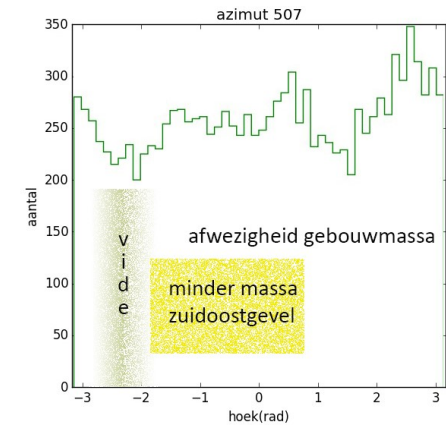


Figuur 5.14: Correlatie zenithverdeling tussen twee stations volgens beschrijving bij figuur 5.13.



Figuur 5.15: Visualisatie van azimut-/zenitverdeling van drie stations in relatie met (het ontbreken) van gebouwmassa

Figuur 5.16: De zenitverdelingen van s5507, 506 en 508. Bij laatstgenoemde twee is het hoekbereik aangegeven waar het gebouw van het Data Centre in beeld komt.



Figuur 5.17: De azimutverdelingen van s507, 506 en 508. Bij laatstgenoemde twee is onderscheid gemaakt in een verdeling hoog aan de horizon, waar geen gebouwinvloed is (rood) en lager aan de horizon waar het gebouw in beeld komt (blauw)

Figuur 5.18: Histogrammen polair geconfigureerd in combinatie met aan- en afwezigheid gebouwmassa.

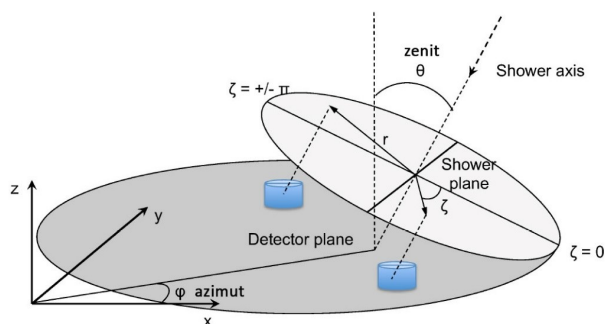
5.7 Bijlage

ADC counts De digitale waarden die uit de ADC komen. Deze hebben geen eenheid, maar kunnen door middel van kalibratie vertaald worden naar millivolt. Dit kan waarden tussen 0 en 4095 aannemen, hetgeen ongeveer overeenkomt met +0,113 V tot 2 V.

Atmosferische diepte is de hoeveelheid materiaal (massa) die een deeltje passeert per oppervlak; op zeeniveau komt dat neer op 1030 g/cm^2

	Lucht	Beton
$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,0013 (op zeeniveau)	2,3
Stralingslengte (g/cm ²)	36,7	26,57
Atm. diepte (g/cm ²)	1030	2,3 g/cm ² (gem. dikte van beton boven s507 is 1,1m)
Aantal stralingslengten	28 (1030/36,7)	10 (2,3 × 1,1)/26,6
Interactielengte (g/cm ²)	90,0	-

Tabel 5.2: Een vergelijking van de stralingslengten in lucht en in beton (het karakteristieke materiaal waar de te onderzoeken gebouwen van gemaakt zijn.)



Figuur 5.19: zimuth en zenit.

Zenit De zenit is het punt recht boven de waarnemer. Als we spreken over een zenit hoek is het de hoek tussen een punt aan de hemel en het punt recht omhoog.

Azimuth Dit is de kompasrichting van een punt, dus de hoek tussen het noorden en het punt, met de klok mee draaiend. Door meer dan $1/e$ en detector te gebruiken in een station is het mogelijk dat een hoog-energetische air shower meer detectoren bereikt. De geometrie (zenit/azimuth) bepaalt welke detector het eerst meet en met deze tijdsverschillen kan vanaf 3 detectoren de richting waar de shower vandaan kwam gereconstrueerd worden.

Coïncidenties Als meerdere stations een detectie kort na elkaar doen is het waarschijnlijk dat ze dezelfde deeltjeslawine gedetecteerd hebben. In z'n geval wordt er gesproken over een coïncidentie. Stel s501 en s510 detecteren beide 100 events, en ik registreer 25 coïncidenties, dan was de efficiëntie van 501 en 510 maar 0,5, want $0,5 \times 0,5 = 0,25$ en $0,25 \times 100 = 25$, teruggerekend. Het werkelijke aantal events zou dan 200 voor elk station zijn geweest. Dus efficiency is dan 0,5 per station naar elke plaat gemeten: $0,5 = \epsilon(\text{plaat}_1) \times \epsilon(\text{plaat}_2) \times 6 < 6$ is aantal combinaties in een 4-plaats station) $\epsilon(\text{plaat}) = (0,5 / 6)^0,5 = 0,29$ Het risico van niet gelijke efficiency van platen onderling in een station heeft geen consequenties voor de meting van coïncidenties, want de *zwakste schakel*, de plaat met de kleinste efficiency trekt de levering aan coïncidentie uitkomsten gelijk.

Detectie We kunnen elektronen en muonen meten in de detectoren vanwege de omzetting van de kinetische energie van deze deeltjes in ionisatie energie. Deze omzetting op zijn beurt redelijk evenredig met de geproduceerde lichtflitsjes in de detector en deze lichtflitsjes produceren weer redelijk evenredig een spanning in de PMT. Deze wordt gemeten en zichtbaar gemaakt en levert uiteindelijk de data.

Drempel Threshold. De drempelwaarde is de sterkte van een signaal dat nodig is om de HiSPARC elektronica het te laten herkennen als een significant signaal. Pas als meerdere detectoren een sterk signaal geven zal er een detectie zijn. Dit wordt gebruikt om zwakke achtergrond straling en ruis te filteren.

Event De standaard trigger voorwaarde voor een twee-plaats opstelling is minimaal twee detectoren

met een piekwaarde boven de 70mV en voor vier detectoren 30 mV. Een event wordt geregistreerd als binnen een fractie van enkele nanoseconden meerdere detectoren getriggerd worden. Dan is het waarschijnlijk dat er sprake is van een gemeten airshower in plaats van ruis.

Fotomultiplierbuis met dynodes Een foto versterker buis kan de fotonen uit de scintillator omzetten in een meetbaar elektrisch signaal voor de HiSPARC elektronica. De fotonen maken in de de zeer dunne metaallaag op de kop van de buis enkele elektronen los. Deze worden vervolgens, via een tiental dynodes met een flink potentiaal verschil versneld en vermeerderd. Aan het eind van de buis kan zo een meetbare spanning gedetecteerd worden.

Interactielengte ook een eigenschap van materiaal, dit is de gemiddelde afstand voordat een hoog-energetisch hadron hadronische interactie ondergaat. MIP Minimaal ioniserend deeltje. Minimum Ionizing Particle (MIP). Een deeltje met een dermate grote energie dat het weinig energie verliest door ionisatie. In de registratie van de pulshoogte (hoeveel elektrische spanning in de foto multiplier buis) is gebleken dat in de MIP-piek waarschijnlijk slechts $1/e$ een deeltje werd gedetecteerd. Een vergelijking van de frequentie van de MIP-pieken per station per detector geeft aan hoeveel events geregistreerd worden. Per uur worden typisch zowat 2000 tot 3000 events per station geregistreerd.

Stralingslengte een eigenschap van materiaal, is de gemiddelde afstand in het materiaal waarin het (kinetische) energieverlies ten gevolge van bremsstrahlung van een elektron, of ander deeltje, is verkleind met een factor $1/e$ ($\approx 0,37$).

Gebruikte Python-SAPPHIRE scripts

Een introductie in SAPPHiRE kan gelezen worden in ref. [40].

SCRIPT_aantallen_events_4mnd_501505506507508510511

```
from pylab import *
import datetime
import tables
from sapphire import esd
import numpy as np
START = datetime.datetime(2015, 10, 4)
END = datetime.datetime(2016, 2, 16)
STATIONS = [501,505,506,507,508,510,511]
THRESHOLD_1 = .65
THRESHOLD_2 = 11

if __name__ == '__main__':
    if 'data' not in globals():
        data = tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r')

    for station in STATIONS:
        if '/s%d' % station not in data:
            esd.download_data(data, '/s%d' % station, station, start=START, end=END)

def plot_grens():
    for station in STATIONS:
        events = data.get_node('/s%d' % station, 'events')

        figure()
        for i in range(1, 5):
            hist(events.col('n%d' % i),
                 bins=linspace(0, 12, 201), histtype='step')
            title('s%d' % station)

        legend(range(1, 5))
        yscale('log')
        axvline(THRESHOLD_1)
        axvline(THRESHOLD_2)
        xlabel('MIPs')
        ylabel('counts')

for station in STATIONS:
    events = data.get_node('/s%d' % station, 'events')
    for i in range(1, 5):
        allemaal = events.col('n%d' % i)
```

```
sel = allemaal.compress((THRESHOLD_2 > allemaal) & (allemaal > THRESHOLD_1))
print len(allemaal), len(sel)

plot_grens()
```

SCRIPT_pulshoogten_4mnd_501505506507508510511_B

```
from pylab import *
import datetime
import tables
from sapphire import esd
import numpy as np

START = datetime.datetime(2015, 10, 4)
END = datetime.datetime(2016, 2, 16)
STATIONS = [501,505,506,507,508,510,511]
THRESHOLD_1 = .65
THRESHOLD_2 = 11

if __name__ == '__main__':
    if 'data' not in globals():
        data = tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r')

    for station in STATIONS:
        if '/s%d' % station not in data:
            esd.download_data(data, '/s%d' % station, station, start=START, end=END)

def plot_pulshoogte():

    for station in STATIONS:
        events = data.get_node('/s%d' % station, 'events')

        figure()
        ph = events.col('pulseheights')
        bins = linspace(0, 2500, 201)
        hist(ph,bins, histtype='step', log =True),

        title('s%d Pulseheights' % station)

        legend(range(1, 5))
        yscale('log')
        xlabel('pulshoogte [ADC]')
        ylabel('counts')

plot_pulshoogte()
```

Bijlage: data waarmee gewerkt is

```
quatroeventcoinc_4mnd.h5 (File) ''
Last modif.: 'Mon Apr 25 15:30:57 2016'
Object Tree:
/ (RootGroup) ''
/coincidences (Group) ''
/coincidences/c_index (VLArray(2019594,)) ''
/coincidences/coincidences (Table(2019594,)) ''
/coincidences/s_index (VLArray(126,)) ''
/hisparc (Group) ''
/s501 (Group) ''
/s501/events (Table(8184948,)) ''
/s501/reconstructions (Table(8184948,)) ''
/s505 (Group) ''
/s505/events (Table(7140725,)) ''
/s505/reconstructions (Table(7140725,)) ''
/s506 (Group) ''
/s506/events (Table(7980646,)) ''
/s506/reconstructions (Table(7980646,)) ''
/s507 (Group) ''
/s507/events (Table(4375645,)) ''
/s507/reconstructions (Table(4375645,)) ''
/s508 (Group) ''
/s508/events (Table(6975614,)) ''
/s508/reconstructions (Table(6975614,)) ''
/s510 (Group) ''
/s510/events (Table(6502499,)) ''
/s510/reconstructions (Table(6502499,)) ''
/s511 (Group) ''
/s511/events (Table(6835429,)) ''
/s511/reconstructions (Table(6835429,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam (Group) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_501 (Group) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_501/events (Table(1468551,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_501/reconstructions (Table(1468551,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_505 (Group) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_505/events (Table(287935,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_505/reconstructions (Table(287935,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_506 (Group) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_506/events (Table(225074,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_506/reconstructions (Table(225074,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_507 (Group) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_507/events (Table(88976,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_507/reconstructions (Table(88976,)) ''
/hisparc/cluster_amsterdam/station_508 (Group) ''
```

```
/hisparc/cluster_amsterdam/station_508/events (Table(788198,)) ''  
/hisparc/cluster_amsterdam/station_508/reconstructions (Table(788198,)) ''  
/hisparc/cluster_amsterdam/station_510 (Group) ''  
/hisparc/cluster_amsterdam/station_510/events (Table(1431960,)) ''  
/hisparc/cluster_amsterdam/station_510/reconstructions (Table(1431960,)) ''  
/hisparc/cluster_amsterdam/station_511 (Group) ''  
/hisparc/cluster_amsterdam/station_511/events (Table(368447,)) ''  
/hisparc/cluster_amsterdam/station_511/reconstructions (Table(368447,))
```

SCRIPT_correlatie_4mnd_501505506507508510511

```
from __future__ import division
import datetime
import tables
import sapphire
from sapphire import esd, ReconstructESDEvents, CoincidenceQuery
from sapphire.transformations.clock import datetime_to_gps
from math import isnan
from matplotlib.colors import LogNorm
from pylab import *
import itertools
import numpy as np

START = datetime.datetime(2015, 10, 4)
END = datetime.datetime(2016, 2, 16)
STATIONS = [501, 505, 506, 507, 508, 510, 511]
COIN_REC_PATH = '/hisparc/cluster_amsterdam/station_%d/reconstructions'
COIN_STAT_PATH = '/hisparc/cluster_amsterdam/station_%d'

def download_and_reconstruct():
    with tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'a') as data:

        if '/coincidences' not in data:
            sapphire.download_coincidences(data, stations=STATIONS, start=START, end=END)
        for station in STATIONS:
            if COIN_REC_PATH % station not in data:
                rec = ReconstructESDEvents(data, COIN_STAT_PATH % station, station, overwrite=True)
                if station == 507:
                    rec.reconstruct_and_store(detector_ids=[0, 1, 3])
                else:
                    rec.reconstruct_and_store()

            for station in STATIONS:
                if '/s%d' % station not in data:
                    esd.download_data(data, '/s%d' % station, station, start=START, end=END)
                if '/s%d/reconstructions' % station not in data:
                    rec = ReconstructESDEvents(data, '/s%d' % station, station, overwrite=True)
                    if station == 507:
                        rec.reconstruct_and_store(detector_ids=[0, 1, 3])
                    else:
                        rec.reconstruct_and_store()

    print data
```

```

def make_plots():
    with tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r') as data:
        cq = CoincidenceQuery(data)

        start = datetime_to_gps(datetime.date(2015, 10, 4))
        stop = datetime_to_gps(datetime.date(2016, 2, 16))

        coincidences = cq.all([501,507], start=start, stop=stop, iterator=True)

        #specific_events = cq.events_from_stations(coincidences,[507, 510])

        reconstructions_iterator = (cq._get_reconstructions(coincidence)
                                     for coincidence in coincidences)
        coincidences_events = (cq._events_from_stations(reconstructions, [501,507])
                               for reconstructions in reconstructions_iterator)
        specific_reconstructions = cq.minimum_events_for_coincidence(coincidences_events, n=2)

        z501azimut = []
        z505azimut = []
        z506azimut = []
        z507azimut = []
        z508azimut = []
        z510azimut = []
        z511azimut = []
        z501zenit = []
        z505zenit = []
        z506zenit = []
        z507zenit = []
        z508zenit = []
        z510zenit = []
        z511zenit = []

        #for s1, s2 in itertools.combinations(STATIONS)
        for s in specific_reconstructions:
            if len(s) == 2:
                s1, s2 = s
                if s1[0] == 501:
                    zenit501, azimut501 = s1[1]['zenith'], s1[1]['azimuth']
                    zenit507, azimut507 = s2[1]['zenith'], s2[1]['azimuth']
                else:
                    zenit501, azimut501 = s2[1]['zenith'], s2[1]['azimuth']
                    zenit507, azimut507 = s1[1]['zenith'], s1[1]['azimuth']
                if not.isnan(zenit501) and not.isnan(zenit507):
                    z501zenit.append(zenit501)

```

```

        z507zenit.append(zenit507)
        z501azimut.append(azimut501)
        z507azimut.append(azimut507)

plt.hist2d(z501zenit, z507zenit, bins=75)
plt.title('theta')
plt.axis([ 0, np.pi/2,0, np.pi/2])
plt.xlabel('zenit z501')
plt.ylabel('zenit z507')

colorbar()
show()
#plt.save('bla_%d_%d.pdf' % (s1, s2))
plt.show()

def make_azimuth_histogram():
    with tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r') as data:
        station = 508
        recs = data.get_node('/s%d' % station, 'reconstructions')
        azimuth_high = recs.read_where('(zenith > 0.17) & (zenith < 0.87)',field='azimuth')
        azimuth_low = recs.read_where('zenith > 0.87', field='azimuth')
        figure()
        print recs.nrows
        if len(azimuth_high):
            hist(azimuth_high, bins=50, histtype='step', color='red')
        hist(azimuth_low, bins=50, histtype='step', color='blue')
        plt.title('azimut 508')
        plt.xlabel('hoek phi (rad)')
        plt.ylabel('aantal; blue=low, red=high')
        show()

def make_histogram():
    with tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r') as data:
        station = 507
        recs = data.get_node('/s%d' % station, 'reconstructions')
        azimuth = recs.read_where('(zenith > 0.17) & (zenith < 1.6)',field='azimuth')
        figure()
        hist(azimuth,bins=50,histtype='step', color='green')
        plt.title('azimut 507')
        plt.xlabel('hoek(rad)')
        plt.ylabel('aantal')
        show()

def make_zenith_histogram():
    with tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r') as data:

```



```

station = 510
recs = data.get_node('/s%d' % station, 'reconstructions')
zenith = recs.read_where('(zenith > 0.0) & (zenith < 1.6)', field='zenith')
figure()
hist(zenith, bins=np.linspace(0, np.pi/2, 46), histtype='step', color='green')
plt.title('zenit 510')
plt.xlabel('hoek(rad)')
plt.ylabel('aantal')
show()

def make_2dhist(nummer):
    with tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r') as data:
        station = nummer
        recs = data.get_node('/s%d' % station, 'reconstructions')
        zenith = recs.read_where('(zenith > 0.0) & (zenith < 1.6)', field='zenith')
        azimuth = recs.read_where('(zenith > 0.0) & (zenith < 1.6)', field='azimuth')

        figure()
        x = np.degrees(zenith * sin(azimuth))
        y = np.degrees(zenith * cos(azimuth))

        hist2d(x, y, bins=60, norm=LogNorm())
        colorbar()
        show()

def make_polar_histogram(station):
    with tables.open_file('quatroeventcoinc_4mnd.h5', 'r') as data:
        recs = data.get_node('/s%d' % station, 'reconstructions')
        azimuth = recs.read_where('(zenith > 0.2) & (zenith < 1.6)', field='azimuth')
        ax = plt.subplot(111, projection='polar')
        make_polar_hist(azimuth, ax=ax, N=60)

        plt.title('azimut %d' % station)
        ax.set_xticklabels(['E', '', 'N', '', 'W', '', 'S', ''])
        plt.show()

def make_polar_hist(x, ax=None, N=91, normalize=True):
    """ circular (polar) histogram

    data is assumed in [-pi,pi]

    :param x: array of values
    :param ax: optional axes of subplot
    :param N: optional number of bins

```

```

:param normalize: set to False to skip normalisation
"""

if ax is None:
    ax = plt.subplot(111, projection='polar')
n, bins = np.histogram(x, bins=np.linspace(-np.pi, np.pi, N))

theta = 2 * np.pi * np.arange(0, 1., 0.001)
if normalize:
    scale_factor = max(n)
else:
    scale_factor = 1

mapping_factor = len(n) / len(theta)

idx = [int(i * mapping_factor) for i in range(len(theta))]
r = [n[i] / scale_factor for i in idx]
#print r
ax.plot(-theta, r)
ax.set_rmax(1.1 * max(n) / scale_factor)

if __name__ == '__main__':
    make_plots()

```

6 De acceptantie van het HiSPARC experiment

Niek Schultheiss

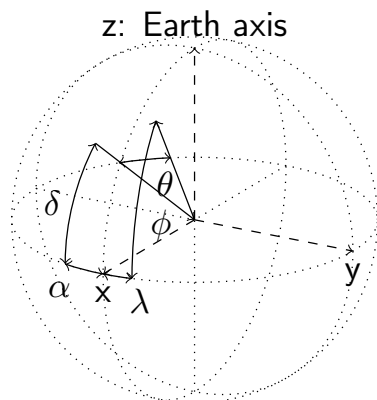


Niek Schultheiss heeft in 2009 leerlingen van het Zaanlands Lyceum begeleid bij de bouw van het eerste station bestaande uit twee scintillatoren. Hierdoor is hij betrokken geraakt bij het HiSPARC-project. Dit heeft op het ZaanlandsLyceum geresulteerd in een unieke opstelling met drie scintillator op de hoeken van een gelijkzijdige driehoek met zijden in de orde van 80m. Hiermee zijn zowel de richting van een deeltjes lawine als de energie van het primaire deeltje te bepalen. De opstelling heeft tot diverse profielwerkstukken geleid, onderzoek door leerlingen vindt ook op dit moment plaats. Voordat onderzoek gedaan kan worden, moeten leerlingen over de benodigde kennis beschikken. Hiervoor heeft hij materiaal ontwikkeld. Dit is te vinden in RouteNet en

InfoPakket. Verder maakt HiSPARC uitgebreid gebruik van de programmeertaal Python voor data-analyse. Met behulp van Python Notebooks wordt deze technologie voor leerlingen beschikbaar gemaakt.

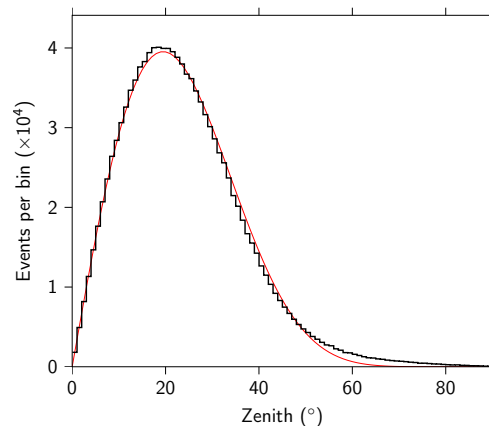
6.1 Acceptantie afhankelijk van de netwerk geometrie

Onderzocht is uit welk deel van de kosmos de door gedetecteerde straling afkomstig is. Deze acceptantie van het experiment hangt af van de locatie van de meetstations. Het zenith, het punt recht boven een meetstation, is in fig. 6.1 op de hemelkoepel geprojecteerd en wordt aangeduid met een lengte- en breedtegraad (λ, ϕ) . De locatie van een bron aan de hemel wordt aangeduid met de rechte klimming en de declinatie (α, δ) . De hoek tussen beide vectoren naar de punten op de hemelkoepel wordt de zenith-hoek θ genoemd.



Figuur 6.1: De plaats van een kosmische stralingsbron (α, δ) en het zenith (λ, ϕ) van een station zijn beide getoond op de hemelbol.

Een detector heeft een gevoeligheid die afhangt van de zenith-hoek θ . De gevoeligheid van een detector is afhankelijk van de zenith-hoek θ . Voor kleine hoeken ontvangt de detector straling uit een kleine

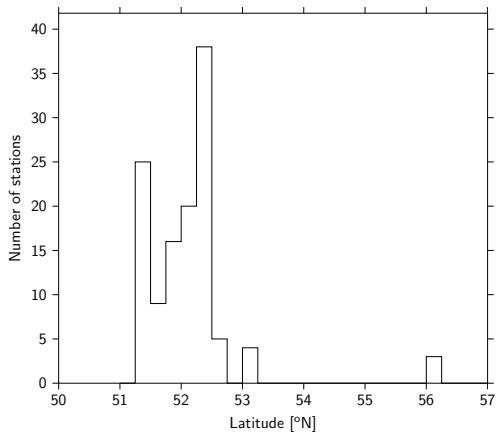


Figuur 6.2: Metingen van detectoren in het Sciencepark zijn als histogram (zwart) weergegeven. In rood is de verdeling volgens Rossi gefit

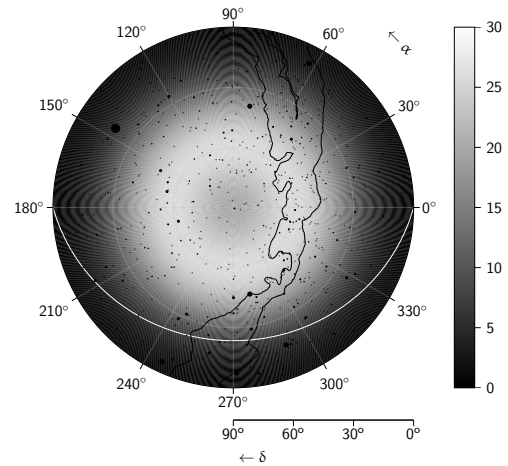
ring aan de hemelkoepel. De omtrek van de ring neemt toe voor grotere hoeken θ . Voor grotere hoeken neemt de gevoeligheid door invloed van de atmosfeer weer af.

6.2 De geometrie van het experiment

Het experiment bestaat uit een groot aantal meetstations. Deze worden beheerd door participerende scholen en universiteiten in binnen- en buitenland. Dit heeft tot gevolg dat de stations onregelmatig verspreid zijn over het aardoppervlak. Voor de acceptantie van het experiment zijn de verdelingen langs de breedtegraad van primair belang.

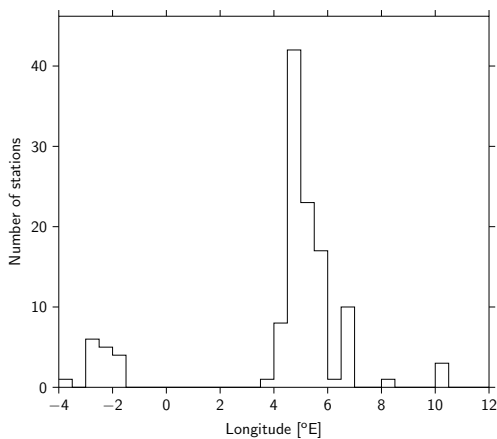


Figuur 6.3: De breedtegraden van de stations in een histogram van evenaar (links) tot noordpool (rechts).



Figuur 6.5: De acceptantie van het gehele HiSPARC experiment voor kosmische straling.

De verdeling in de lengtegraad is alleen van belang als de acceptantie van een station voor kosmische straling op een bepaald moment willen bepalen. De meetstation draaien allen met de Aarde in een siderische dag rond de Aardas.

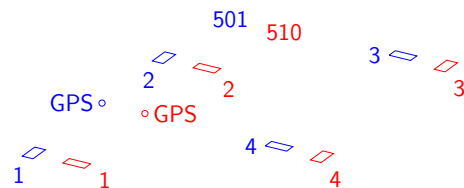


Figuur 6.4

Met enig rekenwerk [41] leidt dit tot de hemelkaart in fig. ?? met daarop de acceptantie als grijswaarde.

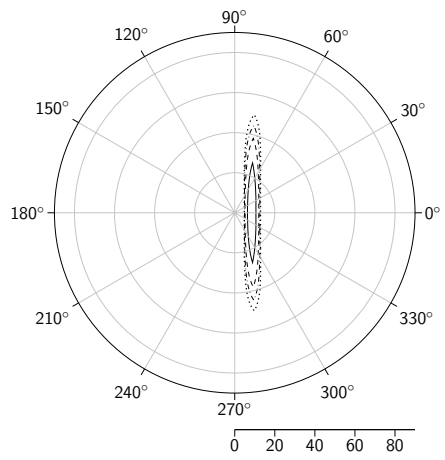
6.3 Stations met twee detectoren

Een aanzienlijke hoeveelheid stations in het HiSPARC experiment beschikt over twee detectoren. Met deze stations is richtingreconstructie van kosmische straling ten dele mogelijk. De acceptantie van dergelijke stations is onderzocht met behulp van de station 501 en 510 op het Sciencepark (fig. 6.6).



Figuur 6.6: De detectoren van de stations 501 en 510.

Met enig rekenwerk [42] leidt dit tot de acceptantie voor een station met twee detectoren zoals getoond in fig. 6.7.



Figuur 6.7: De acceptantie voor een detectorpaar bij tijdsverschil van 5ns

7 Conclusie

Afgelopen jaar hebben vijf docenten uit het voorgezet onderwijs in Amsterdam weer in de keuken van het wetenschappelijk bedrijf kunnen kijken. De resultaten van hun onderzoek worden gepresenteerd in dit document.

Zoals in de inleiding werd uitgelegd, is gekozen om onderzoek uit te voeren binnen het kader van het HiSPARC project. Alle aspecten hiervan komen aan bod; hardware en software ontwikkeling, data analyse. Verdieping van theoretisch begrip werd bereikt in een serie seminars. Ook werden actuele wetenschappelijke vraagstukken bestudeerd met begeleiding door leden van de lokale wetenschappelijke staf. Na een aantal jaar dat het onderzoek zich richtte op het begrip van één enkel station of van een kleine groep stations in het Science Park, wordt nu het oog gericht op het hele netwerk. Sabine Beijen heeft een schatting gemaakt van het totale aantal UHECRs dat gemeten kan worden in het HiSPARC-netwerk. Tom Kooij heeft in vele combinaties de absorptie coëfficiënt gemeten, en Reno Beekman de relatie tussen bliksems en HiSPARC signalen.

Het goed omliggende kader en het deelnemen aan een gemeenschappelijk project, werd bereikt door het veelvuldig overleg tussen deelnemers en begeleiders. Halverwege het jaar werd door de deelnemers een voortgangsrapport gepresenteerd. Deze bijeenkomst heeft uitgebreide en inspirerende discussies opgeleverd. Docenten hebben elkaar dan ook vaak getroffen als *sparring partners*: diverse vraagstukken zijn voor het voetlicht gebracht en besproken. Dit jaar werd voor het eerst het jaar begonnen met een kick-

off bijeenkomst met een deskundige van buiten Nijmegen. Charles Timmermans opende het seizoen met twee colleges. Tevens werd het jaar afgesloten met een einde jaars bijeenkomst waarin de LiO's elkaar hun resultaten presenteerden.

Dit jaar is ook weer aandacht besteed aan de ontwikkeling van modern voortgezet *exact* middelbaar onderwijs met als doel docenten te faciliteren en de *beter* leerling te *prikkelen*. Het materiaal dat hiervoor ontwikkeld wordt geeft direct aansluiting bij eerder gepresenteerde NLT en NiNa modules.

De resultaten van afgelopen jaar illustreren wederom dat wetenschappelijk onderzoek bedrijven een uitdagende onderneming is; zeker voor wie het geen alledaagse activiteit is.

Referenties

- [1] D.B. Fokkema. *The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of shower direction*. PhD thesis, University of Twente, 2012.
- [2] J.M.C. Montanus. An extended Heitler-Matthews model for the full hadronic cascade in cosmic air showers. *Astropart.Phys.*, 59:4–11, 2014.
- [3] F. Sauli. Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers. CERN report 77-09, 1977.
- [4] A. Dubinova et.al. Prediction of lightning inception by large ice particles and extensive air showers. *Phys.Rev.Lett.*, 115:015002, 2015.
- [5] H. Beekhuis and I. Holleman. Upgrade and evaluation of a lightning detection system. presentatie op ILDC18, 2004.
- [6] Dieter R. Poelman. On the science of lightning: An overview. Royal Meteorological Institute of Belgium (RMI), 2010. Publ. 56.
- [7] HiSPARC public database. bezocht: 25-04-2016. Available from: http://data.hisparc.nl/show/stations_by_country/.
- [8] S.I. Beijen. Een hot-spot voor UHECRs: Zichtbaar met HiSPARC? LIO-verslag 2014-2015, op te vragen via www.hisparc.nl.
- [9] D. Eichler et al. Ultrahigh energy cosmic rays: A galactic origin? *The Astrophysical Journal Letters*, 821:L:24 (5pp), April 2016.
- [10] R.U. Abbasi et al. Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 EeV in the northern sky measured with the surface detector of the telescope array experiment. *The Astrophysical Journal Letters*, 790:L:21, 2014.
- [11] A.A. Watson. Extensive air showers and ultra high energy cosmic rays, 2002. Lectures given at summer school in Mexico. Available from: <http://www.ast.leeds.ac.uk/Auger/augerthesis/mexlects3.pdf>.
- [12] T. Stanev. Cosmic rays and extensive air showers. datum bezocht: 18-4-2016. Available from: https://indico.cern.ch/event/41547/contributions/1007172/attachments/850161/1185295/stanev_todor_eds09.pdf.
- [13] Pierre Auger observatory Auger hybrid detector. datum bezocht: 18-04-2016. Available from: <https://www.auger.org/index.php/observatory/auger-hybrid-detector>.
- [14] A. de Laat. proefschrift. in voorbereiding.
- [15] D.B.R.A. Fokkema. The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of the shower direction. thesis, University of Twente, 2012.
- [16] A. de Laat et al. SAPHIRE, Github.
- [17] L. de Vries. Search for a correlation between HiSPARC cosmic-ray data and weather measurements. Master thesis, 2012.
- [18] Peter K.F. Grieder. *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects*. Springer, 2010.
- [19] K. Kamata and J. Nishimura. The lateral and the angular structure functions of electron showers. *Suppl. Prog.Theor.Phys.*, 6:93, 1958.
- [20] K. Greisen. The extensive air showers. *Prog.Cosmic Ray Physics*, 3:3, 1956.
- [21] J.M.C. Montanus. Core reconstruction. Nikhef internal note, 2015.
- [22] P. Lipari. Concepts of *age* and *universality* in cosmic ray showers. *Phys. Rev. D*, 79:063001, 2009.
- [23] H. Y. Dai, Y. D. He, and A. X. Huo. A contradiction in the concept of shower age. *Proc. 21st ICRC, Adelaide, Australia*, page 9, 1990.

- [24] J. Linsley. Interpretation of the depths of maximum of extensive air showers measured by the pierre auger observatory. *Proc.15th International Cosmic Ray Conference, Ploudiv, Bulgaria*, page 12, 1977.
- [25] D. Newton, J. Knapp, and A.A. Watson. The optimum distance at which to determine the size of a giant air shower. *Astropart. Phys.*, 26:414–419, 2007.
- [26] A. Tapia et al. The lateral shower age parameter as an estimator of chemical composition. *33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro*, 2013.
- [27] A. Iyono et al. Zenith angle distribution and atmospheric effect for EAS with LAAS experiments. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, 4:47–50, 2008.
- [28] D. Ciampa and R. W. Clay. The zenith angle distribution of extensive air showers at sea level: a measure of shower development. *J. Phys. G*, 14:787–792, 1988.
- [29] D.B.R.A. Fokkema. The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of the shower direction. thesis, University of Twente, 2012.
- [30] T. Kooij. Spreiding van aankomsttijd verschillen in HiSPARC. Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2014/2015, 2015.
- [31] A. de Laat. proefschrift. in voorbereiding.
- [32] J.W. van Holten. Kosmische straling: air-showers, 2009. Available from: http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/Lesmateriaal_fysica__jan-willem_/shower.pdf.
- [33] K.A. Olive et.al. Particle physics booklet. *Chin. Physics C*, 38:090001, 2014.
- [34] G.F. Knoll. *Radiation detection and measurement*. Wiley, New York, 1989.
- [35] W.R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer Verlag, Berlin, 1992.
- [36] J.D. Haverhoek. Ultra-high-energy cosmic-ray extensive air shower simulations using CORSIKA, 2006. Available from: http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/werk_van_studenten/UHECRs-thesis-JDHaverhoek.pdf.
- [37] S. Tavernier. *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. Springer Verlag, 2010.
- [38] D.B.R.A. Fokkema. Inregelen pmts. HiSPARC website, 2009. Available from: http://docs.hisparc.nl/infopakket/pdf/inregelen_pmts.pdf.
- [39] D. Fokkema. The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of the shower direction. thesis, University of Twente, 2012.
- [40] D.B.R.A. Fokkema and A. de Laat. SAPHIRE documentation. HiSPARC website, 2009. Available from: <http://docs.hisparc.nl/sapphire/>.
- [41] N. G. Schultheiss. The acceptance of the HiSPARC experiment. *ArXiv e-prints*, February 2016. <http://arxiv.org/abs/1602.06799> arXiv:1602.06799.
- [42] N. G. Schultheiss. The field of view of a scintillator pair for cosmic rays. *ArXiv e-prints*, January 2016. <http://arxiv.org/abs/1601.00849> arXiv:1601.00849.