

Leraar in Onderzoek 2017-2018

Hoogenergetische Kosmische Straling

eindredactie J.J.M. Steijger

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

11 oktober 2018



Vlnr achterste rij: Pieter Gunnink, Jose-Carlos Caballero, Martijn Stobbelaar, Tom Kooij, Thijs Aldus, Nathalie van der Weiden,
voorste rij: Kasper van Dam, Kees van der Velden, Niek Schultheiss en Jos Steijger, helaas afwezig: Bob van Eijk en Jan-Willem van Holten.

Inhoudsopgave

1	Introductie Leraar in Onderzoek	5	4	De invloed van de detectorafstand op de meetresultaten van HiSPARC tweeplatenstations.	23
2	Verdeling van verschillende soorten signalen in HiSPARC meetinstrumenten rondom bliksemontladingen.	7	4.1	Kosmische straling en extensive air showers	23
2.1	Abstract	7	4.1.1	Historie	23
2.2	Inleiding	7	4.1.2	Primaire kosmische straling	24
2.2.1	Bliksem	7	4.1.3	Secundaire kosmische straling	24
2.2.2	Extensive Air Showers veroorzaakt door kosmische straling	8	4.2	De meetopstelling	25
2.2.3	EAS-detectie en storingen	9	4.2.1	De detectoren	26
2.2.4	Onderzoeksvraagstelling	9	4.2.2	Fotoversterkbuis	27
2.3	Werkwijze	9	4.2.3	De elektronica en software	28
2.3.1	Gebuurde meetgegevens	9	4.2.4	Data via SAPHIRE of data.hisparc.nl	29
2.3.2	Onderscheiden EASen van andere signalen	9	4.3	Onderzoek naar invloed detectorafstand op de meetresultaten van tweeplatenstations.	32
2.4	Resultaten	10	4.3.1	Aanleiding	32
2.5	Discussie	11	4.3.2	Doelstellingen en onderzoeksvragen	32
2.5.1	Signalen zonder bliksem	11	4.3.3	Methode: station 2010	32
2.5.2	Overige signalen rondom bliksem	12	4.4	Resultaten	33
2.6	Conclusie	12	4.4.1	Invloed detectorafstand op tijdverschillen bij coïncidenties	33
3	Correctie van de telsnelheid van singles voor temperatuur en luchtdruk.	13	4.5	Toevallige coïncidenties	35
3.1	Introductie.	13	4.5.1	Invloed detectorafstand op coïncidentiefrequenties	36
3.2	HiSPARC.	13	4.5.2	Invloed detectorafstand op pulshoogtehistogram	38
3.3	Coïncidenties en Singles.	14	4.6	Conclusie	46
3.4	24-uurspatroon.	14	4.7	Discussie	46
3.5	Uitschieters.	14	5	Richtingreconstructie op basis van een maximum likelihoodfit.	49
3.6	Onderzoeksvraagstelling.	15	5.1	Introductie	49
3.7	Coïncidenties.	15	5.1.1	Kosmische straling en HiSPARC	49
3.8	Methode.	15	5.1.2	Onderzoeksvraag en verwachting	49
3.9	Temperatuur.	16	5.2	Methode	50
3.10	Luchtdruk.	16	5.2.1	Opbouw SAPHIRE reconstructie	50
3.11	Meerdere stations en langere periode	17	5.2.2	Analyse van de aannames	51
3.12	Singles fitten tegen temperatuur en luchtdruk.	17	5.3	Resultaten	51
3.13	Corrigeren van de metingen.	18	5.3.1	Station 501	51
3.14	Vergelijken stations.	19	5.3.2	Stations op het Science Park	52
3.15	Uitfilteren van bijzondere situaties.	19	5.4	Nieuw algoritme	56
3.16	Conclusie.	20	5.4.1	Maximum likelihoodfit	56
			5.4.2	Opbouw van het lawinefront	57

5.4.3	Toepassing van het algoritme .	57
5.5	Conclusie en discussie	58
6	Tot slot	61

1 Introductie Leraar in Onderzoek

Onderzoek is een centrale activiteit in de natuurkunde. Helaas gaat het besef hiervan gemakkelijk verloren in de alledaagse werkelijkheid van de leraar natuurkunde in het voorbereidend wetenschappelijk onderwijs. Ruim tien jaar geleden is daarom een programma opgestart dat aan leraren en leerlingen de mogelijkheid biedt om deel te nemen aan wetenschappelijk onderzoek. De studie van kosmische straling werd als onderwerp gekozen omdat deze straling overal vrijelijk beschikbaar is en veelzijdige studies mogelijk maakt.

HiSPARC High School Projekt on Astrophysics Research with Cosmics) werd voor dit doel in het leven geroepen. In dit programma is de invloed van het weer op de detectie van de straling, maar ook de invloed van de straling op het weer aan bod gekomen. Daarnaast zijn natuurlijk ook astrofysische onderwerpen bestudeerd. Bijvoorbeeld lokale anisotropieën veroorzaakt door bronnen in het universum en globale door de beweging van de aarde ten opzichte van andere objecten in de ruimte. Kosmische straling kan zelfs toegepast worden om een beeld te vormen van de aardse omgeving. Zo zijn de ingewanden van vulkanen doorgelicht in onderzoek in gebieden waar deze zich bevinden, maar in het kader van dit programma ook is ook in Nederland onderzoek gedaan. Hier zijn de gebouwde en industriële omgeving onderwerp geweest.

Als spin-off is daarnaast het LiO (Leraar in Onderzoek) programma door de stichting FOM, nu het NWO-I (Institutenorganisatie van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek), in

het leven geroepen. In dit programma worden leraren Natuurkunde in de gelegenheid gesteld om een jaar lang, één dag in de week, onderzoek uit te voeren bij een aan NWO gelieerde wetenschappelijke instelling. Zij nemen hier nader kennis van de huidige wetenschappelijke wijze van werken, en ontwikkelen hun eigen onderzoeks vaardigheden. Het doel is dat zij hierdoor enthousiasme voor een universitaire studie Natuurkunde aan scholieren weten over te brengen. Studenten aan wie ook het bedrijfsleven zo'n behoefte heeft.

Het grootste deel van het onderzoek in HiSPARC vereist een evaluatie van veel data. Hetzij data van meer stations, of over langere tijd, ofwel beide. In ieder geval betekent dit dat het gebruik van computers een noodzakelijk deel van het onderzoek is. HiSPARC biedt hiervoor een prima platform in de vorm van zogenaamde notebooks. Dit zijn verzamelingen van werkende programma's met voldoende commentaar om de werking uit te leggen. Vanuit deze notebooks kunnen leraren en leerlingen door combineren en uitbreiden de werkzaamheid verbeteren, en zo weer nieuwe notebooks maken, voor nog weer verder gevorderde analyses. Het blijkt dat LiO's die in september aankomen al in oktober werkende programma's kunnen produceren.

In het schooljaar 2017/18 hebben vijf docenten onderzoek uitgevoerd op het gebied van de subatomaire natuurkunde. Thijs Aldus, Jose-Carlos Caballero, Martijn Stobbelaar, Kees van der Velden, en Nathalie van der Weiden zijn werkzaam geweest bij Nikhef in Amsterdam. Met behulp van het door HiSPARC

gekreëerde netwerk bestaande uit ruim 120 stations op de daken van scholen is er nu een database beschikbaar van meer dan 1 miljard gebeurtenissen. De resultaten van hun onderzoek ligt hier voor u. 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 projekt.

Begeleiding: Bob van Eijk, Jan-Willem van Holten, Niek Schultheiss, Tom Kooij en Jos Steijger¹.

¹Dit dokument (en de rapporten uit 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2014/2015, 2015/2016 en 2016/2017) zijn ook elektronisch beschikbaar via de HISPARC website www.hisparc.nl/docent-student/leraar-in-onderzoek/jaarverslagen/)

2 Verdeling van verschillende soorten signalen in HiSPARC meetinstrumenten rondom bliksemontladingen.

Thijs Aldus



Thijs Aldus is sinds 2015 verbonden aan het Sint Vituscollege in Bussum. Daarnaast volgt hij aan de HU de master docent natuurkunde voor zijn eerstegraads lesbevoegdheid. Het project Leraar in Onderzoek is voor hem een mogelijkheid om zelf wetenschappelijk onderzoek te doen. Tevens is dat zijn onderzoeksstage als onderdeel van de masterstudie, die hij in schooljaar 2018-2019 hoopt af te ronden.

2.1 Abstract

De drempelspanning in lucht waarbij er een elektrische ontlading kan plaatsvinden, is doorgaans hoger dan het spanningsverschil tussen de grond en een onweerswolk. Kosmische straling zou de drempelspanning van lucht tijdelijk dusdanig kunnen verlagen dat er wel een elektrische ontlading plaats kan vinden. Meetinstrumenten van HiSPARC is in staat om kosmische straling te detecteren. Eerder onderzoek van HiSPARC heeft aangetoond dat er tijdens bliksemontladingen veel signalen gedetecteerd worden in HiSPARC apparatuur. In dit onderzoek zijn de signalen in HiSPARC rondom bliksemontladingen geanalyseerd. Hierbij is o.a. onderscheid gemaakt tussen signalen ten gevolge van kosmische straling die aan-

leiding heeft kunnen geven tot de bliksemontlading, en storingen die afkomstig zijn van de bliksem.

2.2 Inleiding

2.2.1 Bliksem

Bliksem ontstaat in verschillende fasen. In de eerste fase wordt een wolk elektrisch opgeladen. In een wolk heersen wervelwinden en opwaartse winden. Hierdoor kunnen zogenoemde graupeldeeltes (grote ijskristallen) elektronen afpakken van kleinere ijskristallen. Door de zwaartekracht zakken de grotere graupeldeeltes naar beneden. Hierdoor raakt de onderkant van de wolk negatief geladen, en wordt de bovenkant positief geladen [1]. Er is helaas geen een-

duidige theorie welke het ladingsverschil in een buienwolk volledig kan verklaren [2]. In de tweede fase wordt er een voorloper kanaal van geleidend plasma, een leader genaamd, gevormd doordat snel bewegendde vrije elektronen botsen met atomen in de lucht, die hierdoor geïoniseerd raken. In de derde en laatste fase ontstaat er kortsluiting in de vorm van een zichtbare en hoorbare bliksemontlading [1].

Uit metingen vanuit ballonnen en vliegtuigen is gebleken dat de elektrische velden in onweerswolken niet boven de 150 kV m^{-1} uitkomen. De drempelveldsterkte voor een gewone vonk in lucht is echter 3 MV m^{-1} . Bij voldoende vrije ladingdragers kan de drempelveldsterkte zakken tot 150 kV m^{-1} of lager [2]. Uit simulaties blijkt dat er tenminste honderd vrije elektronen per kubieke centimeter aanwezig moeten zijn voor het starten van de ontlading [3]. Deze hoeveelheid vrije ladingdragers kan geproduceerd worden door kosmische deeltjes met een energie van tenminste $5 \cdot 10^{15} \text{ eV}$ [4]. De telsnelheid is dan tenminste $300 \text{ deeltjes} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [3].

2.2.2 Extensive Air Showers veroorzaakt door kosmische straling

De aarde wordt continue gebombardeerd door deeltjes vanuit de ruimte. Deze deeltjes kunnen een wisselwerking aangaan met luchtmoleculen, waarbij er, als het deeltje voldoende energie heeft, een deeltjeslawine ontstaat. Verschillende soorten van deze deeltjes kunnen gemeten worden op het aardoppervlak, zoals met de apparatuur van HiSPARC. Er is sprake van een Extensive Air Shower (EAS) wanneer er meerdere deeltjes binnen een bepaalde afstand en tijdsbestek op de grond gemeten worden. Er zijn ruwweg twee soorten EASen: elektromagnetische en hadronische showers. Meestal komen beide voor in één enkele shower.

Bij elektromagnetische EASen komt een kosmisch gamma-deeltje of een kosmisch elektron of positron in de dampkring. Een gamma kan zich door een wisselwerking met een luchtatoom splitsen in een elektron en positron terwijl een elektron (positron) door Bremsstrahlung een gamma kan produceren. Na elke wisselwerking ontstaan zodoende meer deeltjes, die tezamen even veel energie hebben als het deeltje voor

de wisselwerking. De energie per deeltje neemt dus af. Samengevat, de elektromagnetische processen zijn:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad (2.1)$$

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma \quad (2.2)$$

Vergelijking 2.1 is de paarvorming en vgl. 2.2 de Bremsstrahlung interactie.

Bij een hadronische EAS gaat een kosmisch proton een wisselwerking aan met de kern van een atoom van één van de gassen waaruit de lucht bestaat. Hierbij ontstaan een groot aantal pionen. Eén derde hiervan is neutraal, één derde is positief en één derde is negatief geladen. De neutrale pionen vervallen direct tot twee gamma-deeltjes die aanleiding kunnen geven tot een elektromagnetische shower. De geladen pionen vervallen in een muon (met dezelfde lading als het pion) en een muonneutrino.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.3)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.4)$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (2.5)$$

De geladen muonen vervallen in een elektron of positron, en twee neutrino's.

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2.6)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2.7)$$

Het maximale aantal elektronen en positronen dat bij een EAS uit een inkomend proton wordt gevormd, is volgens een aangepast Heitler-Matthews model [5]:

$$N_e = 0.57 E_0^{1.019} \quad (E_0 \text{ in GeV}) \quad (2.8)$$

Ongeveer 90% van alle EASen ontstaat uit een primair proton [6]. Loodrecht op de bewegingsrichting van het oorspronkelijke inkomende deeltje, heeft de daaropvolgende deeltjesregen de vorm van een platte schijf. De dikte van deze schijf varieert van ongeveer 1 m in de buurt van de kern van de EAS, tot enige tientallen meters op een afstand van 300 m daarvandaan [7]. Deze schijf 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, ligt tussen de 10^{14} en 10^{15} eV . EASen met deze energieën kunnen

met HiSPARC gedetecteerd worden. Inkomende deeltjes met een energie lager dan 10^{14} eV kunnen met HiSPARC niet worden waargenomen [8] (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. Bij 10^{15} eV komen er al 10^3 minder deeltjes voor dan bij 10^{14} eV [9].

2.2.3 EAS-detectie en storingen

Voor de detectie van een EAS wordt gebruik gemaakt van een opstelling, waarbij een fotoversterkerbuis is aangesloten op een scintillatorplaat. Wanneer er een geladen deeltje door de scintillatorplaat beweegt, wordt er door de plaat een lichtflits gegenereerd. In de flits zitten $3 \cdot 10^4$ tot $4 \cdot 10^4$ fotonen. Daarvan komen er ongeveer 400 fotonen aan in de fotoversterkerbuis. Met de energie van het foton wordt middels het foto-elektrisch effect uit de kathode een elektron losgemaakt, waarna het signaal door verschillende dynodes versterkt wordt. Tijdens de bliksem kunnen er radiogolven, röntgenstraling [10] en gammastraling geproduceerd worden. Dit kan leiden tot een storend signaal in de fotoversterkerbuis, of de daarop aangesloten uitlees-elektronika.

2.2.4 Onderzoeksvraagstelling

Vanuit de theorie dat EASen de leveranciers zijn van de benodigde ladingsdragers voor een bliksemontlading, is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd: *Zijn er aantoonbaar meer EASen voordat een bliksemontlading plaatsvindt?*

De hypothese hierbij is dat het aantal EASen voorafgaand aan de bliksem groter is dan het aantal EASen dat na de bliksem wordt gemeten.

2.3 Werkwijze

2.3.1 Gebruikte meetgegevens

De beschikbare data van het KNMI is afkomstig van FLITS. Er staan vier antennes in Nederland en drie in België waarmee de radiostraling die ontstaat bij een bliksem, wordt opgevangen. Uit deze signalen wordt de richting en afstand tot de bliksem afgeleid. De periode waarin deze signalen zijn opgeslagen beslaat

de jaren 2004 tot en met 2015. De positienauwkeurigheid is 2-4 km, de tijdstippen waarop de bliksems optraden hebben een nauwkeurigheid van 0,1 ms. Er wordt tevens onderscheid gemaakt tussen bliksemtypes grond-grond, wolk-wolk en grond-wolk. In dit onderzoek zijn alleen bliksems van het type grond-wolk gebruikt.

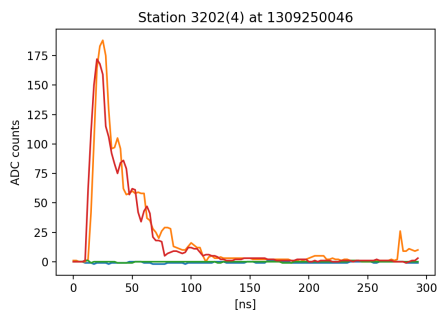
De data van het KNMI is vergeleken met data van EASen van HiSPARC. De eerste HiSPARC-data is beschikbaar vanaf 2002. Aangezien Reno Beekman echter bevonden heeft dat de HiSPARC data van voor 10 juli 2010 geen geschikte correlatie heeft tussen pulshoogte en pulsintegraal, is alleen de data vanaf deze datum gebruikt. De nauwkeurigheid van de tijdwaarneming van de HiSPARC data is kleiner of gelijk aan 2,5 ns.

Reno Beekman heeft een aparte dataset aangemaakt met alle coïncidenties tussen data van het KNMI en HiSPARC. Onder coïncidentie wordt verstaan dat een EAS geregistreerd is binnen een straal van 10 km rondom een bliksem, en binnen 0,2 ms voor en na de bliksem. Er zijn 234 coïncidenties geregistreerd. Van deze 234 coïncidenties wordt aangenomen dat dit showers zijn. Vervolgens is extra data verzameld rondom deze coïncidenties. Alle signalen van 1,025 s voor tot 1,025 s na de bliksem worden toegevoegd aan de dataset. Dit heeft in totaal 703 signalen opgeleverd, dus inclusief de 234 coïncidenties.

2.3.2 Onderscheiden EASen van andere signalen

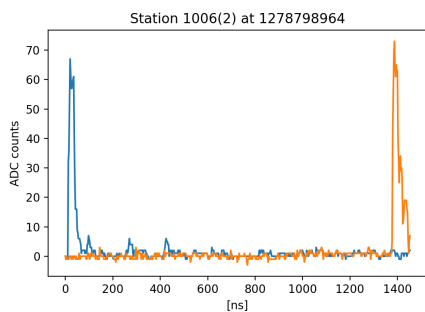
Van de 703 signalen zijn traces uit de database gehaald. Al deze signalen zijn door de uitlees elektronica getriggerd. Voor een station met twee detectieplaten betekent dit dat in beide platen een signaal is waargenomen met een pulshoogte van minimaal 70 ADC. In een station met vier platen, moet in minstens twee platen een signaal met een pulshoogte van minstens 70 ADC, of in minstens drie platen een signaal van 30 ADC hoog aanwezig zijn. Op basis van de traces zijn de signalen ingedeeld in drie categorieën: EAS, singles of storingen. Een EAS moet in ten minste twee detectorplaten een waarde voor ADC counts hebben boven 30. De tijdstippen waarop deze signalen boven 30 ADC counts uitkomen, mogen in

tijd niet meer dan 250 ns van elkaar verwijderd zijn. Figuur 2.1 laat een trace van een EAS zien.



Figuur 2.1: Een EAS waargenomen in station 3202 op 28 juni 2011

Singles zijn grotendeels gelijk aan showers, maar het verschil in tijdstip waarbij in de verschillende detectorplaten de waarde van de ADC counts bereikt wordt, is groter dan 250 ns. Hierdoor is het fysisch onmogelijk dat deze signalen afkomstig zijn van hetzelfde kosmische stralingsdeeltje. Figuur 2.2 geeft een voorbeeld van twee singles. Beide platen worden geraakt maar niet door twee deeltjes die bij dezelfde shower horen.



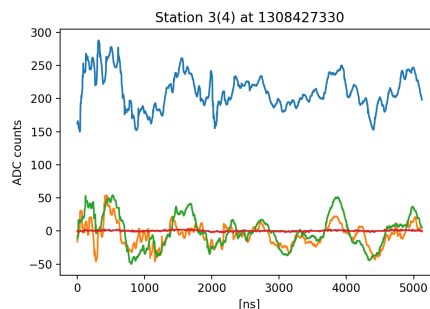
Figuur 2.2: Twee singles waargenomen in station 1006 op 10 juli 2010.

Een signaal wordt een storing genoemd wanneer het niet voldoet aan de voorwaarden om als EAS of als single geïdentificeerd te worden. Ook signalen die wel aan de voorwaarden voor EASen of singles voldoen,

	Voor bliksem	Tijdens bliksem	Na bliksem	Totaal
Alles	157	407	139	703
EASen	72	44	25	141
Singles	42	42	48	132
Storingen	43	321	66	430

Tabel 2.1: Verdeling van de verschillende signalen rondom de bliksem

kunnen als storing geïdentificeerd worden wanneer genoeg reden is om het signaal onbetrouwbaar te vinden. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat de signalen van de verschillende detectorplaten sterk van elkaar verschillen. Storingen hebben ook regelmatig een waarde van ADC counts die korte tijd lager is dan -20. Dit komt zelden voor bij EASen en singles, en is daarom een indicatie van een storing. Figuur 2.3 toont een voorbeeld van een signaal tijdens een storing van de electronica.



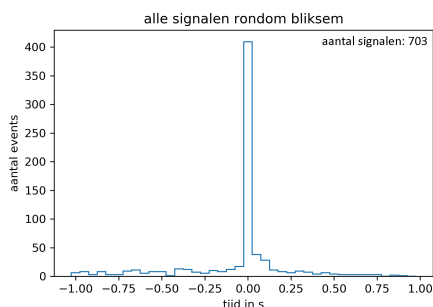
Figuur 2.3: Een storing waargenomen in station 3 op 18 juni 2011.

2.4 Resultaten

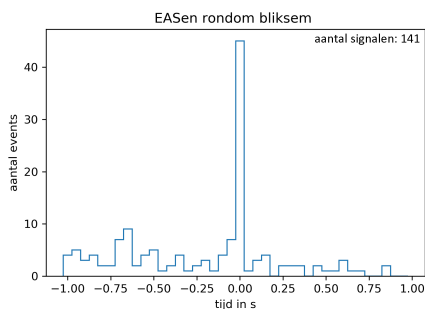
Na het classificeren van de 703 signalen blijken deze als volgt verdeeld (zie tabel 2.1).

Deze signalen zijn vervolgens verwerkt in 4 histogrammen, waarin de aantallen signalen (alle signalen, EASen, storingen en singles) zijn uitgezet tegen de bliksemtijd. Zie figuren 2.4 tot en met 2.7.

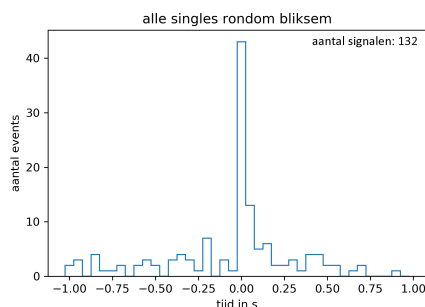
Op de x-as staat de tijd in seconden waarop het signaal is waargenomen. Het tijdstip waarop de bliksem heeft plaatsgevonden is 0,00 seconden. Op de y-as staat het aantal signalen dat in die specifieke bin is waargenomen. De bingrootte is steeds 0,05 seconden breed.



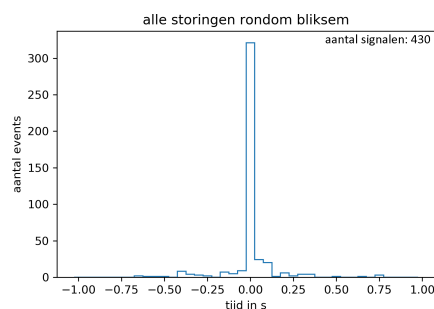
Figuur 2.4: Histogram van alle signalen binnen een seconde voor en na een bliksem, gemeten in stations waarin een coincidentie binnen 0,2 ms voor of na een bliksem is gemeten.



Figuur 2.5: Histogram van alle EASen binnen een seconde voor en na een bliksem, gemeten in stations waarin een coincidentie binnen 0,2 ms voor of na een bliksem is gemeten.



Figuur 2.6: Histogram van alle singles binnen een seconde voor en na een bliksem, gemeten in stations waarin een coincidentie binnen 0,2 ms voor of na een bliksem is gemeten.



Figuur 2.7: Histogram van alle storingen binnen een seconde voor en na een bliksem, gemeten in stations waarin een coincidentie binnen 0,2 ms voor of na een bliksem is gemeten.

2.5 Discussie

2.5.1 Signalen zonder bliksem

Als controle zijn ook signalen geanalyseerd, die zijn waargenomen zonder dat er een blikseminslag aanwezig was. Hiervoor is een aparte dataset aangemaakt. Hierin zijn de signalen verzameld van 1,025 seconde voor tot 1,025 seconde na willekeurige momenten op 19 augustus 2015. Op de drie dagen voor tot 3 dagen na 19 augustus 2015 zijn er geen bliksemontladingen geregistreerd in Nederland en België. De signalen zijn verzameld van stations die eerder coincidenties met

bliksem hebben geregistreerd. Er zijn in totaal 729 signalen verzameld in deze dataset. Ook van deze signalen is onderscheid gemaakt tussen EASen, singles en storingen.

Bij de controle van de signalen zonder bliksem, zijn er 226 EASen waargenomen in de seconde voor het willekeurige moment, en 214 EASen in de seconde erna. Dit is een verschil van $0,57\sigma$. Ook zijn er 123 singles in de seconde voor het willekeurige moment waargenomen, en 130 singles in de seconde erna. Dit is een verschil van $0,44\sigma$. Hiermee zijn er zowel in het aantal EASen als het aantal singles geen significante verschillen gemeten. De overige 36 van de 729 signalen zaten in de bin van het tijdstip waaromheen data verzameld is. Deze signalen zijn, net als bij de analyse van de data rondom bliksem, weggelaten.

2.5.2 Overige signalen rondom bliksem

In de seconde voor de bliksem zijn er 42 singles gemeten, tegen 48 singles in de seconde na de bliksem. Hiermee zijn er na de bliksem $0,6\sigma$ meer singles. Dit verschil is niet significant.

Het aantal storingen in de seconde voorafgaand aan de bliksem is 43, tegen 66 storingen in de seconde na de bliksem. Hiermee zijn er $2,2\sigma$ meer storingen na de bliksemontlading dan ervoor. Dit verschil is matig significant. In de histogrammen van de storingen rondom de bliksemontlading is te zien dat alle storingen worden gedetecteerd in de periode van 0,7 seconden voor de bliksemontlading tot 0,8 seconden erna. Er is ook een analyse gemaakt van de signalen die gedetecteerd worden tussen 2 en 1 seconden voor de bliksem, en de signalen tussen 1 en 2 seconden na de bliksem. Hierin zijn geen storingen gedetecteerd. Dit wijst erop dat er alleen storingen voorkomen binnen relatief korte tijd rondom de bliksemontlading. Aan de bliksemontlading gaat altijd een stepped leader vooraf. De tijdsduur hiervan is doorgaans tussen de 20 en 100 ms [11], en biedt daarmee geen sluitende verklaring voor de storingen die vanaf 0,7 seconden voor de bliksemontlading plaatsvinden.

2.6 Conclusie

In dit onderzoek is getracht een antwoord te vinden op de onderzoeksvraag: Zijn er aantoonbaar meer EASen voordat een bliksemontlading plaatsvindt? De hypothese was dat het aantal EASen dat gemeten wordt voorafgaand aan de bliksem, hoger is dan het aantal EASen dat na de bliksem wordt gemeten. Uit de histogrammen met daarin de verdeling van EASen rondom bliksem blijkt dat dit inderdaad het geval is. In de seconde voorafgaand aan de bliksem, worden er 72 bliksems waargenomen. In de seconde na de bliksem is dit aantal 25. Hiermee zijn er voorafgaand aan de bliksem $4,77\sigma$ meer EASen aanwezig, een zeer significant verschil. Dit steunt de theorie dat een EAS een rol speelt bij bliksemontladingen.

3 Correctie van de telsnelheid van singles voor temperatuur en luchtdruk.

Martijn Stobbelaar



Martijn Stobbelaar is verbonden aan het Cartesius Lyceum als docent natuurkunde. Na zijn opleiding tot docent natuurkunde is hij in 1995 begonnen op het Lyceum Sancta Maria in Haarlem en aan een masterstudie in Utrecht. In 2001 maakte hij een switch en is hij in de ICT gaan werken bij ABN AMRO Bank en IBM. Hoewel deze tijd enerverend en leerzaam was, miste hij het onderwijs. In 2010 kreeg hij een kans om terug te keren naar het onderwijs die hij heeft aangegrepen. Tot op heden naar volle tevredenheid. Via het project Leraar in Onderzoek hoopt hij ervaring te krijgen met wetenschappelijk onderzoek en tevens de HiSPARC detectoren beter te leren begrijpen.

3.1 Introductie.

Dagelijks wordt de aarde bestookt met hoogenergetische deeltjes vanuit de ruimte. Op het moment dat zo'n deeltje in de atmosfeer van de aarde komt vindt er interactie plaats met atoomkernen die zich in de atmosfeer bevinden. Bij deze interacties ontstaan nieuwe deeltjes, die op hun beurt ook weer botsen en nieuwe deeltjes laten ontstaan. Op deze manier ontstaat er een lawine van deeltjes die we showers noemen.

Of een shower de aarde bereikt, hangt af van de energie van het oorspronkelijke deeltje. Bij elke interactie met de atmosfeer ontstaan er nieuwe deeltjes en wordt de beschikbare energie verdeeld over steeds meer deeltjes. Elk nieuw deeltje dat ontstaat heeft daardoor minder energie en na een aantal stappen

is er niet meer genoeg energie per deeltje om nieuwe deeltjes te vormen. Vanaf dat moment neemt het aantal deeltjes in de shower weer af. Als het oorspronkelijke kosmische deeltje genoeg energie had, bereikt de shower het aardoppervlak. Is dit niet zo dan stopt de shower al ergens in de atmosfeer. De meeste deeltjes die dan zijn ontstaan worden in de atmosfeer geabsorbeerd en bereiken de aarde niet. Door hun relatief grote massa en relatief zwakke wisselwerking hebben de muonen die hoog in de atmosfeer ontstaan, een grote kans om de aarde wel te bereiken.

3.2 HiSPARC.

Voor het meten van deze showers is in 2003 het Nijmegen Area High School Array (NAHSA) opge-

richt. Kort hierna is hier het High School Project on Astrophysics Research with Cosmics (HiSPARC) uit voortgekomen. Op scholen en universiteiten zijn detectoren geplaatst voor het meten van deze lawines. De data wordt centraal verzameld, verwerkt en beschikbaar gesteld voor geïnteresseerden.

3.3 Coïncidenties en Singles.

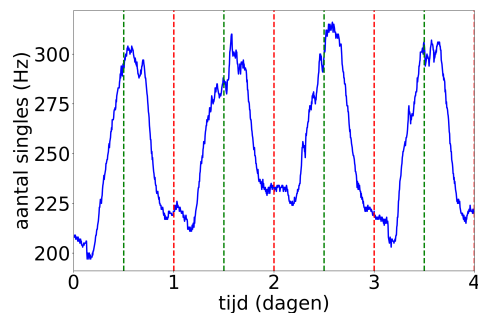
Een HiSPARC station bestaat uit twee of vier detectoren. Wanneer een shower de aarde bereikt betekent dit dat er meerdere deeltjes in een (zeer) korte tijd de aarde raken. Als binnen een tijdsinterval van $1,5\mu\text{s}$ in twee of meer detectoren een deeltje wordt geregistreerd dan noemt men dit een event of coïncidentie en wordt er vanuit gegaan dat een shower het aardoppervlak heeft bereikt. De frequentie waarmee deze coïncidenties gemeten worden ligt rond de $0,5\text{ Hz}$.

Veel vaker komt het voor dat er deeltjes worden gemeten in één van de detectoren zonder dat er binnen het genoemde tijdsbestek van $1,5\mu\text{s}$ in een andere detector ook een deeltje wordt gemeten. Er is dan geen sprake van een coïncidentie. Deze losse deeltjes worden singles genoemd. Voor singles geldt dat er ongeveer elke 5 milliseconde (200 Hz) één per detector geregistreerd wordt.

Bij het meten van singles wordt een filter toegepast om te voorkomen dat er ook gebeurtenissen worden gemeten die niets met kosmische straling te maken hebben. De filters zijn zo ingesteld dat een deeltje genoeg energie moet hebben om geregistreerd te worden. Hiervoor zijn twee drempels ingesteld. Een lage drempel: -30 mV en een hoge drempel: -70 mV . Om de deeltjes te meten moet de energie van het deeltje dus hoog genoeg zijn om een spanningspuls van -30 mV op te wekken in de PMT.

3.4 24-uurspatroon.

Bij een meting over een langere tijd lijkt het erop dat er een 24-uurspatroon zit in de aantallen singles en coïncidenties die worden gemeten. In figuur 3.1 is dit patroon voor singles bij station 4 zichtbaar gemaakt. Eenzelfde patroon is ook bij andere stations zichtbaar.

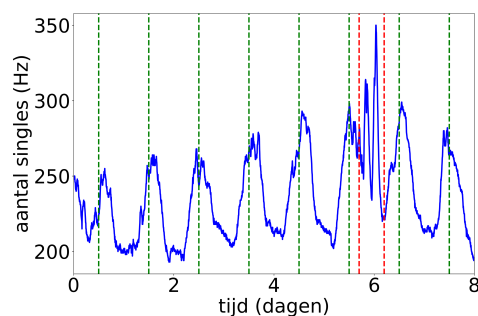


Figuur 3.1: Aantal singles per seconde, gemeten door station 4 (Cartesius Lyceum) in de eerste 4 dagen van juni 2017.

Duidelijk zichtbaar is dat het maximale aantal singles dat per seconde wordt gemeten elke dag net na 12 uur UTC, dat is 14 uur lokale tijd (groene lijn) optreedt. Het minimum ligt rond middernacht UTC (rode lijn), dus 2 uur s nachts lokale tijd.

3.5 Uitschieters.

Naast deze *dagelijkse* schommeling komen bij de singles ook uitschieters naar boven voor. Momenten waarop er ineens veel meer deeltjes worden gemeten dan op basis van het 24-uurspatroon worden verwacht. Zie figuur 3.2.



Figuur 3.2: Duidelijke uitschieters in aantallen singles bij station 4 op 6 juli 2017.

Deze uitschieters komen vooral naar voren bij metingen van deeltjes met een laag energieverlies. Ze wor-

den voornamelijk gemeten bij de lage drempel. Door de dagelijkse schommelingen in het aantal metingen zijn ze lastig terug te zien. Vooral ook omdat de metingen bij de lage drempel erg gevoelig zijn voor de temperatuur. Om deze uitschieters duidelijker zichtbaar te maken, wordt in dit onderzoek gekeken naar de afhankelijkheid tussen de gemeten aantallen singles bij met de luchtdruk en omgevingstemperatuur.

3.6 Onderzoeksvraagstelling.

De hoofdvraag die in dit onderzoek gesteld wordt is: *Kan de dagelijkse schommeling van aantallen gemeten singles worden afgevlakt door te corrigeren voor temperatuur en luchtdruk.*

3.7 Coïncidenties.

In dit onderzoek wordt bewust niet ingegaan op het aantal coïncidenties dat wordt gemeten. Uit eerder onderzoek van Mark van de Ven [12] en Loran de Vries [13] is gebleken dat het aantal coïncidenties duidelijk afhangt van de temperatuur en luchtdruk. In het onderzoek van Kees van der Velden in dit jaarverslag wordt hier dieper op ingegaan. Voor singles is dit echter nog niet eerder gedaan.

3.8 Methode.

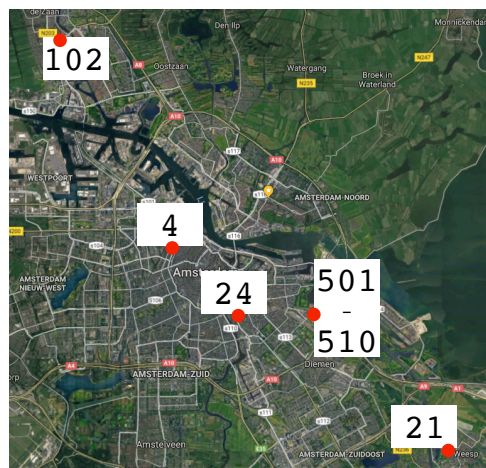
De mogelijkheid om singles te meten is beschikbaar vanaf begin 2017, maar nog lang niet alle stations hebben de juiste software. Naast dit beperkte aanbod van stations met de mogelijkheid tot het meten van singles, zat in de firmware van de HiSPARC kastjes een fout waardoor bij een station met meer dan twee detectoren de metingen niet klopten. Bij deze stations werd voortdurend een te hoog aantal singles gemeten. Dit probleem is opgelost voor een aantal stations in november 2017 maar nog niet uitgerold naar alle stations. De stations die bij dit onderzoek zijn gebruikt, zijn weergegeven in tabel 3.1.

Naast de stations voor het registreren van singles is station 501 gebruikt voor de metingen van temperatuur en luchtdruk. Uit onderzoek van Mark van de Ven [12] blijkt dat de luchtdruk verschillen over heel Nederland slechts minimaal verschillen. De relatieve

Station	Locatie	Periode
4	Cartesius Lyceum	1/6/17-1/6/18
21	Vechtstede College	1/6/17-1/6/18
24	Cygnus Gymnasium	1/11/17-1/6/18
102	Zaanlands Lyceum	1/2/18-1/6/18
501	Science park	1/11/17-1/6/18
502	Science park	1/3/18-1/6/18
507	Science park	1/12/17-1/6/18
510	Science park	1/1/17-1/6/18

Tabel 3.1: Lijst met stations waarvan de meetgegevens zijn gebruikt in dit onderzoek.

verschillen over een periode van een maand van zowel Leeuwarden als Maastricht ten opzichte van Amsterdam waren niet meer dan 0,6%. Voor de temperatuur is er slechts een klein verschil te vinden. De stations die in dit onderzoek zijn gebruikt bevinden zich allemaal binnen een straal van 14 km van station 501 zie figuur 3.3. Gezien de eerdere resultaten wordt aangenomen dat de temperatuur en luchtdruk verschillen



Figuur 3.3: De locaties van de stations gebruikt in dit onderzoek.

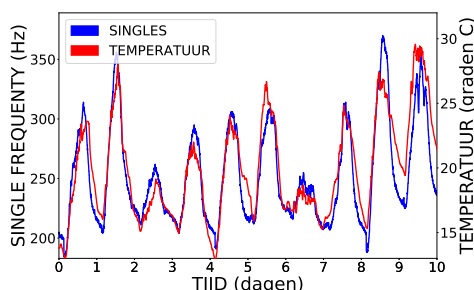
tussen de stations te verwaarlozen zullen zijn. Van de genoemde stations wordt er gekeken wat de relatie is tussen de temperatuur en de singles en de luchtdruk en de singles. Vervolgens wordt het aantal singles gecorrigeerd voor temperatuur en luchtdruk.

3.9 Temperatuur.

Het aantal singles dat geregistreerd wordt kan afhankelijk zijn van de temperatuur. Dit heeft te maken met de werking van de fotomultiplier buizen (PMT). Bij de HiSPARC detectoren is gebruik gemaakt van verschillende PMT's. De ene soort heeft een positieve correlatie met de temperatuur, de andere juist een negatieve.

In de detectoren zorgt anthraceen voor de scintillatie en dus voor het signaal voor de fotomultipliers. De golflengte van deze fotonen ligt hierbij rond de 390 nm. Afhankelijk van welk type fotomultiplier is gebruikt zien we voor het signaal een positief of juist negatief effect [14, 15].

In figuur 3.4 is duidelijk zichtbaar dat voor station 4 bij detector 1 boven de lage drempel een positieve



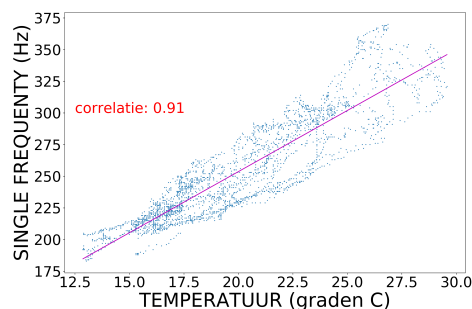
Figuur 3.4: Aantal gemeten singles station 4 detector 1 bij de lage drempel en de temperatuur. Beide gemeten van 10 tot 20 juni 2017.

relatie zit tussen de temperatuur en het aantal singles dat gemeten wordt.

Om te kijken of er een verband zit tussen de temperatuur en het de schommeling in de metingen van het aantal singles kunnen deze beide grootheden bij elkaar in een grafiek worden gezet. In figuur 4 is dit gedaan en duidelijk zichtbaar dat voor station 4 bij

de detector 1 (boven de lage drempel) een positieve relatie zit tussen de temperatuur en het aantal singles dat gemeten wordt.

Er is een duidelijk verband tussen de temperatuur en het aantal gemeten singles. Voor deze periode kunnen we ook het aantal singles tegen de temperatuur uitzetten. Dit is weergegeven in figuur 3.5. Ook hier



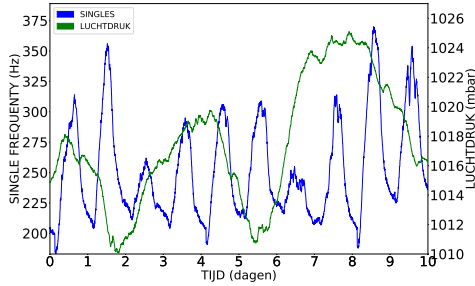
Figuur 3.5: Het aantal singles tegen de temperatuur, station 4 ch1_low, 10 tot 20 juni 2017. De correlatie tussen de temperatuur en het gemeten aantal singles voor deze periode is 0,91.

is weer duidelijk het verband te zien. Voor deze periode, en deze detector, is de correlatie tussen de beide grootheden 0,91.

3.10 Luchtdruk.

Bij coïncidenties is de luchtdruk een constante oorzaak voor de fluctuaties. Op het moment dat de luchtdruk hoog is zal de shower veel interacties hebben en dus eerder uitsterven. Bij een hoge luchtdruk zullen er dus minder events worden gemeten. Dit effect is zichtbaar gemaakt door Loran de Vries [13].

Bij singles is deze relatie naar verwachting minder groot. De singles die wij meten ontstaan in showers uit kosmische deeltjes met energie kleiner dan 10^{12} eV. De shower bereikt dus niet de aarde, maar stopt al hoog in de atmosfeer. De deeltjes die wel de aarde bereiken zijn voornamelijk muonen. Deze hebben door hun energie en massa minder interacties in de atmosfeer en zullen dus ook minder hinder ondervinden van een hogere luchtdruk. In figuur 3.6 is duidelijk te zien dat er niet een heel grote correlatie



Figuur 3.6: Aantal gemeten singles station 4 detector 1 bij de lage drempel en de luchtdruk. Beide gemeten van 10 tot 20 juni 2017.

is tussen de luchtdruk en het aantal singles dat elke seconde gemeten wordt.

3.11 Meerdere stations en langere periode

Bij het bekijken van meerdere stations over een langere periode is te zien dat ook dan de correlatie tussen de temperatuur en het aantal gemeten singles groot is en de correlatie met de luchtdruk klein. Voor de geselecteerde stations heb ik gedurende een jaar, als er data beschikbaar was, de correlatie bepaald. In tabel 3.2 is de correlatie tussen de druk en het aantal gemeten singles te zien.

De correlatie tussen de luchtdruk en het aantal gemeten singles is voor alle stations redelijk gelijk en negatief. Alleen station 507 lijkt er in eerste instantie een beetje buiten te vallen. Echter de onzekerheid in de metingen is zo ruim dat ook deze metingen in overeenstemming zijn met de overige stations. De correlatie met de luchtdruk is dus niet heel groot, maar ook niet zo klein als in eerste instantie bij station 4 leek.

Voor de correlatie tussen de temperatuur en het aantal gemeten singles is er een ander beeld te zien. Tabel 3.3 laat zien dat deze correlatie veel groter is.

Wat hier opvalt is dat er bij de stations 4, 24, 510 en 507 een positieve correlatie is. Bij de 2e detector van station 102 is dit ook te zien. Alleen bij detector

Station	Det.	Correlatie	σ
4	1	-0,12	0,44
	2	-0,15	0,45
21	1	-0,17	0,41
	2	-0,15	0,40
24	1	-0,15	0,43
	2	-0,19	0,47
102	1	-0,22	0,38
	2	-0,24	0,47
501	1	-0,33	0,39
	2	-0,20	0,38
510	1	-0,19	0,44
	2	-0,20	0,45
507	1	0,03	0,49
	2	0,02	0,49
502	1	-0,14	0,38
	2	-0,11	0,40

Tabel 3.2: Correlatie tussen de druk en het aantal singles gemeten boven de lage drempel voor beide detectoren tussen 1 juni 2017 en 1 juni 2018 bij beschikbare data.

2 van station 102 lijkt er geen correlatie te zijn. De stations 21, 501 en 502 laten een negatieve correlatie zien. Dit bevestigt het vermoeden dat de afhankelijkheid van de temperatuur te maken heeft met de gebruikte PMT's. Als de oorzaak van de fluctuaties van het aantal gemeten singles in de atmosfeer had gelegen, zouden alle stations op eenzelfde manier moeten reageren.

3.12 Singles fitten tegen temperatuur en luchtdruk.

Voor de meeste stations geldt een sterke correlatie tussen de temperatuur en het aantal gemeten singles. De temperatuur moet dus zeker in het model. Al is de correlatie tussen de luchtdruk en het aantal gemeten singles zwak in het model zal toch ook van de luchtdruk gebruik worden gemaakt. In een eerste poging om een model te maken is het model als volgt opgesteld. Laat N het aantal singles zijn, dan geldt:

$$N = T_c \Delta T + P_c \Delta P + c \quad (3.1)$$

Station	Det.	Correlatie	σ
4	1	0,80	0,21
	2	0,73	0,28
24	1	0,70	0,27
	2	0,59	0,38
510	1	0,72	0,27
	2	0,72	0,29
507	1	0,27	0,41
	2	0,28	0,41
102	1	-0,05	0,43
	2	0,55	0,39
501	1	-0,10	0,45
	2	-0,15	0,47
21	1	-0,52	0,39
	2	-0,57	0,38
502	1	-0,66	0,31
	2	-0,68	0,31

Tabel 3.3: Correlatie tussen de temperatuur en het aantal singles gemeten boven de lage drempel voor beide detectoren tussen 1 juni 2017 en 1 juni 2018 bij beschikbare data.

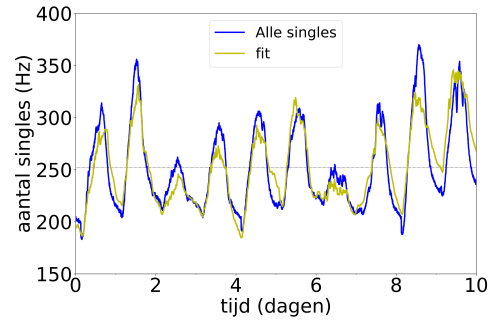
Hierbij is ΔT de verandering in de temperatuur in graden Celcius en ΔP de verandering in de luchtdruk in hPa. T_c , P_c en c zijn de parameters om het model kloppend te krijgen. Dit ging niet goed, omdat de waarde T_c zelf ook weer afhankelijk van de temperatuur bleek te zijn. Voor metingen in een interval met gelijke temperatuur was dit geen probleem, maar bij metingen over langere tijd wel. Om dit probleem op te lossen is daarna het model aangepast naar:

$$N = T_c T + P_c \Delta P + c \quad (3.2)$$

Hiermee kan een goede fit worden gemaakt met het aantal gemeten singles. Dit is goed te zien in figuur 3.7.

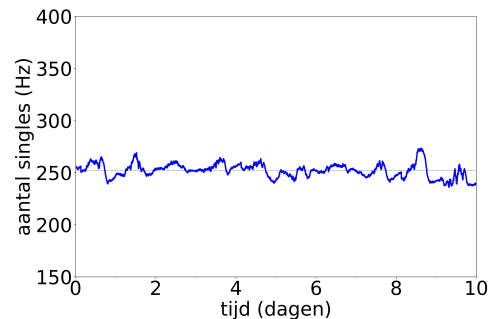
3.13 Corrigeren van de metingen.

Zoals in de onderzoeksvraag is gesteld willen we graag een manier vinden om de dagelijkse schommeling in het aantal singles dat wordt gemeten te corrigeren



Figuur 3.7: Aantal singles en de fit voor station 4 detector 1 boven de lage drempel. Data van 10 tot 20 juni 2017.

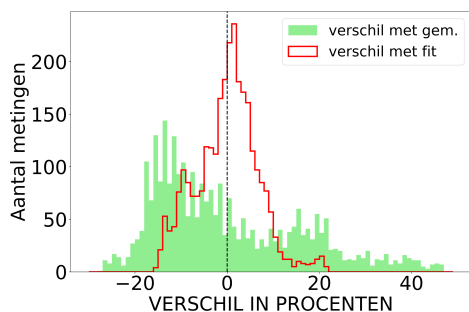
voor de veranderingen in de temperatuur en de luchtdruk. Door nu de aantallen singles die uit de fit volgen, af te trekken van het aantal gemeten singles kunnen we de metingen corrigeren voor temperatuur en luchtdruk schommelingen. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 3.8.



Figuur 3.8: Aantal singles en de fit voor station 4 detector 1 boven de lage drempel van 10 tot 20 juni 2017, gecorrigeerd voor de temperatuur en luchtdruk.

Aangezien er een goede fit kan worden gemaakt is het logisch dat de schommelingen kleiner worden. We kunnen deze verkleining vergelijken met de originele schommelingen in het aantal singles dat wordt gemeten door over een periode het gemiddelde aantal singles te nemen, en dit van de metingen af te halen. Hiermee houden we alleen nog de schommelingen rond het gemiddelde over.

In figuur 3.9 zijn deze gecorrigeerde waarden weergegeven als percentage van het gemiddelde aantal sin-



Figuur 3.9: Verschil in het aantal singles per seconde met het gemiddelde na correctie uitgedrukt als percentage van het gemiddelde.

gles over de meetperiode. Als we deze gegevens bij elkaar in een diagram zetten, is duidelijk te zien dat de spreiding van de resultaten verkregen met de temperatuur en luchtdruk kleiner is dan de resultaten van het vergelijken met het gemiddelde.

Het principe achter de methode is duidelijk meer succesvol dan een vergelijking maken met het gemiddelde.

3.14 Vergelijken stations.

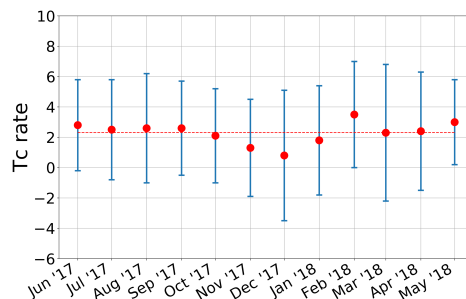
Met de data over 1 jaar is gekeken naar het gedrag van de verschillende stations. Het vergelijken van de verschillende stations, zeker over een langere periode, is lastig. De waarden van T_c en P_c hangen af van het aantal singles dat wordt gemeten. Het aantal singles dat wordt gemeten hangt af van de spanning op de PMT en van de temperatuur en luchtdruk. Dit is per station verschillend.

Om toch een vergelijking te maken is de $T_{c,rate}$ en $P_{c,rate}$ ingevoerd.

$$T_{c,rate} = 100 T_c/N \quad (3.3)$$

$$P_{c,rate} = 100 P_c/N \quad (3.4)$$

In figuur 3.10 is het verloop van de $T_{c,rate}$ voor station 4 detector 1 boven de lage drempel te zien gedurende het jaar. De waarden fluctueren rond een gemiddelde



Figuur 3.10: Het verloop van de $T_{c,rate}$ voor station 4 detector 1 boven de lage drempel bij detector 1 gedurende een jaar van metingen.

en vallen allemaal binnen elkaars foutenmarge. Het resultaat voor alle stations in dit onderzoek is in tabel 3.4 weergegeven.

Hoewel de resultaten elkaar niet veel ontploen voor de specifieke types van PMT lopen ze wel teveel uiteen en zijn de onzekerheden te groot om een correctiemethode op te stellen die voor alle stations, met een specifieke PMT, kan worden gebruikt.

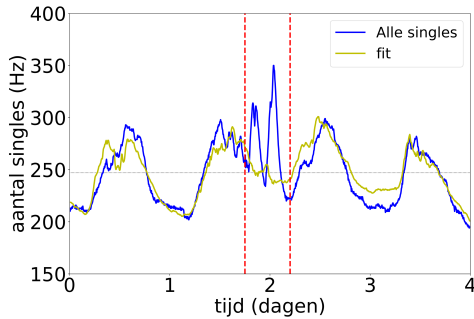
3.15 Uitfilteren van bijzondere situaties.

Voor een individueel station is het wel goed mogelijk om voor een periode een fit te maken en hierbij te kijken of er uitschieters zijn in aantallen singles die gemeten worden. In figuur 3.2 is te zien dat er rond 6 juli 2017 kleine uitschieters te zien waren in aantallen singles gemeten door station 4. In figuur 3.11 is deze periode nogmaals zichtbaar gemaakt. Nu met de fit die gemaakt is voor de temperatuur en luchtdruk. Nog duidelijker worden de uitschieters als de metingen worden gecorrigeerd met de fit en worden weergegeven als percentage van het gemiddelde zoals zichtbaar in figuur 3.12.

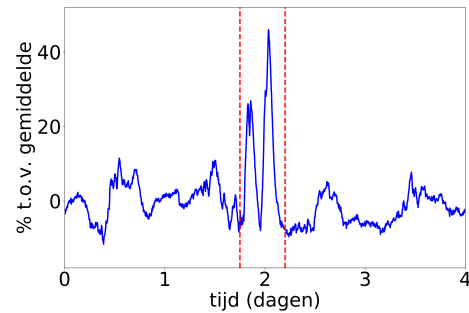
Het is heel duidelijk dat er hier iets aan de hand is dat niet simpel kan worden verklaard door het weer. Het is dus zelfs op deze beperkte manier goed mogelijk om de metingen te corrigeren voor de toestand van de (lokale) atmosfeer: de temperatuur en luchtdruk. Dit kan in de toekomst gebruikt worden voor het op-

Station	Det.	$T_{c,rate}$	σ	$P_{c,rate}$	σ
4	1	3,58	1,58	0,15	2,15
	2	2,12	1,16	-0,12	1,57
24	1	2,24	1,33	0,10	1,19
	2	1,23	1,07	-0,08	0,94
510	1	1,66	0,95	-0,08	1,01
	2	1,66	0,96	-0,12	0,95
507	1	0,58	1,17	0,04	0,75
	2	0,54	1,05	0,03	0,66
102	1	-0,36	1,11	-0,67	1,88
	2	0,83	0,88	-0,32	1,29
501	1	-0,33	0,84	-0,28	0,77
	2	-0,55	1,38	-0,25	1,43
21	1	-1,22	1,05	-0,52	1,39
	2	-1,43	1,05	-0,54	1,41
502	1	-1,19	0,49	-0,50	1,29
	2	-0,97	0,40	-0,27	1,04

Tabel 3.4: $T_{c,rate}$ en $P_{c,rate}$ van de fit voor singles gemeten boven de lage drempel tussen 1 juni 2017 en 1 juni 2018 bij beschikbare data.



Figuur 3.11: De resultaten voor station 4 detector 1 boven de lage drempel samen met de fit. Startdag 5 juli 2017.



Figuur 3.12: De resultaten voor station 4 detector 1 boven de lage drempel gecorrigeerd voor de luchtdruk en temperatuur weergegeven als percentage van het gemiddelde aantal gemeten singles. Startdag 5 juli 2017.

3.16 Conclusie.

sporen van verschijnselen die optreden in atmosfeer of daarbuiten en die niet binnen de *standaard* kosmische straling vallen.

‘ Het aantal singles dat wordt gemeten is duidelijk afhankelijk van atmosferische variabelen zoals de temperatuur en de luchtdruk. Hierdoor is het goed mogelijk

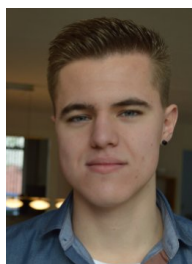
om het aantal gemeten singles te corrigeren.

In dit onderzoek is voor de temperatuur de temperatuur van de lucht buiten de skibox gebruikt. Deze temperatuur kan zeker bij zonnig weer enorm verschillen van de temperatuur in de skibox en dus van de PMT. In vervolgonderzoek zou het goed zijn om de temperatuur te meten in de skibox op de PMT. Dit zal de relatie tussen de metingen en de temperatuur nog duidelijker maken. Uit nog niet gepubliceerd onderzoek van Kasper van Dam blijkt dat de PMT's met een positieve correlatie met de temperatuur als het warmer wordt waarnemingen van singles lijken te creëren. De meeste hiervan hebben een lage energie en vallen onder de grens van -70 mV. Dit verschijnsel heeft zowel effect op de metingen van singles als op de metingen van coincidenties en is dus zeker vervolgonderzoek waard.

Als in de toekomst de metingen van singles gebruikt gaan worden om verschijnselen zoals zonnevlammen te bestuderen, dan is het handig als alle nieuwe detectoren die worden gebouwd dezelfde PMT's krijgen, zodat het gedrag van de PMT bij alle stations hetzelfde is. Verder zou er een temperatuursensor op de PMT's moeten worden geplaatst zodat naast de andere metingen ook de temperatuur van de PMT bekend is. Hiermee is het mogelijk om direct in de verwerking van de dagelijkse meetgegevens een correctie uit te voeren zodat uitschieters sneller kunnen worden gevonden en vergelijkingen kunnen worden gemaakt met meerdere stations.

4 De invloed van de detectorafstand op de meetresultaten van HiSPARC tweeplatenstations.

Kees van der Velden



Kees van der Velden werkt sinds 2014 als natuurkundedocent aan het Pax Christi College te Druten. In 2015 heeft hij zijn tweedegraads bevoegdheid natuurkunde en scheikunde behaald aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen. Naast natuurkundedocent is Kees medeoprichter en bestuurder van Stichting TopTutors. Een landelijke stichting die oudleerlingen en scholen begeleidt bij het opzetten van hun eigen non-profit tutor netwerk. Kees heeft aan het Leraar in Onderzoek project deelgenomen om zelf natuurwetenschappelijk onderzoek uit te kunnen voeren. Zijn onderzoek was tevens zijn onderzoeksstage voor een masterstudie aan de Hogeschool Utrecht. Hiermee heeft Kees in dit studiejaar zijn eerstegraads bevoegdheid behaald.

4.1 Kosmische straling en extensive air showers

4.1.1 Historie

Van 1896 tot 1926 was het onbekend waarom een elektroscop ontladde wanneer deze goed was geïsoleerd en er geen röntgenstraling of radioactieve stralingsbron aanwezig was. In 1903 deden Rutherford en Cooke en tegelijkertijd McLennan en Burton (1903) een experiment met een door metaal afgeschermd elektroscop. Zij merkten dat de elektroscop trager werd ontladen. Ze concludeerden dat de straling van buiten de afscherming moest komen [16, 17].

Hess deed in 1911 en 1912 experimenten met lucht-

ballonnen [18, 19]. Hij mat dat de hoeveelheid ioniserende straling toeneemt als je hoger in de atmosfeer bent. Hieruit concludeerde Hess dat de ioniserende straling van buiten de aarde moest komen. Milikan en Cameron experimenteerden in 1926 met elektroscopen onder water. Hieruit concludeerden zij dat de ioniserende straling van boven kwam. Milikan stelde vanuit deze conclusie voor om deze ioniserende straling *kosmische straling (cosmic rays)* te noemen [20]. Bothe, Kohlhörster en Compton stelden dat deze kosmische straling uit geladen deeltjes zou bestaan [21, 22]. Milikan bestreed deze bevindingen maar concludeerde in 1933, na eigen experimenten, dat kosmische straling voornamelijk uit geladen deeltjes bestaat [23].

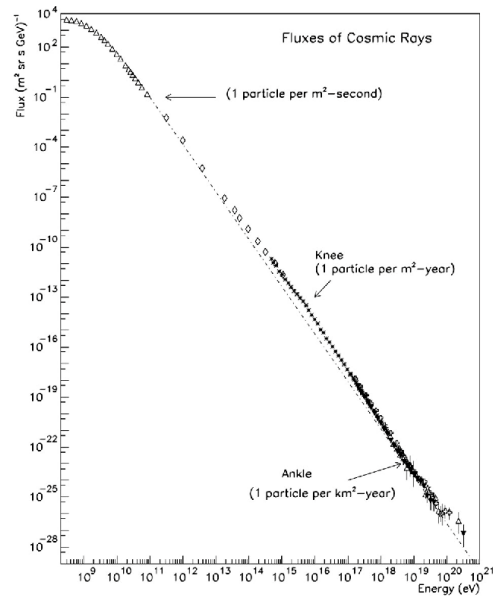
4.1.2 Primaire kosmische straling

De atmosfeer van de aarde wordt continu gebombardeerd door kosmische straling, die zich voortbeweegt met relativistische snelheden. Deze straling wordt primaire kosmische straling genoemd omdat het nog geen interactie heeft aangegaan met materie in de atmosfeer. De geladen deeltjes van deze primaire kosmische straling bestaan voor 84% uit protonen, voor 12% uit alfadeeltjes, voor 3% uit zwaardere kernen (Li, Be, B, Sc, Ti, V, Cr en Mn) en daarnaast voor ongeveer 1% uit elektronen. Er komen nauwelijks antideeltjes voor in de primaire kosmische straling. Deze antideeltjes ontstaan pas bij de interactie met deeltjes uit de atmosfeer, maar dan worden deze deeltjes niet meer primaire kosmische straling genoemd. In 2013 werd met behulp van de data van de Fermi Space Telescope aangetoond dat een significant gedeelte van de primaire kosmische straling ontstaat in supernova's, de explosie van de sterren [24].

In figuur 4.1 hieronder is het spectrum van de kosmische straling weergegeven. In de figuur staat de fluxdichtheid Φ van de kosmische straling als functie van de energie E . De verticale en de horizontale as hebben een logaritmische schaalverdeling.

4.1.3 Secundaire kosmische straling

Wanneer de primaire kosmische straling in de atmosfeer binnendringt, kunnen de geladen deeltjes botsen met moleculen en atomen in de atmosfeer (voornamelijk zuurstof of stikstof). De eerste botsingen vinden op een hoogte van 15 tot 20 kilometer plaats. Bij deze interacties ontstaan nieuwe deeltjes. Deze nieuwe deeltjes botsen vervolgens weer op andere atomen of moleculen waardoor kettingreacties ontstaan. In deze kettingreacties ontstaan verschillende soorten straling zoals röntgenstraling, muonen, protonen, alfadeeltjes, pionen, elektronen en neutronen. Alle deeltjes samen worden een cascade of shower genoemd. Na elke interactie bevat de straling minder energie per deeltje. Als de energie per deeltje onder een bepaald niveau komt, kan het geabsorbeerd worden door de materie in de atmosfeer. Als de primaire kosmische straling genoeg energie heeft, zal de shower het aardoppervlak kunnen bereiken voordat hij wordt



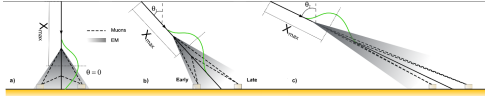
Figuur 4.1: Het spectrum van de kosmische straling. De fluxdichtheid als functie van de energie. De meetpunten worden met verschillende symbolen aangegeven. Elk symbool staat voor een ander onderzoek. Bron: S. P. Swordy in Cronin et al. (1997).

geabsorbeerd in de atmosfeer. Showers, waarvan de deeltjes het aardoppervlak bereiken, worden *extensive air showers* (EAS) genoemd. In een shower wijken de meeste stralingsdeeltjes niet meer dan één graad af van de hoek waaronder de primaire kosmische straling de atmosfeer binnenviel. Toch kan het oppervlak van een extensive air shower een grootte van ongeveer een vierkante kilometer bereiken. Of een shower een extensive air shower wordt, wordt door twee factoren bepaald:

1. De energie van de primaire kosmische straling.
2. De *atmospheric depth*. De atmospheric depth is de hoeveelheid materie in de atmosfeer waardoor de shower zich heeft verplaatst. Deze atmospheric depth is te berekenen met de volgende integraal waarbij de hoek θ de zenithhoek is, de hoek ten opzichte van de normaal waarop de primaire

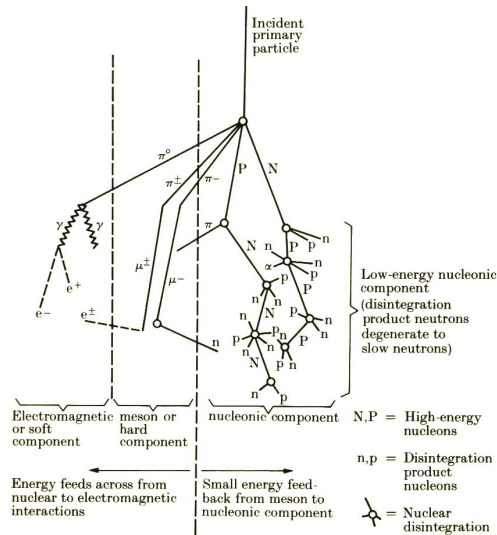
kosmische straling binnenvalt (zie figuur 4.2).

$$X = \frac{1}{\cos \theta} \int_h^\infty \rho(h') dh' \quad (4.1)$$



Figuur 4.2: Showers van dezelfde primaire kosmische straling onder verschillende hoeken. Bron: Dova, M.T. et al. (2009). Let op: de hoek tussen de uiterste grenzen van de shower zijn te groot getekend.

In figuur 4.3 zijn verschillende mogelijke interacties weergegeven. In deze figuur is de shower opgedeeld in drie verschillende componenten:



Figuur 4.3: Schematische weergave van mogelijke interacties bij kosmische straling in de atmosfeer. Bron: Akasofu and Chapman (1972).

1. Elektromagnetische component (soft). Onder het elektromagnetische component worden elektronen en fotonen gerekend. Mogelijke interac-

ties binnen dit component zijn:

$$e \rightarrow e' + \gamma \quad (4.2)$$

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (4.3)$$

De reactie 4.2 is remstraling (elektronen botsen op materie) en 4.3 is de paarproductie.

2. Hadronische component (hard). Deze component gaat over de interacties tussen hadronen (baryonen en mesonen in dit geval). Als een proton interacteert met de atmosfeer kunnen er mesonen ontstaan. Voorbeelden van deze interacties zijn:

$$p + p \rightarrow p + \Delta^+ \rightarrow p + p + \pi^0 \quad (4.4)$$

3. Mesonen component (hard). In ongeveer negen van de tien gevallen ontstaan pionen, in de overige gevallen kaonen. Deze pionen (en kaonen) vervallen weer tot muonen, elektronen, hun neutrino's en fotonen. Voorbeelden van deze interacties zijn:

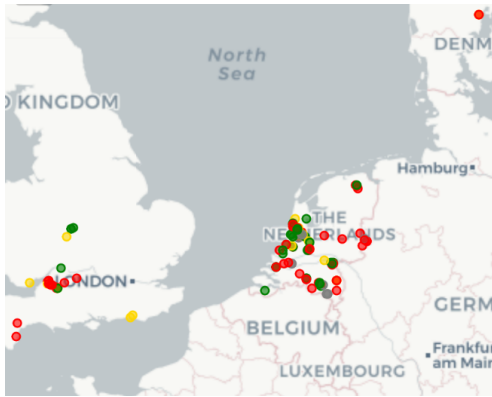
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (4.5)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (4.6)$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (4.7)$$

4.2 De meetopstelling

Verdeeld over Nederland, Engeland en Denemarken zijn er 139 meetstations (exclusief enkele met onbekende status) met ieder minimaal twee detectoren. De meeste stations zijn geplaatst op daken van middelbare scholen en universiteiten. In figuur 4.4 is de locatie van de stations te zien. Stations, die dicht bij elkaar liggen, vormen samen een cluster. In Nederland zijn er 31 clusters waaronder bijvoorbeeld cluster Nijmegen en cluster Amsterdam. Elk station bestaat uit twee of vier detectoren. Het Science Park in Amsterdam bevat dertien stations met ieder vier detectoren. Buiten Science Park zijn er 126 stations waarvan 90% twee detectoren en 10% vier detectoren hebben. Dit hele netwerk van stations kan worden gezien als één grote meetopstelling. In elk station zijn de detectoren op één set elektronica met een bijbehorende computer aangesloten.



Figuur 4.4: De HiSPARC-stations in Nederland, Engeland en Denemarken (groen = actief, rood = inactief, geel = probleem, grijs = station afgesloten, in het verleden data gegenereerd).

4.2.1 De detectoren

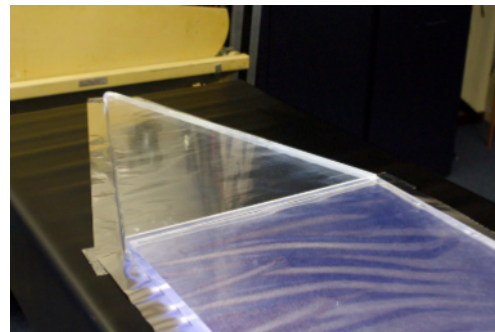
Elke detector bestaat uit meerdere componenten, die samen zijn gebouwd en ondergebracht in één skibox. Met behulp van een verankering worden deze detectoren bevestigd op daken. Elke detector bestaat uit de volgende componenten:

1. Een scintillatorplaat van $1,0 \times 0,5 \text{ m}^2$ met een dikte van 25 mm.
2. Een stuk perspex in de vorm van een driehoek.
3. Een aansluitblokje.
4. Een fotoversterkbuis oftewel PMT (9107B van Electron Tubes).
5. Een laag aluminiumfolie.
6. Zwart vijverfolie.
7. Een schuimblok als ondergrond.
8. De skibox.

De scintillatorplaat is met speciale, optische lijm aan de perspex driehoek bevestigd (figuur 4.5 en 4.6). Op de perspex driehoek wordt met dezelfde lijm het aansluitblokje bevestigd. Met behulp van een aansluitblokje (figuur 4.7) wordt de perspex driehoek



Figuur 4.5: De scintillatorplaat.

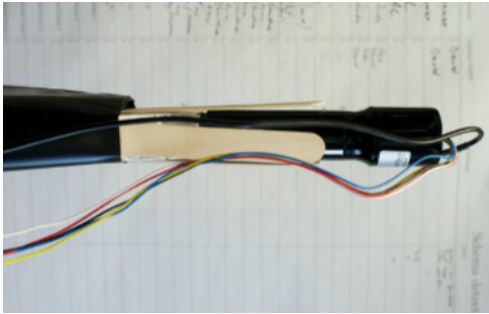


Figuur 4.6: De lichtgeleider.

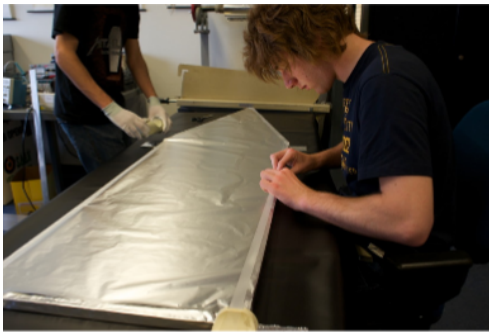


Figuur 4.7: Het aansluitblokje van de PMT.

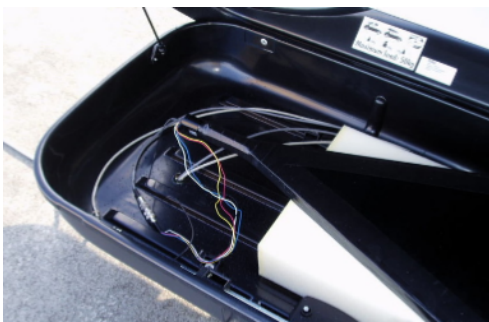
verbonden met de fotoversterkbuis (figuur 4.8). Dit geheel wordt ingepakt in aluminiumfolie (figuur 4.9) en zwart vijverfolie. Uiteindelijk wordt deze samenstelling lichtdicht ingepakt (figuur 4.10).



Figuur 4.8: De fotoversterkbuis.



Figuur 4.9: Het geheel ingepakt in een stuk aluminiumfolie.



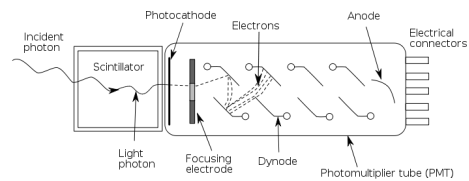
Figuur 4.10: Inhoud van de skibox, de scintillatorplaat ingepakt in vijverfolie, bovenop een blok schuim.

Wanneer een geladen deeltje zich door de scintillatorplaat voortbeweegt, zal het deeltje energie verliezen. De energie die dit deeltje verliest zal worden omge-

zet in ongeveer 30-40 duizend fotonen (fluorescentie). Het verval van aangeslagen toestand tot grondtoestand heeft daarin vervaltijd van 2,1 ns. De fotonen worden in willekeurige richtingen uitgezonden, dit is in figuur 4.5 zichtbaar als een blauwe rand van de scintillatorplaat. De PMT wordt niet direct op de scintillatorplaat bevestigd omdat fotonen, die in de dichtstbijzijnde hoeken ontstaan, dan niet de PMT kunnen bereiken. Vanwege praktische overwegingen is gebruik gemaakt van een perspex driehoek als verlengstuk. Hieraan is de PMT eenvoudig te bevestigen en te spalken met houten stokjes. Fotonen kunnen op deze manier via de perspex driehoek en het aansluitblokje in deze fotoversterkbuis terecht komen. De fotoversterkbuis zet fotonen om in elektrische signalen.

4.2.2 Fotoversterkbuis

De fotoversterkbuis, die is bevestigd aan de perspex driehoek, bestaat uit een vacuüm glazen buis. De inhoud van deze buis is weergegeven in figuur 4.11. Aan de binnenkant van deze buis is een dunne laag (enkele atomen dik) metaal opgedampt. De fotonen die in de

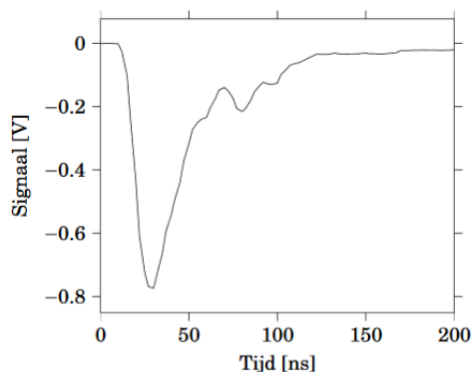


Figuur 4.11: Schematische dwarsdoorsnede van een fotoversterkbuis. Bron: Wikipedia Photomultiplier, afbeelding door C. Eberhardt.

scintillatorplaat vrijkomen hebben meer energie dan de uittree-energie van de elektronen in dit metaal. Wanneer een foton wordt geabsorbeerd door dit metaal (kathode) komt er een elektron vrij. Om te zorgen dat er genoeg elektronen beschikbaar zijn, wordt er een negatieve potentiaal op het metaal gezet. Het elektron wordt automatisch richting de dynode (metaalplaatje) met het hogere potentiaal versneld. Hier botst het elektron met een verhoogde snelheid tegen de dynode. Bij elke botsing komen weer meer elektronen vrij. Op deze manier neemt per dynode het aan-

tal elektronen dat vrijkomt toe. Uiteindelijk komt er een grotere hoeveelheid elektronen aan op de anode. Hoe hoger de spanning, hoe groter de versterkingsfactor. De hoogspanning, die over de PMT wordt ingesteld, bepaalt dus de grootte van de stroompuls die de PMT levert.

Wanneer een shower de detector bereikt, zullen er één of meerdere geladen deeltjes door de scintillatorplaat bewegen en daardoor honderden fotonen de PMT bereiken. Fotonen, die voorin de scintillatorplaat ontstaan, zullen de PMT naar alle waarschijnlijkheid eerder bereiken dan fotonen die achterin de plaat zijn ontstaan. Het invallen van een shower op een detector veroorzaakt daarom een stroompuls, die gedurende een korte tijd varieert in sterkte. Deze stroom zal door een vaste weerstand stromen. Als gevolg hiervan is over de weerstand een spanning te meten. Dit analoge signaal wordt via kabels doorgegeven aan de elektronica van HiSPARC. Elk deeltje dat door de scintillatorplaat beweegt, levert op deze manier een puls op met een eindige stijg- en daaltijd. Deze tijden zijn eigenschappen van de scintillatorplaat en de uitlees-elektronica. In figuur 4.12 is een voorbeeld van een



Figuur 4.12: Een puls van één PMT bij een detectie.

enkele puls weergeven. De spanning is evenredig met de lichtintensiteit op de PMT.

4.2.3 De elektronica en software

Elk station verwerkt zelf de gemeten signalen oftewel pulsen, zoals die in figuur 4.12. De verwerkte

data wordt vanuit de computer naar de gezamenlijke database geüpload. Elk station heeft om deze reden exact dezelfde elektronica en software. De elektronica van één station bestaat uit:

1. Twee kabels naar elke detector (30 meter).
2. HiSPARCI: uitleeselektronica (het *rode kastje*).
3. Een GPS-tracker met coaxkabel.
4. De computer met LabVIEW.

De HiSPARCI, het rode kastje, is weergegeven in figuur 4.13 (voorzijde) en 4.14 (achterzijde). HiSPARCI heeft twee poorten voor elke PMT één. Wanneer



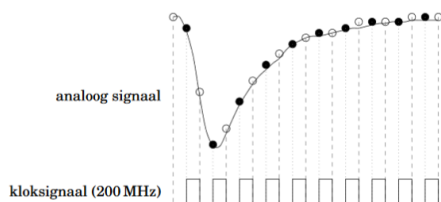
Figuur 4.13: Voorzijde HiSPARCI.



Figuur 4.14: Achterzijde HiSPARCI.

een station vier detectoren heeft, worden er twee rode kastjes gebruikt. Vanuit het kastje gaat er één voedingskabel en één coaxkabel naar iedere detector. De twee voedingskabels en de twee coaxkabels hebben allen een lengte van precies 30 meter om tijdsverschillen te voorkomen. Elke voedingskabel levert de spanning aan de PMT. Elke coaxkabel wordt gebruikt om het ontstane negatieve analoge signaal van de PMT naar het kastje te sturen. Aan de achterzijde van de HiSPARCI wordt de coaxkabel van de GPS-antenne aangesloten. Via twee USB-kabels wordt de HiSPARCI aan de computer aangesloten.

In de HiSPARCII zitten vier analoog-digitaalomzetter (ADC's). Het analoge signaal van elke PMT, zoals in figuur 4.12, wordt door twee ADC's van 200 MHz omgezet. In figuur 4.15 is de bemonstering visueel gemaakt. Aan het begin van de 200 MHz-puls wordt



Figuur 4.15: Het bemonsteren van het analoge signaal met twee ADC's.

door ADC1 bemonsterd en aan het einde van de 200 MHz-puls wordt door ADC2 bemonsterd. Hierdoor wordt het analoge signaal met een frequentie van 400 MHz bemonsterd. Hierdoor is de meetonzekerheid in de tijd 2,5 ns.

Het bemonsterde analoge signaal wordt per bemonstering gekwantificeerd en gecodeerd. Wanneer het signaal op een bepaald moment boven de ingestelde low threshold uitkomt (trigger) wordt het digitale signaal opgeslagen. Van elk signaal, dat boven de threshold uitkomt, wordt 1 μs vóór deze zogenoemde *trigger* opgeslagen, dan 1,5 μs daarna wat de *coïncidence window* wordt genoemd opgeslagen en tenslotte wordt 3,5 μs na de *coïncidence window* bewaard. In totaal wordt er dus van elke puls, die boven de trigger threshold is gegaan, 6,0 μs bewaard. Wanneer in een tweeplatenstation door beide kanalen tegelijk een signaal ontstaat dat boven de high threshold gaat, spreekt men van een event of coïncidentie. Dit laatste gebeurt door de software genaamd *LabVIEW*. Men gaat ervan uit dat coïncidenties voornamelijk ontstaan door kosmische showers (EAS); één shower die door beide detectoren in een kort tijdsbestek gaat. Toch is er een kans dat er in de *coïncidence window* door detectoren een signaal wordt gemeten, terwijl er geen enkele shower door de twee detectoren ging.

Elk station heeft een computer waarop LabVIEW staat geïnstalleerd. LabVIEW heeft twee functies. Op de eerste plaats stuurt het programma de

HiSPARC-elektronica aan. Het programma heeft een overzichtelijke user interface waardoor de gebruiker o.a. de spanning over de PMT kan veranderen. Op de tweede plaats stuurt LabVIEW de DAQ-software (data-acquisitie-software) aan. Deze software slaat gegevens van de coïncidenties op in een MySQL-database op de harde schijf van de computer. Wanneer de database een bepaald aantal coïncidenties bevat (meestal 100) wordt deze data geüpload naar Nikhef. Indien er geen internetverbinding is, blijft de data bewaard op de harde schijf van de computer en wordt dit later naar Nikhef geüpload. Binnen Nikhef wordt deze data op meerdere manieren verwerkt en opgeslagen. Uiteindelijk is alle data voor iedereen beschikbaar. Middelbare scholen, LiO's en overige geïnteresseerden kunnen alle data van de detectoren gebruiken om onderzoek te doen. De data van HiSPARC is op verschillende manieren te benaderen:

1. Via een API, waardoor andere analysesoftware de data kan binnenhalen.
2. Via `data.hisparc.nl` waar verschillende histogrammen van meerdere stations kunnen worden bekeken via een interface.
3. Via de HiSPARC SAPHIRE bibliotheek voor python. Op deze manier kan de data van meerdere stations worden vergeleken in een pythonprogramma.

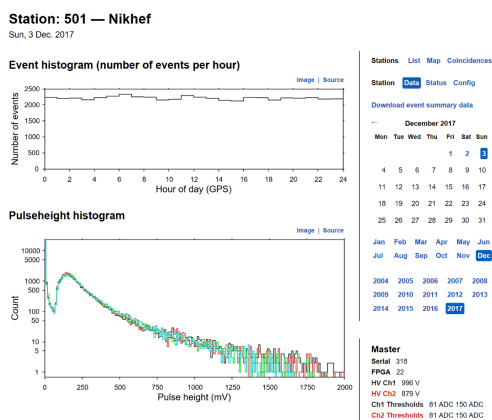
4.2.4 Data via SAPHIRE of data.hisparc.nl

Via SAPHIRE kan van meerdere stations de data van meerdere dagen worden binnengehaald. In de SAPHIRE module heeft het bestand een hiërarchische opbouw. Deze data zit dan in een zogenoemde Root-Group, een structuur van de datatabel. De Root-Group bestaat uit een eindig aantal rijen. Elke event heeft één rij. In tabel 4.1 is overzichtelijk weergegeven welke data van de ontvangen coïncidenties wordt opgeslagen.

nr	voorbeeld	informatie	(fysische) betekenis
1	1	event_id	Het nummer van het event in de geselecteerde data.
2	1508716803	timestamp (s)	Tijdstip van het event in seconden (GPS-tijd).
3	179872265	nanoseconds (ns)	Het tweede, meer nauwkeurige deel van de timestamp. Dit is het aantal nanoseconden vanaf de normale timestamp.
4	1508716803179872265	ext_timestamp (ns)	Volledige timestamp in aantal nanoseconde (GPS-tijd).
5	[58, 234, -1, -1]	pulseheights	Vershil tussen de nullijn (baseline) van het signaal en de maximale signaalsterkte tijdens het event. In het voorbeeld zijn vier getallen gegeven. De eerste twee zijn de pulseheights van channel 1 en channel 2. De laatste twee zijn -1. Dit betekent dat er geen signaal was. Indien er gebruik wordt gemaakt van een vierplatenstation, dan worden hier de andere pulseheights gegeven.
6	[348, 3299, -1, -1]	integrals	Het oppervlak van het signaal onder de nullijn. Dit is een maat voor het aantal deeltjes dat bij de detectie door de detector ging.
7	-999., 1.56110001, -1., -1.	n1, n2, n3, n4	De pulsintegrals gedeeld door de energie van n MIP (ongeveer 150mV). Dit geeft dus een indicatie van de hoeveelheid deeltjes die tijdens een event door een scintillatorplaat gingen.
8	15., 15., -1., -1.	t1, t2, t3, t4	Dit zijn de aankomsttijden van het signaal vanuit de verschillende detectoren/channels. In het voorbeeld is te zien dat in beide detectoren de aankomsttijd 15 nanoseconde was. Dit betekent dat de kans groot is dat de shower van bovenaf kwam (zenit). Als er een verschil is te vinden tussen de aankomsttijden kan dit duiden op een inval onder een bepaalde hoek.
9	22.5	t_trigger	Dit zijn het aantal nanoseconde tussen het begin van de trace en de tweede pulse over de hoge drempel

Tabel 4.1: Structuur van de RootGroup, waarin de HiSPARC-data wordt binnengehaald via SAPPHiRE.

Via de eerder genoemde website `data.hisparc.nl` kunnen geïnteresseerden verschillende histogrammen van alle stations bekijken. In figuur 4.16 is zo'n pagina van station 501 weergegeven. De beheerder van



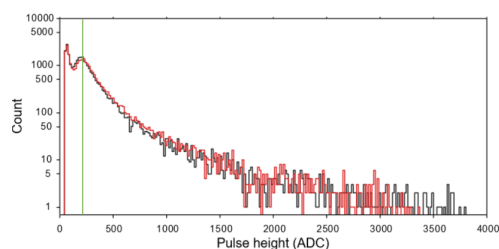
Figuur 4.16: Een voorbeeld van een overzichtspagina van `data.hisparc.nl`

dit station kan in één oogopslag de status van zijn station bekijken. Eén van de belangrijke indicatoren om te zien of een station goed functioneert, is het *pulseheight* histogram, de tweede figuur in de afbeelding. Door in een pythonnotebook `HISPARC SAPPiRE` op te halen kan data van enkele of meerdere stations worden gedownload. Door te programmeren kunnen er verschillende analysetools worden ontwikkeld om onderzoek te doen naar kosmische straling. Zo kan men bijvoorbeeld het aantal coïncidenties per tijdseenheid per station bepalen om eventuele anisotropie te ontdekken.

Sommige stations hebben naast twee of vier scintillatordetectoren ook een weerstation. Met behulp van een weerstation wordt naast de eventdata ook de weerdata naar `HISPARC` verstuurd. Hierdoor worden per tijdseenheid (vaak eens per 5 minuten) verschillende atmosferische eigenschappen zoals temperatuur, luchtvochtigheid, luchtdruk, windrichting, windsnelheid, zonne-intensiteit, UV-index, hoeveelheid regen en het dauwpunt opgeslagen. Op deze manier is het mogelijk om onderzoek te doen naar de correlatie tussen atmosferische eigenschappen en secundaire kosmische straling.

Pulshoogte histogram

In figuur 4.15 is zichtbaar hoe een signaal wordt bemonsterd. Elk signaal heeft, net als het signaal in figuur 4.15, een piek oftewel een maximale waarde. Deze waarde wordt de pulshoogte genoemd. Bij elke coïncidentie in een tweepatenstation worden dus twee pulshoogtes geregistreerd. Eén pulshoogte per detector. Na een bepaalde periode kun je een pulshoogtehistogram maken zoals in figuur 4.17. Hierin is in één oogopslag zichtbaar hoe vaak bepaalde pulshoogtes zijn gemeten.



Figuur 4.17: Pulshoogtehistogram van station 8009, 24 uur, 04-04-2018. zwart = ch1, rood = ch2, groene lijn is de positie van de MIP-piek.

hoogten zijn gemeten.

Wanneer genoeg data beschikbaar is, wordt de piek op de groene verticale lijn zichtbaar. Bij tweepatenstations is vijf à zes uur aan data benodigd. Voor vierpatenstations is dit drie uur omdat de coïncidentiefrequentie bij deze stations hoger is. Deze piek wordt de MIP-piek genoemd (Minimum Ionizing Particle). Dit is de pulshoogte, die het vaakst wordt gemeten door beide detectoren. Men neemt aan dat coïncidenties, waarbij er één geladen deeltje door beide detectoren gaat, het vaakst voorkomen. In figuur 4.17 ligt de MIP-piek op 210 ADC. Eén deeltje hoort dus bij een pulshoogte van 210 ADC. Elke dag wordt de positie van de MIP-piek bepaald. Met dit ijkpunt wordt vervolgens per coïncidentie uitgerekend hoeveel deeltjes (aantal MIPs) er door elke detector zijn gegaan. Deze gegevens worden opgeslagen in de `RootGroup` (zie tabel 4.1).

De positie van de MIP-piek verschilt per station. De MIP-waarde is tenminste afhankelijk van: de temperatuur van de PMT, de spanning over de PMT,

de dikte van de scintillatorplaat, de montage van de detector en de leeftijd van de detector.

4.3 Onderzoek naar invloed detectorafstand op de meetresultaten van tweeplatenstations.

4.3.1 Aanleiding

Sinds 2002 worden er door het High School Project on Astrophysics and Research with Cosmics (HiSPARC) detectoren voor kosmische straling op middelbare scholen in Nederland geplaatst. Een middelbare school in het project heeft één, of soms een paar stations die op hun beurt bestaan uit twee of vier detectoren. Op dit moment zijn er 139 stations, waarvan 90% twee detectoren bevatten. De detectoren worden bij HiSPARC (Nikhef) in elkaar gezet samen met middelbare schoolleerlingen, vaak als een praktische opdracht zoals het profielwerkstuk. De detectoren worden vervolgens met instructies van HiSPARC op de daken geplaatst in skiboxen. In de instructies wordt geadviseerd de detectoren, bij een tweeplatenstation parallel aan elkaar te plaatsen met een afstand van vijf à zes meter tussen beide detectoren. Fokkema [23] geeft aan dat een afstand van minder dan tien meter tussen de detectoren beperkend kan zijn. In dit onderzoek wordt onderzocht wat de invloed is van de afstand tussen twee detectoren, vanaf nu detectorafstand genoemd, op de meetresultaten van HiSPARC-detectoren in een tweeplatenstation.

4.3.2 Doelstellingen en onderzoeksvragen

De onderzoeksvraag luidt daarom:

Wat is de invloed van de detectorafstand op de meetresultaten van HiSPARC-detectoren in een tweeplatenstation?

Hieruit volgen de volgende deelvragen:

- Wat is het verband tussen de detectorafstand bij een tweeplatenstation en de gemeten tijdsverschillen bij coincidenties?
- Wat is het verband tussen de detectorafstand bij een tweeplatenstation en het aantal gemeten coincidenties per tijdseenheid?

- Wat is de invloed van de detectorafstand bij een tweeplatenstation op de vorm van het pulshoogtehistogram.

4.3.3 Methode: station 2010

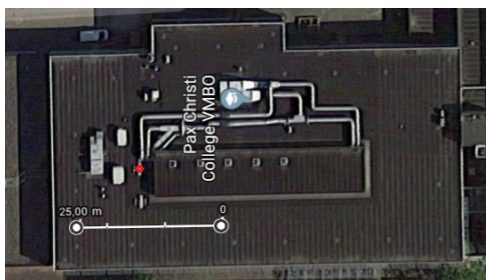
In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van het tweeplatenstation 2010 (Pax Christi College) te Druten. Dit station ligt geïsoleerd van andere stations in het cluster. Het dichtstbijzijnde station bevindt zich op een afstand van 15,1 km van station 2010. Om deze reden zal dit station niet deelnemen aan een coincidentie met een ander station. Daarom zal het alle waarschijnlijkheid weinig worden gebruikt in onderzoeken waarbij gehele clusters worden gebruikt. Het verplaatsen van één van de platen heeft dan geen effect op het hele netwerk.

Gedurende één week worden de detectoren van het station op een vaste afstand van elkaar geplaatst. Op deze manier worden de volgende detectorafstanden gedurende acht weken getest: 40, 35, 30, 25, 20, 15, 10 en 5 meter (zie figuur 4.18 en 4.19). Dit meetbereik wordt begrensd door de lengte van de kabels, 30 m



Figuur 4.18: De opstelling van station 2010. De afstand wordt gevarieerd: 40, 35, 30, 25, 20, 15, 10 en 5 meter.

per detector. Grotere afstanden zijn niet mogelijk doordat de kabels aan één kant van het gebouw door het dak naar boven komen (rood punt in figuur 4.19). De keuze van een lange tijdsduur, in dit geval een week, is gemaakt op basis van de grote detectorafstand (40 m). Door de grotere afstand zullen minder showers beide detectoren raken. Een langere periode is daarom nodig om genoeg meetresultaten te verkrijgen. Gedurende de week wordt de data doorgestuurd naar HiSPARC. Met behulp van drie pythonnotebooks wordt gedurende de week het aantal coincidenties, de



Figuur 4.19: Foto van het dak van de school. Bij de rode punt zijn de kabels naar het dak getrokken.

d(m)	eerste dag (dd-mm-yy)	laatste dag (dd-mm-yy)
5	27-03-2018	02-04-2018
10	04-04-2018	10-04-2018
15	12-04-2018	18-04-2018
20	20-04-2018	26-04-2018
25	28-04-2018	04-05-2018
30	06-05-2018	12-05-2018
30 ¹	14-05-2018	22-05-2018
35 ¹	24-05-2018	04-06-2018
40 ¹	06-06-2018	13-06-2018
45 ¹	15-06-2018	

Tabel 4.2: Detectorafstanden van station 2010 op verschillende data.

tijdverschillen bij de coïncidenties met standaarddeviatie en de invloed op het pulshoogtehistogram onderzocht. Station 2010 heeft elke keer één week dezelfde detectorafstand gehad. De achtste dag is de detector van afstand veranderd. Daarbij is steeds dezelfde detector verlegd. In tabel 4.2 is te vinden op welke dagen de detector een bepaalde detectorafstand

¹Om de detectorafstand 35 en 40 meter te maken moest de opstelling worden veranderd. De maximale kabellengte van één detector is 30 meter. Hierdoor is het bereik van de opstelling begrensd. Door de detector diagonaal op het dak te plaatsen was het mogelijk de detectorafstand te vergroten. Het meetpunt van 30 meter is om deze reden eerst herhaald met de diagonale opstelling. Er bleken geen verschillen in de meetresultaten tussen de twee meetpunten van 30 meter. Met deze constatering is het onderzoek voor de grotere detectorafstanden voortgezet.

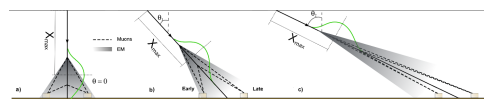
had. Bij alle data geldt dat de detector die dag 24 uur dezelfde detectorafstand had. Gedurende het hele onderzoek is de spanning over beide PMT's niet gewijzigd.

Om de invloed van andere factoren uit te sluiten wordt onderzocht wat de invloed van de temperatuur en de luchtdruk is op het aantal coïncidenties per tijdseenheid en op de vorm van het pulshoogtehistogram.

4.4 Resultaten

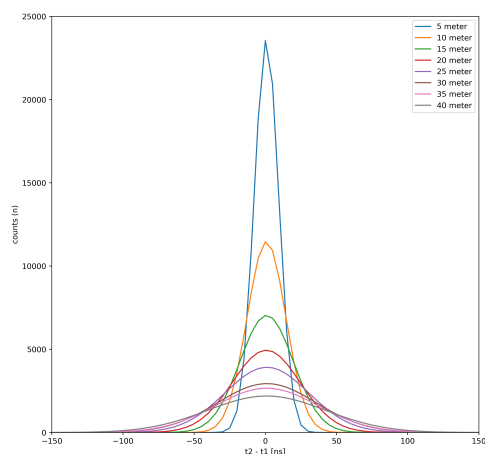
4.4.1 Invloed detectorafstand op tijdverschillen bij coïncidenties

Wanneer een shower recht boven een station is ontstaan en zich met de lichtsnelheid recht naar beneden voortbeweegt, dan zal het showerfront beide platen nagenoeg tegelijk bereiken. Beide detectoren zullen hierdoor exact gelijk een signaal afgeven. Wanneer de shower niet recht boven het station is ontstaan, maar toch het station bereikt, zal deze onder een bepaalde zenithhoek het station bereiken. In dit laatste geval zullen beide detectoren niet tegelijk kosmische straling detecteren. Er zal een verschil tussen de aankomsttijden moeten zijn (zie figuur 4.20).



Figuur 4.20: Wanneer een shower onder een bepaalde zenithhoek invalt (b) zal de shower één detector als eerste bereiken. Bron: Dova, M.T. et al. (2009). Let op: de hoek tussen de uiterste grenzen van de shower zijn te groot getekend.

In tabel 4.1 is te zien dat in de RootGroup de aankomsttijden per detector worden opgeslagen. Door de aankomsttijden van detector 1 en detector 2 van elkaar af te trekken is het tijdverschil bij een event te berekenen. Per detectorafstand zijn de tijdverschillen bij coïncidenties vergeleken door het gemiddelde tijdverschil en de spreiding te bepalen met behulp van een histogram met gaussfit (zie figuur 4.21). Om de resultaten te verifiëren is een theoretisch maxi-



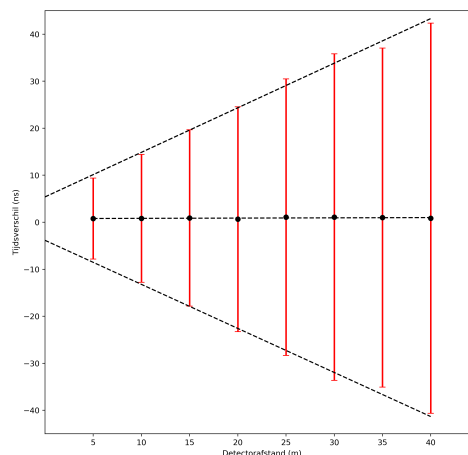
Figuur 4.21: Tijdverschillen bij verschillende detectorafstanden.

d m	$\langle dt \rangle$ ns	σ ns	3σ ns	dt_{\max} ns
5	0,78	8,61	25,83	16,67
10	0,81	13,60	40,81	33,33
15	0,90	18,76	56,29	50,00
20	0,64	23,91	71,73	66,67
25	1,07	29,42	88,25	83,33
30	1,08	34,75	104,25	100,00

Tabel 4.3: Meetresultaten tijdverschillen bij verschillende detectorafstanden.

maal tijdverschil berekend met de aanname dat het maximale tijdverschil ontstaat bij een theoretische maximale zenithhoek van 90° , waarbij het front van de shower zich met de lichtsnelheid voortplant. De maximale tijdverschillen hebben dezelfde orde van grootte als drie maal de standaarddeviatie (99,73% van de normaalverdeling). De resultaten zijn in tabel 4.3 gegeven. Figuur 4.21 geeft de gaussfits van de histogrammen weer. Het gemiddelde tijdverschil is nagenoeg nul en de spreiding neemt toe bij een grotere detectorafstand.

In figuur 4.22 is de toename van de spreiding grafisch weergegeven met een trendlijn langs de spreidingsbal-



Figuur 4.22: Tijdverschillen bij verschillende detectorafstanden.

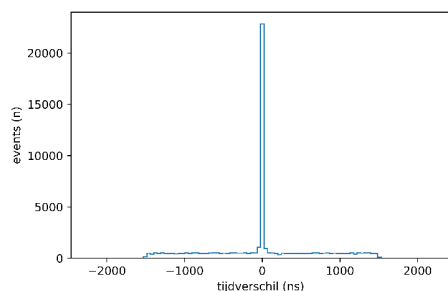
ken. In dit diagram valt op dat de standaarddeviatie lineair lijkt toe te nemen bij een grotere detectorafstand. Het valt op dat de spreiding toeneemt en dat de spreiding van de tijdverschillen bij grotere detectorafstanden beter benaderen dan de spreiding van de tijdverschillen bij kleinere detectorafstanden. Dit is te verklaren met de energie van de showers. Het aardoppervlak wordt continu geraakt door showers van verschillende energieën. Hoog energetische showers bereiken het aardoppervlak bij kleine én grotere zenithhoeken. Laag energetische showers bereiken het aardoppervlak alleen bij kleine zenithhoeken. Bij grotere zenithhoeken worden deze showers al voor het bereiken van het aardoppervlak geabsorbeerd door de grotere atmosferische diepte. Laag energetische showers, met energieën van minder dan 10^{14} eV hebben een lagere dichtheid elektronen per vierkante meter op het aardoppervlak. De dichtheid neemt af bij een grotere afstand van de kern van de shower. Voor detectie is bij beide platen een dichtheid van enkele elektronen per vierkante meter nodig. Hierdoor neemt de kans op detectie van laag energetische showers af bij een grotere detectorafstand (wordt in het volgende onderdeel verder toegelicht).

Hierdoor worden bij kleine detectorafstanden relatief meer showers gemeten met een kleine zenithhoek en dus kleinere tijdverschillen. Bij grotere detectoraf-

standen worden relatief minder showers gemeten met een grotere zenithhoek en dus grotere tijdsverschillen. Bij grotere detectorafstanden zal de spreiding van de zenithhoek en dus de spreiding van de tijdsverschillen toenemen.

4.5 Toevallige coïncidenties

In figuur 4.23 is te zien dat er coïncidenties zijn met tijdsverschillen die groter zijn dan 100 ns. Er worden



Figuur 4.23: Events met tijdsverschillen tussen 0 en 2000 ns bij station 2010.

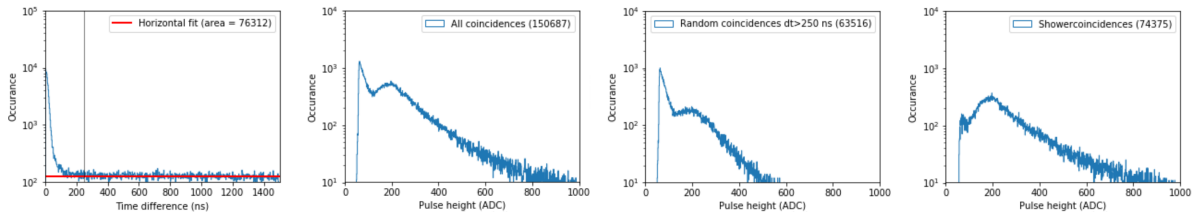
dus coïncidenties opgeslagen met tijdsverschillen, die fysisch gezien niet aannemelijk zijn. Het showerfront plant zich voort met de lichtsnelheid waardoor een tijdsverschil van 100 ns onmogelijk is bij een detectorafstand van 5 à 10 meter. In figuur 4.23 is een histogram van de tijdsverschillen gemaakt met data van station 2010 gedurende één week. De detectorafstand van station 2010 was hier 10 meter. In figuur 4.23 is te zien dat er coïncidenties worden gedetecteerd tot een maximaal tijdsverschil van 1500 ns. Deze grens ontstaat door de HiSPARC-elektronica, die een coincidence window van $1,5 \mu\text{s}$ hanteert. Er kan worden aangenomen dat alle coïncidenties met een tijdsverschil groter dan 250 ns niet zijn ontstaan door één enkele shower. Vanuit deze aanname worden deze coïncidenties in het vervolg van dit onderzoek uitgesloten en betiteld met de naam *toevallige coïncidenties*. Kasper van Dam [25] heeft in een pythonnotebook een filter ontwikkeld, waarmee deze toevallige coïncidenties uit de data worden gefilterd. In figuur 4.23a zijn de tijdsverschillen bij coïncidenties

van station 104 tussen 23-10-2017 en 30-10-2017 tussen de 0 en 1500 ns geplot. Uit de fit aan de constante in figuur 4.24a blijkt dat ongeveer 76312 coïncidenties fysisch onmogelijk kunnen zijn ontstaan door een enkele shower.

Deze fit werd gemaakt door het aantal coïncidenties per eenheid tijdsverschil, dat na 250 ns constant lijkt, door te trekken. Hierbij wordt de aanname gedaan dat er in figuur 4.24a per bin een constante hoeveelheid toevallige coïncidenties zijn waargenomen. Deze aanname is gebaseerd op de continue hoeveelheid toevallige coïncidenties in figuur 4.24a tussen 250 en 1500 ns. In figuur 4.24b is een pulshoogtehistogram gemaakt van alle coïncidenties. In figuur 4.24c is dit gedaan voor de toevallige coïncidenties. Uiteindelijk haalt het filter het aantal toevallige coïncidenties met het bijbehorende pulshoogte spectrum, uit de data. Wat over is gebleven, wordt in dit onderzoek betiteld met de term *showercoïncidenties*. Hierbij wordt de aanname gedaan dat dit coïncidenties zijn, die uitsluitend worden veroorzaakt door één enkele shower. Figuur 4.24d is een pulshoogtehistogram van deze showercoïncidenties.

Uit de vergelijking van figuur 4.24b en 4.24c kan worden geconcludeerd dat toevallige coïncidenties relatief lage pulshoogtes hebben. Uit de vergelijking van 4.24c en 4.24d kan geconcludeerd worden dat de hoogste waarden tussen de 0 ADC en de MIP-piek (oplopende deel na 0) niet worden veroorzaakt door showercoïncidenties.

Uit het voorbeeld van figuur 4.24 blijkt dat 42,2% van de coïncidenties een toevallige coïncidentie blijkt te zijn. In tabel 4.4 zijn de resultaten van verschillende datareeksen bij het tweeplatenstation weergegeven. Er kan worden geconcludeerd dat ongeveer 34-62% van de coïncidenties, die worden geregistreerd door tweeplatenstations, toevallige coïncidenties zijn. Bij een grotere detectorafstand is de kans op showercoïncidenties kleiner. Als het aantal toevallige coïncidenties constant blijft, zal het aantal toevallige coïncidenties relatief lager zijn bij een grotere detectorafstand. Dit blijkt uit de resultaten van station 2010. In tabel 4.5 zijn de hoeveelheden toevallige en showercoïncidenties bij verschillende detectorafstanden gegeven. Bij een grotere detectorafstand is het aantal toevallige coïncidenties lager. In dit onder-



Figuur 4.24: Toevallige en showercoïncidenties, station 104, (23-10-2017 tot 30-10-2017). a) tijdspectrum alle data, b) pulshoogtes alle data, c) pulshoogtes toevallige, d) pulshoogtes showerevents.

Station	Start dd-mm-yy	Eind dd-mm-yy	Coïncidenties	Toevallige Coïncidenties	%	Shower Coïncidenties	%
105	1-2-2018	1-5-2018	2656787	1267568	47,7	1013717	38,2
104	1-2-2018	1-5-2018	2449384	949303	38,8	1308820	53,4
8009	1-2-2018	1-5-2018	1770839	512338	28,9	1155256	65,2
4	1-2-2018	1-5-2018	2560969	1114191	43,5	1222261	47,7
15	1-2-2018	1-5-2018	2288940	866335	37,8	1274194	55,7
8008	1-2-2018	1-5-2018	2461929	922776	37,5	1353291	55,0
3302	1-2-2018	1-5-2018	2468812	896312	36,3	1391945	56,4
301	1-2-2018	1-5-2018	2384055	805339	33,8	1416463	59,4

Tabel 4.4: Aantal toevallige en showercoïncidenties bij tweeplatenstations.

zoek wordt het filter gebruikt om uitsluitend showercoïncidenties te bestuderen. Vervolgonderzoek naar de aard van de toevallige coïncidenties is aangeraden. Uit de resultaten in tabel 4.4 blijkt dat de verhouding toevallige en showercoïncidenties stationafhankelijk is.

4.5.1 Invloed detectorafstand op coïncidentiefrequenties

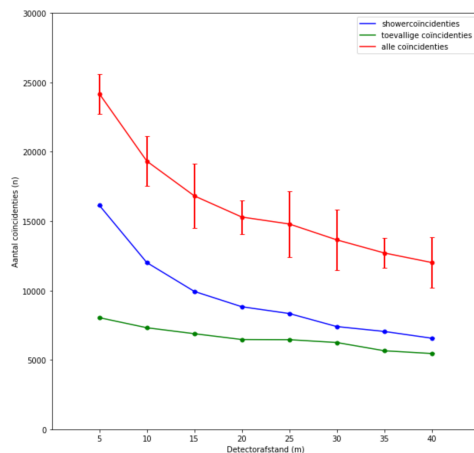
Om de invloed van de detectorafstand op de coïncidentiefrequentie te onderzoeken is een python-notebook ontwikkeld waarmee elke dag het aantal coïncidenties, toevallige coïncidenties en showercoïncidenties zijn berekend. Per detectorafstand zijn vervolgens de gemiddelden van deze soorten coïncidenties en de statistische fouten berekend. Met kennis uit paragraaf 4.5.2 (zie verder op in dit verslag) is de systematische meetfout door de invloed van de buitenluchtdruk berekend per meetpunt. Hiervoor is gebruik gemaakt van onvolledige weerdata van sta-

tion 501. De onvolledige weerdata is aangevuld met weerdata van het KNMI. Door te rekenen met een normalisatiefactor van -6 coïncidenties/h-hPa is per meetpunt een systematische meetfout door de spreiding van de luchtdruk berekend. De statistische meetfout bleek te verwaarlozen in vergelijking tot de systematische meetfout. In figuur 4.25 is de data geploot. De zichtbare foutbalken staan voor de systematische meetfout, de foutbalken van de statistische meetfout zijn kleiner dan de individuele punten en daardoor niet zichtbaar. Er is geen kennis over de systematische meetfout van de toevallige- en showercoïncidenties. De invloed van de luchtdruk op deze coïncidenties is onbekend. Vervolgonderzoek naar de invloed van de buitenluchtdruk op deze coïncidenties wordt aangeraden. Hierbij kan worden verwacht dat deze invloed anders zal zijn voor toevallige en showercoïncidenties. De showercoïncidenties worden voornamelijk door de elektromagnetische component van showers (gammafotonen en elektronen) veroorzaakt.

d (m)	Start dd-mm-yy	Eind dd-mm-yy	Coincs	σ	Toevallige Coincs	σ	Shower Coincs	σ
5	27-03-2018	03-04-2018	24177,6	632,8	6694,9	291,1	16136,4	479,8
10	04-04-2018	11-04-2018	19324,0	600,2	6090,0	212,2	12009,3	422,6
15	12-04-2018	19-04-2018	16817,7	1275,5	5732,4	463,4	9932,4	725,2
20	20-04-2018	27-04-2018	15283,4	433,4	5382,6	156,5	8828,0	320,7
25	28-04-2018	05-05-2018	14792,6	1245,7	5373,1	614,5	8338,7	558,9
30	06-05-2018	13-05-2018	13648,7	633,4	5203,1	285,3	7388,1	325,6
35	25-05-2018	01-06-2018	12704,3	390,3	4709,1	284,4	7047,7	155,9

Tabel 4.5: Aantal toevallige en showercoïncidenties bij de verschillende detectorafstanden per dag, station 2010.

De toevallige coïncidenties worden door toevallige detectie van singles binnen de tijdwindow veroorzaakt. Uit het onderzoek van Stobbelaar [26] bleek dat er geen correlatie is gevonden tussen de singlerates en de buitenluchtdruk. Dit is te verklaren doordat deze singles bestaan voornamelijk uit muonen die een grotere atmosferische diepte kunnen doorlopen zonder te worden geabsorbeerd. De data uit figuur 4.25 is in tabel 4.5 weergegeven. Hierin zijn de waarden van de statistische fouten gegeven.



Figuur 4.25: Alle, toevallige- en shower-, coïncidenties per dag bij verschillende detectorafstanden. Station 2010 (27-03-2018/28-05-2018).

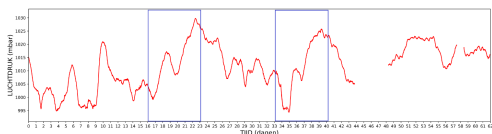
Uit figuur 4.25 blijkt dat bij grotere detectoraf-

standen de frequenties van de totale, toevallige en showercoïncidenties lager zijn dan bij kleine detectorafstanden. De toevallige coïncidentiefrequentie is praktisch onafhankelijk van de detectorafstand. Bij een detectorafstand van 40 meter is de toevallige coïncidentiefrequentie 32,1% lager dan bij een detectorafstand van 5 meter. Deze minimale afname is te verklaren door de afname van de telsnelheid door toename van de temperatuur gedurende de meetperiode. Bij de totale coïncidentiefrequentie is dit 50,3% en bij de showercoïncidenties 59,4%. Deze afname is te verklaren met de kans op coïncidentie bij een bepaalde detectorafstand. Station 2010 wordt continu geraakt door showerfronten. Hoe kleiner de detectorafstand hoe groter de kans dat beide detectoren worden geraakt door één enkel showerfront. Bij grotere detectorafstanden is de kans kleiner dat laag energetische showerfronten door beide detectoren worden gedetecteerd. Hans Montanus [27] beschrijft in zijn proefschrift de *lateral density function*. Met deze functie berekent hij onder andere de dichtheid van elektronen per oppervlakte-eenheid op een bepaalde afstand van de showercore. Bij showers van 10^{15} eV met een zenithoek van 15° is op een afstand van 30 meter van de showercore de dichtheid 10 elektronen per vierkante meter. Voor detectie is bij beide platen een dichtheid van enkele elektronen per vierkante meter nodig. Bij lagere energieën van bijvoorbeeld 10^{14} eV bevindt deze grens zich rond de 10 meter van de showercore. Hiermee kan worden aangenomen dat de kans op detectie van laag energetische showers bij detector-

afstanden in de orde van grootte van dit experiment afneemt.

Een andere mogelijkheid is dat de showers onder een grotere zenithhoek invallen. Op deze manier zou het showerfront relatief klein kunnen zijn en toch beide detectoren kunnen bereiken. Dergelijke laag energetische showers zullen echter ook niet tot coïncidenties leiden omdat de atmosferische diepte bij inval met een grote zenithhoek groter is. Hierdoor zullen laag energetische showers überhaupt niet het aardoppervlak bereiken. Wanneer de detectorafstand wordt vergroot, worden alleen hoger energetische showers gemeten en daarom minder vaak coïncidenties gemeten (zie figuur 4.1).

Het valt op dat de systematische meetfout van de totale coïncidentiefrequentie in figuur 4.25 bij de detectorafstanden van 15, 25 en 30 meter groter zijn dan bij de andere detectorafstanden. Dit wordt veroorzaakt door de spreiding van de luchtdruk gedurende deze meetperiode. In figuur 4.26 gemaakt door Martijn Stobbelaar is het verloop van de buitenluchtdruk

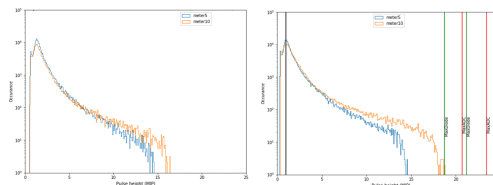


Figuur 4.26: Verloop buitenluchtdruk volgens weerstation 501 (27-03-2018 tot 28-05-2018) voor verschillende detectorafstanden.

van weerstation 501 weergegeven. Uit deze grafiek blijkt dat de spreiding van de buitenluchtdruk half en eind april 2018 het hoogst was. De periodes waarin de detector op 15 (12-04/18-04) en 25 meter (28-04/04-05) lagen zijn in figuur 4.26 met blauwe kaders aangegeven. Door deze grote fluctuaties in de buitenluchtdruk verschillen de coïncidentiefrequenties elke dag. In dit onderzoek is de invloed van de luchtdruk op de coïncidentiefrequenties niet verder onderzocht. Hierbij wordt aangeraden om de invloed van de luchtdruk op alle toevallige én showercoïncidenties apart van elkaar te onderzoeken. Met deze kennis kan figuur 4.25 worden gecorrigeerd met de juiste normalisatiefactor per coïncidentiesoort.

4.5.2 Invloed detectorafstand op pulshoogte-histogram

Met de kennis van de detectorafstand van station 8201 (± 5 meter) en station 105 (± 10 meter) is een verkennende vergelijking gemaakt. In figuur 4.27 zijn de pulshoogtehistogrammen van station 8201 en 105



Figuur 4.27: Pulshoogtehistogram showercoïncidenties station 8201 (± 5 meter) en station 105 (± 10 meter), (01-12-2017 tot 08-12-2017). De 1 MIP pieken voor de beide stations op elkaar geschaald. a) zonder correcties voor temperatuur en druk en b) deze correcties zijn wel toegepast.

geplot voor showercoïncidenties². Op de horizontale as zijn de pulshoogtes niet in milivolt of ADC maar in aantal MIPs als eenheid gegeven. Dit is gedaan door de pulshoogtes in milivolt te delen door de MIP-waarde in milivolt. De MIP-waarde is de pulshoogte waarde van de MIP-piek. Deze MIP-waarde wordt bepaald met een gaussfit.

De vergelijking van de histogrammen in figuur 4.27a is slechts een indicatie; uit de theoretische verkenning bleek dat de temperatuur van de PMT, de spanning over de PMT, de montage en de leeftijd van de detector invloed hebben op de positie van de MIP-piek. Deze eigenschappen zullen bij station 8201 en 105 verschillen. Om deze reden is de verhouding tussen deze MIP-waarden bepaald met een gaussfit en zijn alle pulshoogtes van het tweede histogram van station 8201 vermenigvuldigd met deze verhouding. Op deze manier zijn de posities van de MIP-piek gelijk (zwarte verticale lijn) en zijn de histogrammen te vergelijken. In figuur 4.27b zijn deze pulshoogtehistogrammen geplot. In deze figuur zijn twee maximale pulshoogtes,

²Let op: in hoofdstuk vier van dit verslag zijn alleen de pulshoogtehistogrammen van de showercoïncidenties weergegeven. Het filter uit hoofdstuk twee is in alle pythonscripts toegepast.

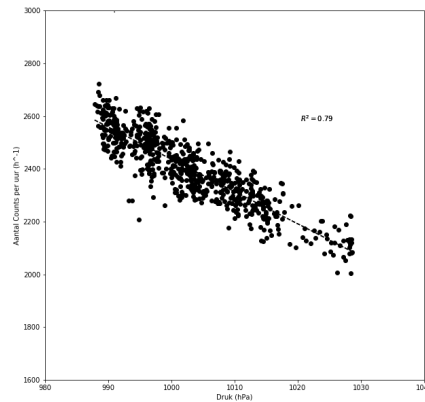
één van de ADC en één van de begrenziings diode, zichtbaar gemaakt. Door de vermenigvuldiging met deze verhouding zijn pulshoogtes boven deze maxima mogelijk. Uit figuur 4.27b blijkt echter dat dit niet het geval is.

In figuur 4.27b is zichtbaar dat bij een kleinere detectorafstand relatief meer laag energetische showers worden gemeten en bij een grotere detectorafstand worden relatief meer hoog energetische showers gemeten. Dit is theoretisch te verklaren; bij een grotere detectorafstand worden er relatief minder laag energetische showers gemeten omdat deze showers een kleiner showerfront hebben. Op deze manier is de kans kleiner dat een kleine shower beide detectoren kan raken. In deze vergelijking is echter de eventuele invloed van de luchtdruk en de temperatuur niet meegenomen. In dit onderzoek zijn de invloeden van deze atmosferische grootheden eerst onderzocht.

Invloed van de luchtdruk op het pulshoogte-histogram

De luchtdruk heeft invloed op de coïncidentiefrequentie. Bij een hogere druk bevinden zich meer moleculen in hetzelfde volume lucht. De hoeveelheid materie, waardoor een shower zich heeft verplaatst, is daardoor hoger bij een hogere luchtdruk (atmosferische diepte). Bij een hogere druk zal de coïncidentiefrequentie dus lager zijn omdat meer showers het aardoppervlak niet zullen bereiken. Om te onderzoeken of de luchtdruk een bepaalde invloed heeft op de vorm van het pulshoogtehistogram is eerst gekeken naar de invloed van de luchtdruk op de coïncidentiefrequentie in het algemeen. Omdat bijna geen enkel tweeplatenstation over een weerstation beschikt, zijn de weerdata van station 501 gebruikt. Uit de vergelijking van van de Ven [28] bleek dat de temperatuur en de luchtdruk bij de weerstations in Leeuwarden, Maastricht en Schiphol op een bepaald moment maximaal 0,6 Door deze kleine foutmarge wordt aangenomen dat weerdata van station 501 gebruikt mogen worden voor andere stations in Nederland. Om de invloed van de luchtdruk te onderzoeken werd per uur het aantal coïncidenties (flux) en de gemiddelde luchtdruk bepaald. De helling van de lineaire fit door deze data geeft de normalisatiefac-

tor in coïncidenties $\text{h}^{-1}\text{hPa}^{-1}$. In tabel 4.6 zijn de resultaten weergegeven. Station 501, 510 en 511 zijn vierplatenstations en station 8009, 104 en 4 zijn tweeplatenstations. Er is gebruik gemaakt van data gedurende de maand maart 2018. In alle gevallen is een negatieve lineaire regressie gevonden. De normalisatiefactor ligt tussen de -5 à -7 coïncidenties/h-hPa. De hogere normalisatiefactoren bij vierplatenstations zijn te verklaren doordat vierplatenstations altijd hogere coïncidentiefrequenties hebben. In figuur 4.28 en 4.29 zijn drie verschillende datareeksen met de lineaire fit weergegeven.

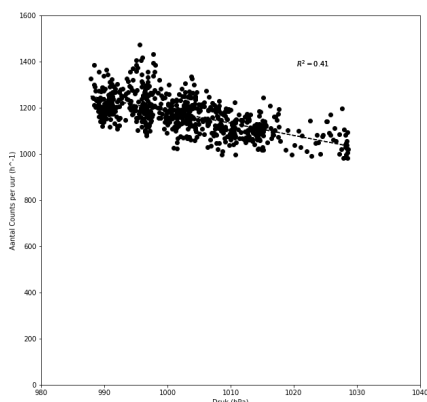


Figuur 4.28: Correlatie luchtdruk en coïncidentiefrequenties spreidingsdiagram. Station 501 (01-03-2018 tot 30-03-2018).

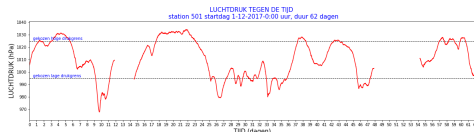
Oorspronkelijk werd gepoogd de normalisatiefactor per pulshoogtebereik te bepalen en hierdoor het pulshoogtehistogram voor de invloed van de luchtdruk per bereik te corrigeren. Doordat de totale normalisatiefactor (tabel 4.6) laag was in vergelijking met het aantal coïncidenties per uur (± 1250) werd de eventuele invloed van de luchtdruk op het pulshoogtehistogram in twijfel getrokken. Om deze reden werd met behulp van het pythonscript van Stobelaar [27] figuur 4.30 met weerdata van station 501 gemaakt. In deze figuur zijn de luchtdruk gedurende twee maanden en twee zelf gekozen luchtdrukgren-

Station (#)	Detectoren (#)	Start dd-mm-yy	Eind dd-mm-yy	R	R ²	nfactor h ⁻¹ hPa ⁻¹
501	4	01-03-2018	30-03-2018	-0,886	0,78	-12,24
510	4	01-03-2018	30-03-2018	-0,796	0,63	-14,12
511	4	01-03-2018	30-03-2018	-0,869	0,76	-15,85
8009	2	01-03-2018	30-03-2018	-0,637	0,41	-5,29
104	2	01-03-2018	30-03-2018	-0,588	0,35	-6,72
4	2	01-03-2018	30-03-2018	-0,537	0,29	-7,13

Tabel 4.6: Correlatie luchtdruk en coïncidentiefrequenties.



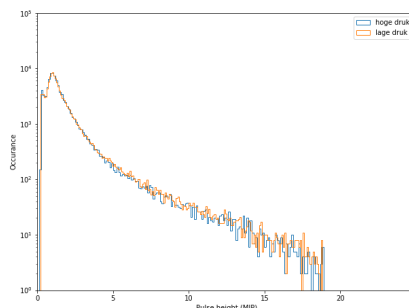
Figuur 4.29: Correlatie luchtdruk en coïncidentiefrequenties spreidingsdiagram. Station 8009 (01-03-2018 tot 30-03-2018).



Figuur 4.30: Luchtdruk station 501 gedurende 62 dagen vanaf 01-12-2017 (min druk = 995 hPa, max druk = 1025 hPa).

zen geplote. Alle data boven de hoge luchtdruksgrens (1025 hPa) en onder de lage luchtdruksgrens (995 hPa)

zijn vervolgens apart van elkaar gesorteerd en per datareeks is vervolgens een pulshoogtehistogram gemaakt. Uit figuur 4.31 blijkt dat er geen verschil



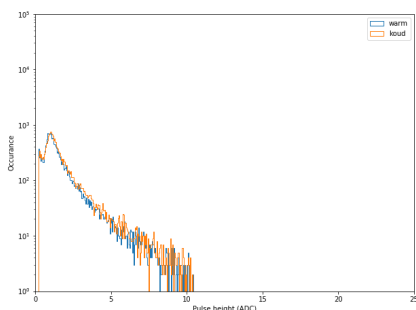
Figuur 4.31: Twee pulshoogtehistogrammen van station 501 (01-12-2017 tot 01-02-2018). Eén histogram van showercoïncidenties onder 995 hPa (lage druk) en één van showercoïncidenties boven 1025 hPa (hoge druk).

zichtbaar is tussen het pulshoogtehistogram met data boven 1025 hPa en het pulshoogtehistogram met data onder de 995 hPa. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de luchtdruk geen zichtbare invloed heeft op het pulshoogtehistogram van een detector. Verder onderzoek is nodig om te kunnen concluderen of de normalisatiefactor wel of niet afhangt van de energie van de showers. Verder vervolgonderzoek naar de invloed van de luchtdruk op de toevallige en showercoïncidenties wordt eveneens aangeraden. Omdat de invloed niet zichtbaar is er geen vervolgonderzoek ge-

daan naar de invloed van de druk.

Invloed van de temperatuur op het pulshoogtehistogram

Uit voorafgaand onderzoek [29, 30] bleek dat de temperatuur invloed heeft op het pulshoogtehistogram. Een hogere temperatuur zorgt voor een lagere MIP-waarde. Om te controleren of deze invloed ook meetbaar is bij station 2010, is de data van 26-01-2018 tot 01-02-2018 opgesplitst in data tussen 11:00 en 23:00 uur (warm) en tussen 23:00 en 11:00 uur (koud). In figuur 4.32 is te zien dat overdag de MIP-waarde la-

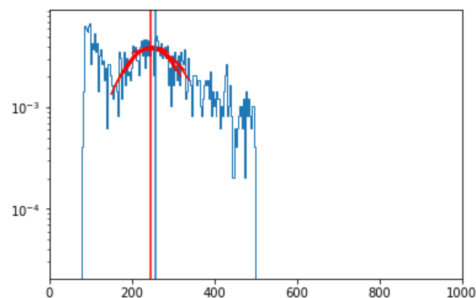


Figuur 4.32: Twee pulshoogtehistogrammen van station 2010 (26-01-2018 tot 01-02-2018). Eén histogram van showercoïncidenties 's nachts (koud) en één van showercoïncidenties overdag (warm).

ger is dan de MIP-waarde 's nachts. In figuur 4.32 zijn alleen de pulshoogtes van showercoïncidenties gebruikt. De MIP-waarde voor overdag is 255,9 ADC en de MIP-waarde voor 's nachts is 286,0 ADC.

De invloed van de temperatuur op de MIP-waarde is alleen te verklaren met de temperatuurcoëfficiënt van de PMT en is dus elektronica-afhankelijk. Er zijn drie verschillende temperatuurcoëfficiënten, die een rol spelen [31]. Op de eerste plaats de coëfficiënt voor de cathodegevoeligheid, op de tweede plaats de coëfficiënt voor de versterking (gain) op derde plaats de elektronica zelf. Samen zorgen deze coëfficiënten voor een variabele pulshoogte bij dezelfde detectie. Als vergelijking kan hiervoor de MIP-waarde worden gebruikt. Bij een andere temperatuur zal 1 MIP

een andere pulshoogte hebben. De MIP-piek in een pulshoogtehistogram is daarmee een normaalverdeling van verschillende pulshoogtes, waarbij de waarde van 1 MIP gedurende de meetperiode heeft behoord. Om te kunnen corrigeren voor dit effect is eerst gekeken naar de invloed van de temperatuur op de positie van de MIP-piek en dus de MIP-waarde. Met behulp van een pythonscript van Kasper van Dam [32] is een programma ontwikkeld dat per bepaalde tijdseenheid de positie van de MIP-piek en daarmee de MIP-waarde bepaalt van alle coïncidenties (dus ook toevallige). De gebruiker stelt van tevoren de grenswaarden in waartussen de MIP-waarde moet liggen. De gebruiker kan deze grenswaarden achterhalen door één keer een test te draaien. Vervolgens worden verschillende gaussfits, die mogelijk zijn tussen deze grenswaarden, genomen. Zie figuur 4.33 voor een



Figuur 4.33: Pulshoogtehistogram station 501, met drie uur aan data.

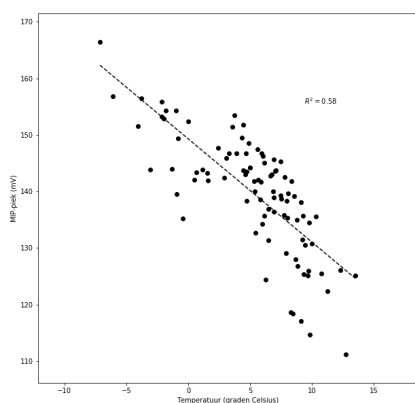
voorbeeld van zo'n fit bij drie uur aan data van station 501.

De MIP-waarde van de beste gaussfit wordt uiteindelijk opgeslagen per tijdseenheid. Per tijdseenheid wordt ook de gemiddelde temperatuur berekend met de weerdata van station 501 (buitentemperatuur). Uiteindelijk wordt er een spreidingsdiagram gemaakt van de gemiddelde temperatuur per tijdseenheid en de MIP-waarde in milivolt.

Door de gekozen tijdseenheid zo klein mogelijk te maken wordt de verandering van de temperatuur gedurende deze tijd tot het minimum beperkt. Voor de vierplatenstations is de minimumtijdseenheid drie uur en voor een tweeplatenstation vier uur. Wanneer

een kleinere tijdseenheid wordt gebruikt, zijn er te weinig coincidenties, waardoor de vorm van de MIP-piek niet goed zichtbaar is. Hierdoor kan de MIP-waarde niet met behulp van de gaussfit worden bepaald.

De resultaten van deze analyse zijn in tabel 4.7 en figuur 4.34 en 4.35 weergegeven. In alle gevallen is er sprake van een negatieve lineaire regressie. Met

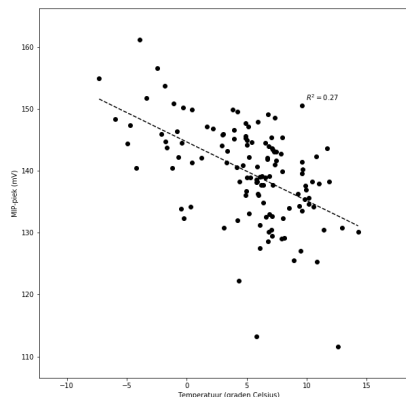


Figuur 4.34: Spreidingsdiagram MIP-waarde station 102 (01-03-2018 tot 01-04-2018) en buitentemperatuur station 501.

behulp van de helling is een normalisatiefactor bepaald. Zowel de correlatiecoëfficiënt als de normalisatiefactor verschillen per datareeks. In de derde kolom is zichtbaar dat de stations verschillende PMT's gebruiken. De buitentemperatuur correleert matig met de MIP-waarden. Zowel de correlatiecoëfficiënten als de normalisatiefactoren verschillen per detector. Het valt op dat de normalisatiefactor van station 102 drie keer groter is dan de normalisatiefactor van de andere detectoren.

Temperatuur in de skibox

Buisman [29] concludeerde dat de buitentemperatuur niet overeenkwam met de temperatuur van de PMT. In de afgesloten skibox kan de temperatuur hoger worden dan buiten de skibox. Om dit te onderzoeken



Figuur 4.35: Spreidingsdiagram MIP-waarde station 104 (01-03-2018 tot 01-04-2018) en buitentemperatuur station 501.

plaatste hij in skibox 1 van station 502 twee verschillende dataloggers met temperatuursensoren. Eén logger met een interne temperatuursensor op de bodem van de skibox en één logger met een externe thermokoppel tegen de buitenkant van de PMT. De loggers hadden een maximaal bemonsteringsinterval van 10 seconden maar werden ingesteld op een bemonsteringsinterval van 5 minuten. Op deze manier konden de loggers ongeveer 50 dagen aaneengesloten meten. Uit de meetresultaten bleek dat de hoogst gemeten temperatuur in de box ongeveer 10 graden Celsius hoger was dan de maximale temperatuur gemeten door het KNMI in De Bilt.

De methode van Buisman is herhaald tijdens dit onderzoek met station 2010. Voor informatie over de software en de analysemethoden wordt hierbij verwezen naar het verslag van Buisman [29]. Tussen 26-03-2018 en 18-05-2018 is de logger met externe temperatuursensor³

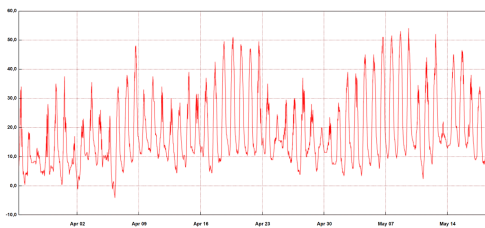
3 in skibox van station 2010 geplaatst. Het thermokoppel is met tape bevestigd aan de behuizing van de PMT. De andere logger is achterwege gelaten omdat

³Lascar dataloggers (Vego): EL-USB-TC-LCD, bereik: 0 tot 400±1°C, stapgrootte: 0,5°C.

Stat. #	Det. #	PMT	Start dd-mm-yy	Eind dd-mm-yy	R	R ²	nfactor mV·K ⁻¹
21	2	253 ADC 323 ADC	01-03-2018	01-04-2018	-0,240	0,058	-0,495
104	2	253 ADC 323 ADC	01-03-2018	01-04-2018	-0,523	0,273	-0,948
4	2	81 ADC 150 ADC	01-03-2018	01-04-2018	-0,176	0,031	-0,255
102	2	253 ADC 323 ADC	01-03-2018	01-04-2018	-0,764	0,583	-1,827
102	2	253 ADC 323 ADC	10-03-2018	22-04-2018	-0,818	0,667	-1,810
13	2	253 ADC 323 ADC	10-03-2018	22-04-2018	-0,199	0,040	-0,415
501	4	81 ADC 150 ADC	10-03-2018	22-04-2018	-0,369	0,136	-0,472

Tabel 4.7: Resultaten invloed buitentemperatuur op pulshoogtehistogram.

de temperatuur van de PMT alleen benodigd was. Nadat de logger uit de skibox was gehaald, is de data opgehaald met de bijgeleverde software. De resultaten van de temperatuurmeting zijn in figuur 4.36 weergegeven. De maximale temperatuur van de PMT (54 °C) is 25 graden Celsius hoger dan de maxima-



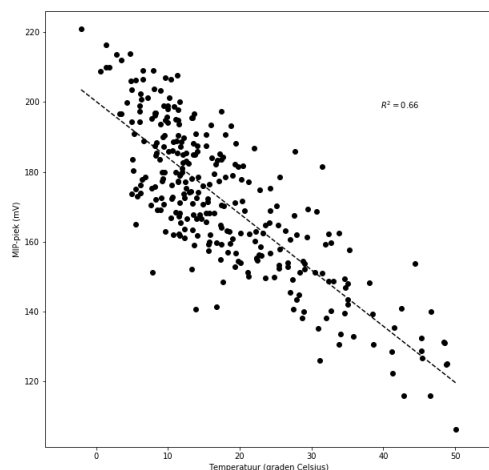
Figuur 4.36: Temperatuur van PMT-station 2010, detector 1, (26-03-2018 tot 18-05-2018)

le temperatuur gemeten door station 501 (29 °C). De minimale temperatuur gemeten door station 501 (-2 °C) is 2°Celsius hoger dan de minimale temperatuur van de PMT (-4°C).

Door de UTC-timestamps is de data te gebruiken met de eventdata van station 2010. Met de verkregen temperatuurdata van de PMT is de methode bij tabel

4.7 herhaald; per vier uur is de gemiddelde temperatuur van de PMT en de MIP-waarde van detector 1 bepaald. De helling van de lineaire fit door deze data geeft de normalisatiefactor in mV·K⁻¹. Er bleek sprake te zijn van een sterke negatieve lineaire regressie met een correlatiecoëfficiënt van -0,81 en een normalisatiefactor van 1,6 mV·K⁻¹. Zie figuur 4.37 voor de grafische weergave. Dit resultaat heeft dezelfde orde van grootte als de resultaten in tabel 4.7. Omdat Buisman geen kwantitatieve bepaling heeft gedaan, is deze waarde niet te vergelijken met zijn resultaten. Deze analyse is vervolgens herhaald met detector 2. Hierbij wordt aangenomen dat de temperatuur van detector 1 overeenkomt met de temperatuur van detector 2. Bij deze analyse bleek er sprake te zijn van een sterke negatieve lineaire regressie met een correlatiecoëfficiënt van -0,61 en een normalisatiefactor van 1,2 mV·K⁻¹.

Vervolgonderzoek naar de kwantitatieve invloed van de temperatuur van de PMT op de meetresultaten is aangeraden. Het is onbekend of deze normalisatiefactor bij andere detectoren hetzelfde zou zijn. Dit wordt wel verwacht omdat die negatieve temperatuurcoëfficiënt wordt veroorzaakt door het materiaal van de PMT en de resultaten bij detector 1 en 2 on-



Figuur 4.37: Spreidingsdiagram MIP-waarde en temperatuur PMT detector 1 station 2010 (26-03-2018 tot 18-05-2018).

geveer overeenkomen.

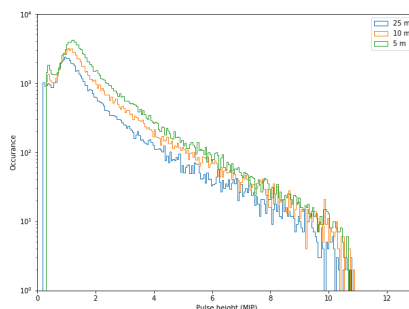
Invloed pulshoogtehistogram

Door deze resultaten kan worden geconcludeerd dat de temperatuur invloed heeft op het pulshoogtehistogram. Bij een lagere temperatuur krijgen dezelfde detecties grotere pulshoogtes. Hierdoor kan worden geconcludeerd dat het meetbereik van de HiSPARC-opstelling temperatuurafhankelijk is en dus continu verandert. Bij het vergelijken van pulshoogtehistogrammen moet worden meegenomen dat het meetbereik van de PMT, ondanks correctie, is beïnvloed. Vervolgonderzoek naar de beste manier om dit te corrigeren of te verwerken is aan te raden.

Met behulp van dit pythonscript kunnen data per tijdseenheid worden gecorrigeerd op de verschuiving van de MIP-piek. Met een gaussfit kan per vier uur data worden gecorrigeerd. Kennis over de temperatuur in de skibox is hiervoor niet benodigd. Hierdoor kan de invloed van de temperatuur tot een minimum worden beperkt bij de vergelijking van de pulshoogtehistogrammen.

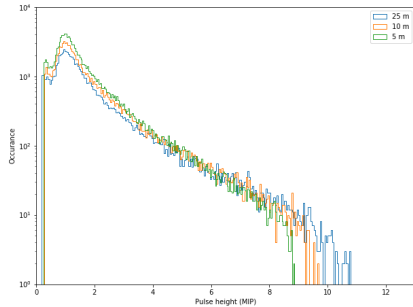
Invloed detectorafstand op het pulshoogtehistogram

Om de invloed van de detectorafstand op het pulshoogtehistogram te onderzoeken is een pythonscript geschreven, waarin verschillende datareeksen van een week van één station konden worden ingevoerd. Per week werd van de showercoïncidenties een pulshoogtehistogram geplott. Na het verzamelen van drie meetpunten (5, 10 en 25 m) bij station 2010 werd hiermee figuur 4.38 geplott. Uit de data van station



Figuur 4.38: Pulshoogtehistogram showercoïncidenties bij verschillende detectorafstanden. Station 2010.

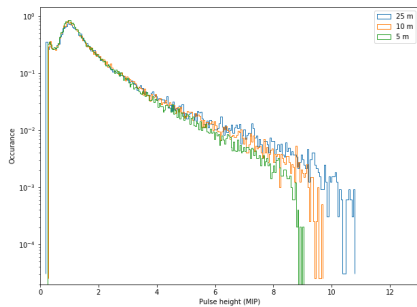
501 bleek dat de temperatuur gedurende deze weken was toegenomen. In figuur 4.38 is zichtbaar dat de MIP-waarde bij de data met detectorafstand 25 m lager is dan de MIP-waarde bij de data met detectorafstand 5 m. Om dit te corrigeren werd het pythonscript aangepast, zodat alle MIP-waarden hetzelfde werden. Door de MIP-waarden van de drie verschillende datareeksen met een gaussfit te bepalen is de verhouding tussen de MIP-waarde bij de data van 25 meter en de andere datareeksen bepaald. Uiteindelijk zijn alle pulshoogtes van de andere datareeksen vermenigvuldigd met deze verhouding en is het pulshoogtehistogram opnieuw geplott. Het resultaat is figuur 4.39. Uit onderdeel 4.2 bleek dat de coïncidentiefrequentie lager is bij grotere detectorafstanden. Om de verschillende histogrammen eerlijk te vergelijken zijn de pulshoogtehistogrammen genormaliseerd. De genormaliseerde histogrammen zijn



Figuur 4.39: Pulshoogtehistogram showercoïncidenties genormaliseerd en gecorrigeerd door verhouding MIP-waarde. Station 2010.

zichtbaar in figuur 40. In deze figuur is zichtbaar dat bij een detectorafstand van 5 meter laag energetische showers vaker worden gemeten en dat hoog energetische showers minder worden gemeten.

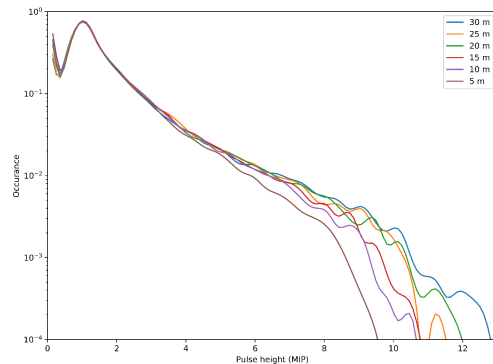
In figuur 4.39 en 4.40 zijn de verschillende histogrammen per week gecorrigeerd. Dit is een be-



Figuur 4.40: Pulshoogtehistogram showercoïncidenties genormaliseerd en gecorrigeerd door verhouding MIP-waarde. Station 2010.

perkte correctie van de data. Op de eerste plaats kan de maximale en minimale buitentemperatuur gedurende een week erg fluctueren. In de week van het meetpunt met de detectorafstand van 20 meter (20-04-2018 tot 27-04-2018) was de hoogste maxima-

le buitentemperatuur $26,6^{\circ}\text{C}$ en de laatste maximale buitentemperatuur $13,7^{\circ}\text{C}$. Op de tweede plaats verandert de temperatuur van de PMT overdag. Uit figuur 4.36 bleek dat de temperatuur van de PMT op 09-05-2018 binnen 8 uur van 11 naar 54°C steeg. Door de gevonden normalisatiefactor van $1,60 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ dat de pulshoogte van één MIP in 8 uur met ongeveer 70 mV is veranderd. Om de invloed van deze temperatuurfluctuaties te beperken is de methode van 4.3.2 4.5.2 toegepast. Per vier uur is de MIP-waarde bepaald en zijn de pulshoogtes met de verhouding van de MIP-waarden gecorrigeerd. Tot slot is de data van de pulshoogtehistogrammen vervangen door een spline. Een spline is een functie, die bestaat uit aaneengeschakelde polynomen. Een spline deelt de dataset op in verschillende bins en fit een polynoom over de verschillende bins. Uiteindelijk worden deze polynomen met elkaar verbonden zodat het geheel één lijn vormt. Het uiteindelijke resultaat is weergegeven in figuur 4.41.



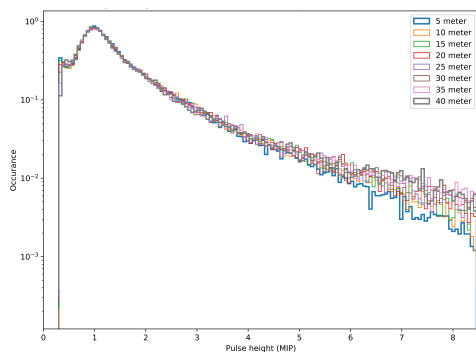
Figuur 4.41: Spline pulshoogtehistogram showercoïncidenties station 2010 bij verschillende detectorafstanden. Genormaliseerd en gecorrigeerd per vier uur.

In figuur 4.41 is te zien dat de MIP-piek smaller is dan in voorgaande pulshoogtehistogrammen. Dit kan worden verklaard door de correctie, die elke vier uur is uitgevoerd. Door de tijdseenheid te verkleinen wordt de spreiding van de temperatuur in de data-reeksen kleiner. Hierdoor wordt de spreiding van de MIP-waarden in de data-reeksen kleiner. Uiteindelijk

resulteert dit in een smallere normaalverdeling in het pulshoogtehistogram.

Uit figuur 4.41 blijkt dat bij een grotere detectorafstand er relatief meer hoge energetische showers worden gemeten. Bij een grotere detectorafstand worden relatief meer grote showers gemeten en daarom dus ook grotere energieën gemeten. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het pulshoogtehistogram energieafhankelijk is. Wanneer uitsluitend hoog energetische showers zouden worden gemeten, zou het pulshoogtehistogram er anders uit zien.

In figuur 4.41 lijken de verschillen bij verschillende detectorafstanden groter bij hoog energetische showers. Er is echter gebruik gemaakt van een logaritmische schaal; de detectieverschillen zijn bij hoge energieën minimaal. Om beter naar de verschillen te kijken bij laag energetische showers is het bereik van de pulshoogte in figuur 4.42 aangepast naar maximaal 8,5 MIP, de spline is weggehaald om het verschil tus-



Figuur 4.42: Pulshoogtehistogram showercoïncidenties station 2010 bij verschillende detectorafstanden. Genormaliseerd en gecorrigeerd per vier uur, zonder spline met energie tot 8,5 MIP.

sen de histogrammen zichtbaar te maken en tot slot zijn pulshoogtehistogrammen van de twee uiterste detectorafstanden (5 en 40 meter) dikgedrukt. De eerder genoemde bevindingen worden in figuur 4.42 bevestigd.

4.6 Conclusie

Bij grotere detectorafstanden blijft het gemiddelde tijdverschil nul maar neemt de spreiding van de tijdverschillen toe. Bij grotere detectorafstanden zijn de coïncidentiefrequenties lager dan bij kleine detectorafstanden en tot slot worden er bij grotere detectorafstanden relatief meer hoge pulshoogtes gemeten en minder lage pulshoogtes. Uit deze resultaten is te concluderen dat de detectorafstand invloed heeft op de efficiency waarmee showers met verschillende energie worden gemeten.

Bij grotere detectorafstanden worden relatief meer hoog energetische showers gemeten. Dit heeft twee oorzaken. Op de eerste plaats omdat laag energetische showers minder worden gedetecteerd bij een zenithhoek van nul graden. Voor detectie is bij beide platen een dichtheid van enkele elektronen per vierkante meter nodig. Bij lagere energieën van 10^{14} eV bevindt deze grens zich rond de 10 meter van de showercore. Hiermee kan worden aangenomen dat de kans op detectie van laag energetische showers bij grotere detectorafstanden kleiner wordt. Op de tweede plaats omdat laag energetische showers, die onder een zenithhoek invallen, het station niet zullen bereiken door de grotere atmosferische diepte. Dit resulteert in lagere coïncidentiefrequenties en relatief grotere tijdverschillen bij coïncidenties. De grotere tijdverschillen worden veroorzaakt door de grotere detectorafstand en doordat er relatief meer showers onder een bepaalde zenithhoek invallen. Bij kleinere detectorafstanden worden de laag energetische showers relatief vaker gedetecteerd. Doordat het merendeel van de laag energetische showers met een kleine zenithhoek invalt zijn de tijdsverschillen kleiner. Doordat zowel de laag- als de hoog-energetische showers bij kleinere detectorafstanden worden gedetecteerd zijn de coïncidentiefrequenties hoger.

4.7 Discussie

In de aanleiding van dit onderzoek werd beschreven dat de tweeplatenstations verschillende detectorafstanden hebben. Door dit onderzoek is gebleken dat de detectorafstand invloed heeft op welke energieshowers wel en niet worden gedetecteerd. Het

HiSPARC-netwerk kan worden gezien als één groot netwerk dat functioneert als een enkele meetopstelling. Met behulp van deze opstelling wordt onderzoek gedaan naar hoog energetische kosmische showers. Data van de verschillende stations worden hierbij gebruikt om onderzoek te doen naar coïncidenties tussen de verschillende stations.

Alleen showers met hoge energieën hebben een front dat groot genoeg is om coïncidenties tussen verschillende stations te veroorzaken. Om deze reden leidt dit tot het advies om alle detectoren met een zo'n groot mogelijke detectorafstand te plaatsen. Fokkema [23] gaf al aan dat een afstand van minder dan tien meter tussen de detectoren beperkend kan zijn. Om de data goed te vergelijken zou in een ideale situatie een gelijke detectorafstand voor alle stations benodigd zijn. Dit is echter praktisch niet haalbaar doordat de afmetingen van de de schooldaken restricties opleggen. De invloed van de detectorafstand op de meetresultaten kan echter ook worden gecorrigeerd. Hier is echter wel vervolgonderzoek voor nodig. Hierbij wordt wel aangeraden dat van alle stations wordt geregistreerd hoe het station is opgebouwd. HiSPARC heeft hiervoor een procedure, die door de meeste stations (nog) niet is doorlopen.

Alle resultaten van dit onderzoek zijn verkregen met behulp van station 2010. Aangezien het station bij aanvang van het onderzoek is gerepareerd en gecontroleerd met behulp van de meetresultaten, mag worden aangenomen dat de resultaten mogen worden generaliseerd. Het onderzoek zou herhaald moeten kunnen worden met een ander station.

Vervolgonderzoek

Binnen dit verslag worden verschillende punten, waarop vervolgonderzoek wordt aangeraden, benoemd. Hieronder zijn deze punten met enkele toevoegingen opgesomd:

- Onderzoek naar de aard van de toevallige coïncidenties; waardoor worden deze coïncidenties veroorzaakt en wat is de invloed van de luchtdruk op deze coïncidenties ?
- Onderzoek naar de kwantitatieve invloed van de temperatuur van de PMT op de meetresultaten (singles en coïncidenties) is aangeraden.

Het is onbekend of de gevonden normalisatiefactor bij channel 1 van station 2010 voor andere detectoren hetzelfde zou zijn. Dit wordt wel verwacht omdat dit negatieve temperatuurcoëfficiënt wordt veroorzaakt door het materiaal van de PMT en deze waarden bij detector 1 en 2 van station 2010 ongeveer overeenkwamen.

- Onderzoek naar mogelijke correcties voor de invloed van de detectorafstand. Zo kan worden onderzocht hoe coïncidentiesrates kunnen worden gecorrigeerd bij een vergelijkend onderzoek met meerdere stations.
- Het onderzoek herhalen voor vierplatenstations. Met behulp van de richtingsreconstructie kan het verband tussen de zenithhoek en tijdverschillen bij detectorafstanden worden onderzocht.

5 Richtingreconstructie op basis van een maximum likelihoodfit.

Nathalie van der Weiden



Nathalie van der Weiden is als eerstegraadsdocent Natuurkunde verbonden aan het Alberdingk Thijm College in Hilversum. Zij heeft aan de Vrije Universiteit Amsterdam in 2015 haar master Particle and Astroparticle Physics gehaald. Daarna heeft zij haar eerstegraadsbevoegdheid gehaald en is nu twee jaar werkzaam in het onderwijs. Dit is het tweede jaar dat zij meedoet met het project Leraar in Onderzoek.

5.1 Introductie

5.1.1 Kosmische straling en HiSPARC

Vanuit de ruimte is er een continue stroom van kosmische straling. Deze straling bestaat uit allerlei soorten primaire deeltjes, zoals protonen, elektronen en atoomkernen. Een lawine ontstaat als zo'n primair deeltje botst met een atoomkern in de atmosfeer. Door deze botsing ontstaan weer nieuwe deeltjes, die op hun beurt ook weer nieuwe deeltjes maken door botsingen. Afhankelijk van de energie van het primaire deeltje en de hoogte van de eerste interactie, kunnen deze deeltjes tot op het aardoppervlak gemeen worden.

Met behulp van het HiSPARC experiment is het mogelijk om deze lawines te meten. Een HiSPARC detectiestation bestaat uit twee of vier detectoren. Als een station een lawine detecteert in minimaal drie detectoren, wordt geprobeerd om de richting van de lawine te reconstrueren. Dit betekent dat de positie

aan de hemel waar de lawine vandaan komt, wordt gereconstrueerd. Deze richting wordt gegeven door twee coördinaten: een zenit (θ) en een azimut (ϕ). Deze coördinaten definiëren een punt op de halve bol die de hemel boven het station voorstelt.

De zenit hoek is gedefinieerd als $\theta = 0^\circ$ recht boven en als $\theta = 90^\circ$ op de horizon. Voor de azimut geldt $\phi = 0^\circ$ richting het oosten en $\phi = 90^\circ$ richting het noorden. Voor de azimutverdeling van de lawines geldt dat hierbij geen voorkeursrichting wordt verwacht, omdat het heelal als emitter een isotrope verdeling heeft. Dit betekent dat de verwachting voor de azimutverdeling vlak is als het aantal lawines wordt uitgezet tegen de hoek. Hierbij geldt dat elke bin een gelijk oppervlak aan de hemel weergeeft.

5.1.2 Onderzoeksvraag en verwachting

Uit voorgaand onderzoek is gebleken dat de azimutverdeling er anders uitziet dan de verwachting [33].

Er is toen echter geen verklaring gevonden voor de vorm van deze verdeling. Het doel van dit onderzoek is dan ook om een verklaring te vinden voor de azimuthverdeling. Uit een eerste analyse van de reconstructies blijkt dat bij veel events de reconstructies mislukken. Dit zou er voor kunnen zorgen dat de verdeling van de azimuth een gevolg is van het reconstructiealgoritme. Tijdens dit onderzoek wordt er dan ook gekeken naar het reconstructiealgoritme als een mogelijke verklaring voor de azimuthverdeling.

5.2 Methode

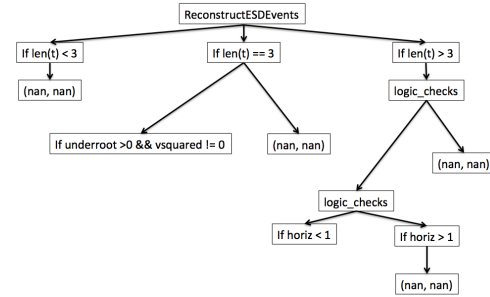
5.2.1 Opbouw SAPHIRE reconstructie

Voor de analyse van de data van de HiSPARC stations wordt het SAPHIRE pakket [34] gebruikt. Hiermee is het mogelijk om onder andere een richtingreconstructie uit te voeren op de data. Afhankelijk van de geselecteerde data is het mogelijk om reconstructies uit te voeren op events, als de data van één station komt, of op coincidenties, als de data van minimaal drie stations komt. Voor dit onderzoek zijn simulaties voor station 501 gebruikt.

Voor de reconstructie van events geldt dat de klasse ReconstructESDEvent wordt gebruikt. De opbouw van deze klasse is te zien in figuur 5.1. Hierin is te zien dat er allereerst gecontroleerd wordt hoeveel tijden er gemeten zijn. Dit is van belang, omdat er minimaal drie tijden nodig zijn om een reconstructie uit te voeren. Wanneer er minder dan drie tijden zijn, zal het algoritme NaN (not a number) teruggegeven voor de zenit en de azimuth. Als er wel genoeg tijden zijn, wordt op basis van het aantal beschikbare tijden gekozen voor het DirectAlgorithmCartesian3D, bij precies drie tijden, of het RegressionAlgorithm3D, bij meer dan drie tijden.

DirectAlgorithmCartesian3D

Het DirectAlgorithmCartesian3D is gebaseerd op de vectoren, zoals beschreven in Montanus [35]. Hierin wordt een afleiding gegeven voor de formules die gebruikt worden in het algoritme. Voor deze afleiding wordt er een eenheidsnormaalvector $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ beschreven. Deze normaalvector staat loodrecht op



Figuur 5.1: De opbouw van het reconstructiealgoritme voor het reconstrueren van events.

het lawinevlak en wijst in de richting van de oorsprong van de lawine, dus tegengesteld aan de bewegingsrichting van de lawine. In het kort komt het erop neer dat de eenheidsnormaalvector beschreven kan worden als:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{u} \times \mathbf{v} \pm \mathbf{v} \sqrt{v^2 - u^2}}{v^2} \quad (5.1)$$

Hierbij zijn de vectoren \mathbf{u} en \mathbf{v} gegeven door:

$$\mathbf{u} = c\Delta t_2 \mathbf{d}_1 - c\Delta t_1 \mathbf{d}_2 \quad (5.2)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{d}_1 \times \mathbf{d}_2 \quad (5.3)$$

Hierbij zijn \mathbf{d}_1 en \mathbf{d}_2 de vectoren voor de relatieve afstanden tussen de detectoren. \mathbf{d}_1 is de vector van detector 0 naar detector 1, en \mathbf{d}_2 van detector 0 naar detector 2. Wat uit de afleiding volgt is dat het deel onder de wortel in vergelijking 5.1 altijd groter is dan nul. In de implementatie van deze formules in het algoritme is er daarom een extra controle toegevoegd om te controleren of het deel onder de wortel inderdaad groter is dan nul. Als dit niet het geval is wordt er NaN teruggegeven voor de zenit en de azimuth.

RegressionAlgorithm3D

Wanneer meer dan drie tijden beschikbaar zijn, is het ook mogelijk om de richting van de lawine te reconstrueren door middel van een fitmethode. Het RegressionAlgorithm3D is gebaseerd op de methode zoals beschreven in [35]. Hierbij wordt de richting

van de lawine bepaald door de minimalisatie van de functie:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{k-1} \left(\frac{x_i n_x + y_i n_y + z_i n_z + c t_i + m}{\sigma(t_i)} \right)^2 \quad (5.4)$$

m is een constante die de positie van het front op tijd t_i bepaalt. Hierin is k het aantal gedetecteerde punten en $\sigma(t_i)$ is de onzekerheid in de tijd van detector i . In het algemeen zullen de onzekerheid σ_t en de tijd t_i afhangen van de afstand r_i van detector i tot de core van de lawine.

Voor beide algoritmes geldt dat wordt aangenomen dat het lawinefront met de lichtsnelheid beweegt, vlak en oneindig dun is. Er wordt dus niet meegenomen dat deeltjes ook later aan kunnen komen, door de vorm van het lawinefront.

5.2.2 Analyse van de aannames

Door naar events in de core van de lawine te kijken, kan het effect van de aannames van het huidige algoritme worden bekeken. Hierbij wordt zowel gekeken naar data van alle stations op het Science Park, met uitzondering van station 507 [36], als data en simulaties van station 501.

Voor de data van de stations worden de events geselecteerd op basis van de volgende criteria:

1. Alle vier de platen zijn geraakt en hebben een geldige arrival time.
2. Gemeten arrival times zijn fysisch. Hiermee wordt bedoeld dat de snelheid van het front in de berekening voor deze tijden niet groter wordt dan de lichtsnelheid.
3. Er is een zenit en een azimut gereconstrueerd.

Voor de simulatie wordt de selectie gedaan op basis van het aantal MIPs in de detectoren. Om events in de core van de lawine te selecteren, wordt geëist dat in elke plaat minimaal 4 MIPs geregistreerd zijn.

Voor de geselecteerde events mag aangenomen worden dat je vlakbij de core van de lawine zit. In de core is het lawinefront vrijwel vlak als slechts een beperkte ruimtehoek wordt beschouwd. Bovendien heeft het de kleinste dikte omdat het front dan loodrecht op de

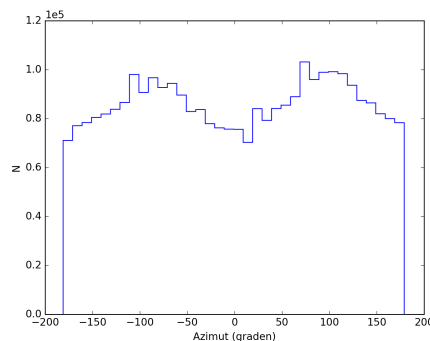
kijkrichting staat. Hierdoor zouden de aannames die gedaan worden bij de reconstructie minder invloed kunnen hebben. Met de geselecteerde events wordt vervolgens opnieuw een richtingreconstructie gedaan.

5.3 Resultaten

5.3.1 Station 501

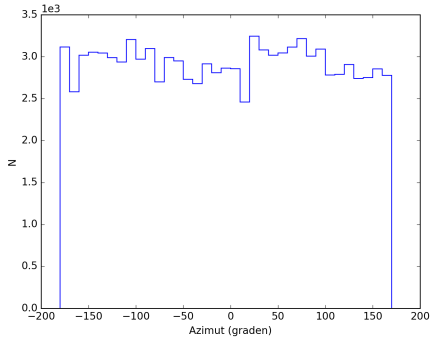
Bij het huidige reconstructiealgoritme wordt aangenomen dat het lawinefront vlak en oneindig dun is. Om te controleren of deze aannames een effect hebben op de vorm van de azimutverdeling is naar events gekeken waarbij aangenomen kan worden dat deze events in het midden van het lawinefront zitten.

Voor de data zijn alleen die events geselecteerd waarbij in elke detector minimaal vier MIPs zijn waargenomen. Alle data uit het jaar 2017 is gedownload voor station 501. Ongeveer 0.5% van de events (105045 events) van station 501 voldoet aan deze eis. Wanneer alle events worden meegenomen vertoont de azimutverdeling een voorkeursrichting, zie figuur 5.2, terwijl deze verdeling vlak wordt als alleen events uit de core van de lawine worden meegenomen, zie figuur 5.3.

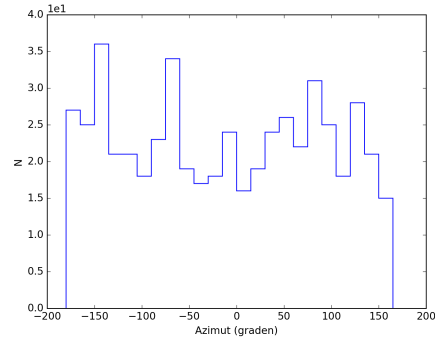


Figuur 5.2: De azimutverdeling voor station 501, waarbij alle gereconstrueerde events uit 2017 zijn meegenomen.

Naast het gebruik van data van station 501 is er ook gekeken naar simulaties van dit station. Voor de simulatie blijven ongeveer 1.5% van de events (554



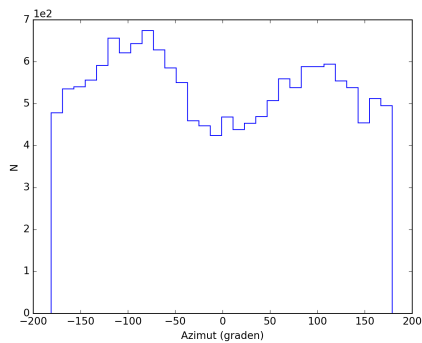
Figuur 5.3: De azimutverdeling voor station 501, waarbij alleen events met minimaal vier MIPs in vier detectoren zijn meegenomen.



Figuur 5.5: De azimutverdeling voor de simulatie van station 501, waarbij alleen events met minimaal vier MIPs in vier detectoren zijn meegenomen.

events) over na de selectie. Het verschil in percentages met de data is mogelijk te verklaren door het feit dat de lawines bij de simulaties relatief dicht op de stations zijn gegooid, waardoor de core van de lawine vaker over het station heen ligt dan bij de data het geval is. Ook bij de simulatie wordt de azimutverdeling rechtgetrokken, zie figuur 5.4 en figuur 5.5.

In tabel 5.1 zijn de resultaten te zien. Het blijkt dat voor station 501 5656 keer niet voldaan is aan de eis dat het deel onder de wortel in vergelijking 5.1 groter moet zijn dan nul. Als er verder wordt gekeken waarom dit deel negatief wordt, blijkt dat dit in 5633 keer van de gevallen komt doordat de tijden die zijn opgeslagen niet fysisch zijn. Hiermee wordt bedoeld dat de snelheid van het front voor deze tijden groter zou moeten zijn dan de lichtsnelheid.



Figuur 5.4: De azimutverdeling voor de simulatie van station 501, waarbij alle gereconstrueerde events van de simulatie zijn meegenomen.

Verder is gekeken hoeveel platen er geraakt worden per event en vervolgens hoeveel reconstructies gelukt zijn. Ook is geteld waarom de reconstructie misging.

Platen geraakt	Aantal events	Aantal reconstructies
1	0	0
2	3325	0
3	7202	1546
4	29733	14577

Tabel 5.1: Aantal events en reconstructies als functie van het aantal platen dat geraakt is voor station 501.

5.3.2 Stations op het Science Park

Voor de analyse van de reconstructie eigenschappen [36] is gebruik gemaakt van alle stations op het Science Park in Amsterdam, met uitzondering van station 507. Van dit station zijn de posities van alle platen niet altijd bekend. De data van 1 tot 20 november

2017 zijn zoveel mogelijk gebruikt. Voor station 504 (kapotte PMT), 509 (kapotte PMT) en 511 (stond drie dagen uit) is een andere periode van 19 dagen gekozen, zie hiervoor tabel 5.2.

Station	Start datum	Stop datum
504	01-01-2016	20-01-2016
509	01-09-2016	20-09-2016
511	11-11-2017	30-11-2017

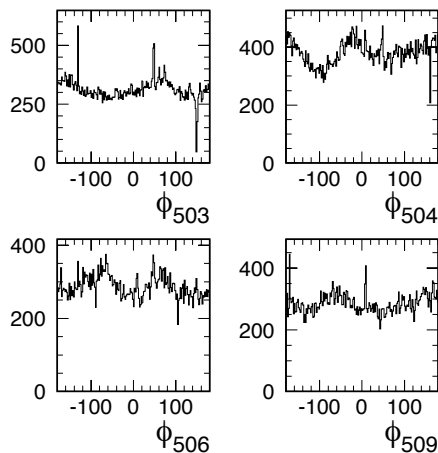
Tabel 5.2: De periodes waarvoor data geselecteerd is bij de stations 504, 509 en 511. Dit is anders dan de overige stations waarvoor data van 1 tot 20 november 2017 gebruikt is.

De stations op het Science Park bestaan allemaal uit vier platen, alleen de configuratie van deze station verschilt. Voor de geselecteerde stations zijn er drie mogelijke configuraties: stervormige stations (station 503, 504, 506 en 509), ruitvormige stations met een hoek van 60° (station 501, 502, 508, 510 en 511) en ruitvormige stations met een hoek van 78° (station 505).

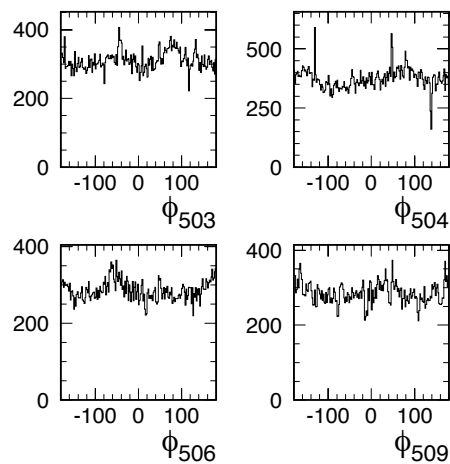
De stervormige stations hebben drie detectoren in een gelijkzijdige driehoek liggen. De vierde detector ligt in het zwaartepunt van de driehoek. De hoekpunten van de driehoek zijn genummerd 1, 3 en 4 en detector 2 ligt in het zwaartepunt. De reconstructie is drie keer uitgevoerd: alle vier de detectoren worden meegenomen, alleen de detectoren in de grote driehoek worden meegenomen (detector 1-3-4) en de detectoren in de kleine driehoeken worden meegenomen (2-4-1, 2-1-3 en 2-3-4).

De azimutverdeling laat voor alle stervormige stations op een fase na dezelfde verdeling zien. In tabel 5.3 staan een aantal karakteristieke waarden voor de verschillende stervormige stations. Hierin zijn de resultaten van de reconstructies waarbij alle detectoren zijn meegenomen en de resultaten waarbij alleen de buitenste detectoren zijn meegenomen. De gemiddeldes volgen uit de fit van een constante aan de azimutverdeling. De amplitude is het halve verschil van de hoogste en laagste waarde van de gladde curve door de meetpunten. De amplitude in het geval van een reconstructie met alle platen is $(14 \pm 2)\%$ en van

een reconstructie met alleen de buitenste detectoren is $(11 \pm 1)\%$.



Figuur 5.6: De azimutverdeling voor de stervormige stations. Alle platen zijn in de reconstructie opgenomen [36].



Figuur 5.7: De azimutverdeling voor de stervormige stations. Alleen de platen op de hoekpunten zijn in de reconstructie opgenomen [36].

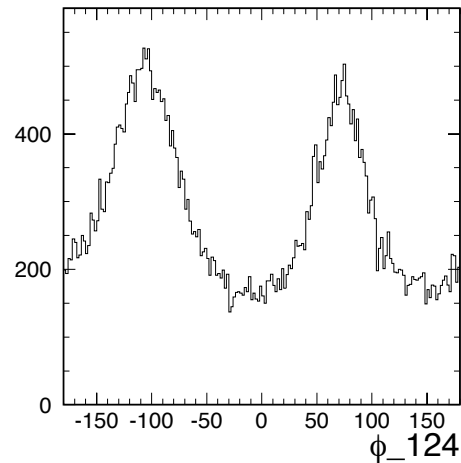
De gemiddelde waarden voor de verdelingen verschil-

Station	Alle detectoren		Buitenste detectoren	
	Gemiddelde	Amplitude	Gemiddelde	Amplitude
503	313	13%	311	12%
504	380	17%	374	11%
506	287	14%	286	11%
509	286	12%	285	9.2%

Tabel 5.3: De resultaten van de reconstructies met alle detectoren tegelijk en met alleen de buitenste drie detectoren.

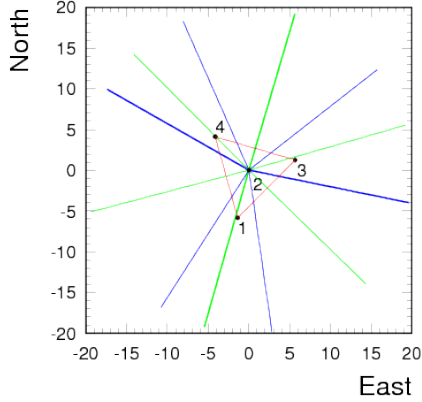
len voor beide analyse binnen één standaarddeviatie van elkaar. De patronen zijn vergelijkbaar, maar hebben een andere fase. Dit zou verklaard kunnen worden door de verschillende oriëntaties van de stations. Naast de azimutverdelingen voor de grote driehoek is ook gekeken naar de verdelingen voor de kleine driehoeken binnen de stervormige stations. Het resultaat voor één van de kleine driehoeken voor station 503 is te zien in figuur 5.8. De verdeling kan beschreven worden als twee pieken van 600 events op een vlakke achtergrond van ongeveer 500 events per bin. Figuur 5.9 laat zien dat de maxima wijzen van detector 2 naar detector 1 en van detector 2 naar het midden van de lijn tussen de detectoren 3 en 4. Deze twee richtingen liggen in elkaars verlengde. De minima staan bijna loodrecht op de lijn voor de maxima en vormen een hoek van $(162 \pm 2)^\circ$. Deze hoek is gericht van de positie van detector 1 vandaan. Deze geometrie geldt voor alle 12 kleine driehoeken van de vier stervormige stations.

De ruitvormige stations hebben elk vier detectoren die in een ruit gelegd zijn. Drie platen zijn in een gelijkzijdige driehoek gelegd. De vierde detector vormt met twee van deze drie detectoren ook weer een gelijkzijdige driehoek. De zijden van de twee gelijkzijdige driehoeken zijn ongeveer 10 meter. Ook bij deze ruitvormige stations zijn drie mogelijkheden om driehoeken te vormen: alle vier de detectoren worden meegenomen, alleen de detectoren in de gelijkzijdige driehoeken worden meegenomen en de detectoren in de gelijkbenige driehoeken worden meegenomen. De nummering van de detectoren verschilt per station. Tabel 5.4 toont de nummering van de detectoren. Figuur 5.10 toont de azimutverdelingen voor de ver-



Figuur 5.8: De azimutverdeling voor het stervormige station 503. Alleen de detectoren 1, 2 en 4 zijn in de simulatie opgenomen [36].

schillende driehoeken. Deze figuur toont het resultaat voor station 501, maar de verdelingen voor de overige station laten op een fase na hetzelfde patroon zien. De azimutverdelingen voor de twee gelijkzijdige driehoeken (4-1-2 en 4-3-2) zijn vrijwel vlak, terwijl die voor de gelijkbenige driehoeken (1-2-3 en 3-4-1) grote pieken vertonen. Zoals te zien in figuur 5.11 wijzen de maxima ook in dit geval naar de detector en de tegenovergestelde richting, terwijl de minima net om de andere detectoren heen wijzen. De twee detectoren waar de maxima naar wijzen liggen voor alle stations op de korte diagonaal. De twee detectoren die gemist worden liggen op de lange diagonaal. Voor alle ruit-



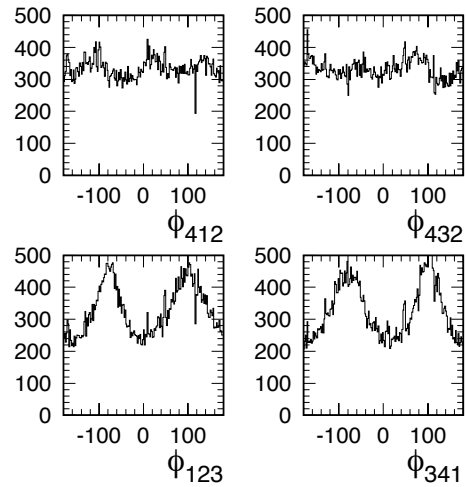
Figuur 5.9: Station 503 met daarin de richting van de minima en maxima voor de verschillende kleine driehoeken (2-4-1, 2-1-3 en 2-3-4). De punten staan op het midden van de detectoren. De lijnen geven de maxima (groen) en de minima (blauw) van de azimutverdelingen in de driehoeken 2-4-1, 2-1-3 en 2-3-4 weer. De lijnen die horen bij driehoek 2-4-1 zijn dikgedrukt. Het patroon van de andere driehoeken is hetzelfde [36].

vormige stations geldt dat de gemiddelde hoek tussen de minima gelijk is aan $(162 \pm 6)^\circ$, dit is hetzelfde als de overeenkomende hoek in de stervormige stations.

Om de effecten van de dikte van het front te begrijpen is een programma geschreven, waarin een dun vlak lawinefront wordt gemaakt, dat met de lichtsnelheid naar de grond beweegt. De tijden waarop dit front de detectoren passeert worden geanalyseerd met hetzelfde programma dat hierboven beschreven is. Het lawinefront wordt gemaakt met de experimentele zenit- en azimutverdelingen [37]. De kromming van het lawinefront wordt niet meegenomen, omdat verwacht wordt dat deze kromming op de afstanden van een station een geringe invloed heeft op de resultaten. Nadat de aankomsttijden berekend zijn, wordt bij deze tijden een random getal opgeteld. Dit getal is normaal verdeeld met een gemiddelde van nul en een instelbare standaardafwijking. Voor een dun front

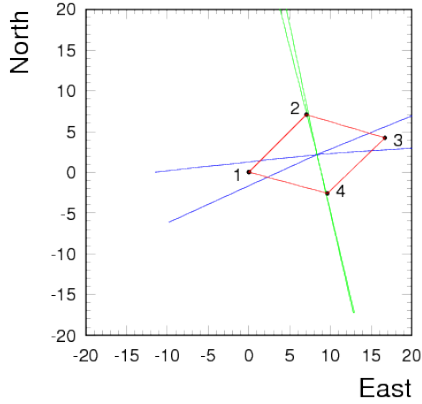
Station	Positie detector 1	Volgorde detectoren	Oriëntatie
501	Lange as	1-2-3-4	14,18
502	Korte as	1-2-3-4	198,09
508	Korte as	1-2-4-3	75,00
510	Lange as	1-2-3-4	14,19
511	Korte as	1-2-3-4	168,09

Tabel 5.4: Details van de vijf ruitvormige stations. Positie detector 1: detector 1 ligt op de lange of korte as van de ruit. Volgorde detectoren: de detectoren met de klok mee genummerd in de in deze kolom genoemde volgorde. Oriëntatie: de oriëntatie van de lange diagonaal van de detector met het laagste nummer naar de detector met het hoogste nummer. De hoek is van oost via noord in graden.



Figuur 5.10: De azimutverdeling voor station 501, deze verdeling is representatief voor de azimutverdeling van de overige ruitvormige stations. De verdelingen zijn vrij vlak voor de gelijkzijdige driehoeken en vertonen grote pieken voor de gelijkbenige driehoeken [36].

($\sigma = 0$ ns) komen de resultaten en de oorspronkelijke getallen exact overeen, de azimutverdeling is zoals de



Figuur 5.11: Station 501 met daarin de richting van de minima en maxima voor de twee gelijkbenige driehoeken (4-1-2 en 4-3-2). De punten staan op het midden van de detectoren. De lijnen geven de maxima (groen) en de minima (blauw) van de azimuthverdelingen in de driehoeken 4-1-2 en 4-3-2 weer. Het patroon van de andere driehoeken is hetzelfde [36].

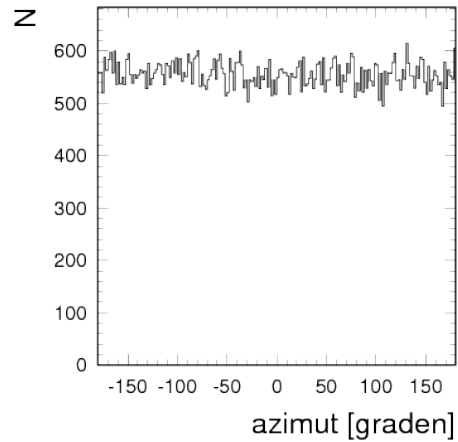
verwachting vlak, zie figuur 5.12 Na een introductie van een front met dikte, ongeveer 5 ns, zijn de resultaten vrijwel gelijk aan de data van de verschillende stations, zie figuur 5.13.

5.4 Nieuw algoritme

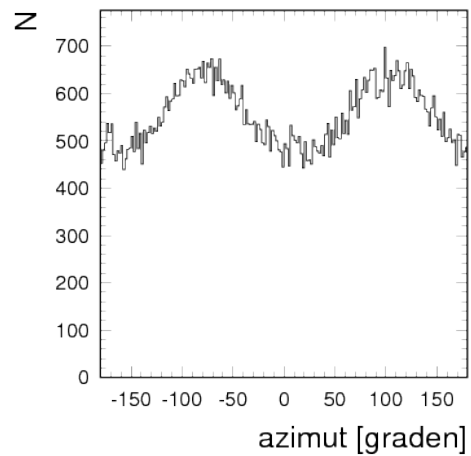
Zoals eerder beschreven wordt de azimuthverdeling vlakker als alleen events dichtbij de core worden meegenomen. De aannames die gedaan worden over de dikte van het front zijn dus niet goed genoeg. Om rekening te kunnen houden met de vorm van het front is het gebruik van een maximum likelihoodfit een goede mogelijkheid.

5.4.1 Maximum likelihoodfit

In statistiek is de maximum likelihoodfit een methode om parameters te schatten aan de hand van observaties. Voor het reconstructiealgoritme wordt met een maximum likelihoodfit geprobeerd om de zenit en



Figuur 5.12: De azimuthverdeling voor een simulatie bij station 501. Voor deze simulatie is een dun front gebruikt met een dikte van 0 ns [36].



Figuur 5.13: De azimuthverdeling voor een simulatie bij station 501. Voor deze simulatie is een front gebruikt met een dikte van 5 ns [36].

azimut van de lawine te bepalen aan de hand van de gegeven tijdsverschillen.

In het algemeen wordt er een parameterwaarde geschat waarvoor de steekproefuitkomst het meest aannemelijk is. Hoe aannemelijk een parameterwaarde

is, wordt gemeten met een kansdichtheid om bij die waarde van de parameter de steekproefuitkomst te vinden. Bij de maximum likelihoodfit wordt er uitgegaan van een dataset: $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$. Voor het te fitten model is een kansdichtheid bekend, die de kans bepaalt van de uitkomst van de data, x_i , bij een gegeven waarde voor de parameter θ : $p(x_i, \theta)$. Vervolgens wordt voor elke datapunt deze kans bepaald en met elkaar vermenigvuldigd, zodat een likelihood ontstaat: $L(\theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i, \theta)$. Deze likelihood wordt voor de parameter gemaximaliseerd.

5.4.2 Opbouw van het lawinefront

Zoals eerder beschreven is voor de uitvoering van een maximum likelihoodfit een probability density function (pdf) nodig. Voor de reconstructie beschrijft deze pdf het lawinefront. Het lawinefront heeft in werkelijkheid een eindige dikte en is niet vlak. In eerste instantie wordt voor de aanpassing van het reconstructiealgoritme alleen gekeken naar een lawinefront met een eindige dikte. Het feit dat het vlak ook gekromd is wordt in deze analyse niet meegenomen.

Als pdf is een Gauss-distributie gekozen:

$$p(\Delta t' | \theta, \phi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\Delta t' - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.5)$$

Hierbij zijn μ en σ gegeven door:

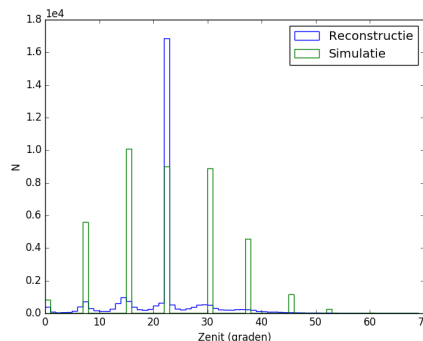
$$\mu = \frac{r_1 \cos(\phi - \phi_1) \sin \theta}{c} \quad (5.6)$$

$$\sigma = 10.5 \text{ ns} \quad (5.7)$$

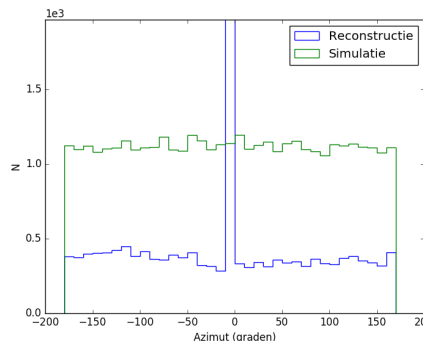
r_1 en ϕ_1 zijn respectievelijk de afstand tussen detector 0 en 1 en de hoek tussen de lijn die detector 0 en 1 verbindt en het oosten.

5.4.3 Toepassing van het algoritme

Met het bovenstaande algoritme is een reconstructie gedaan voor een simulatie van station 501. De resultaten zijn te zien in figuur 5.14 en 5.15. In beide figuren zijn de gereconstrueerde hoeken in het blauw weergegeven en de gesimuleerde hoeken in het groen. Voor de verschillen tussen de gereconstrueerde en gesimuleerde hoeken, zie figuur 5.14 en 5.15.



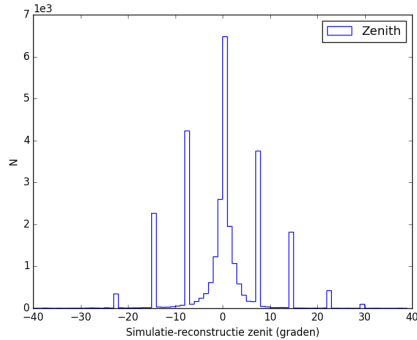
Figuur 5.14: De zenithhoek verdeling voor het algoritme gebaseerd op een maximum likelihoodfit. In blauw de gereconstrueerde hoek en in groen de gesimuleerde hoek.



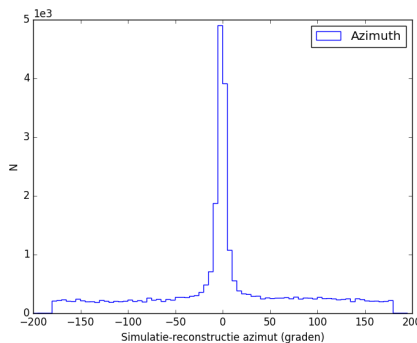
Figuur 5.15: De azimuthhoek verdeling voor het algoritme gebaseerd op een maximum likelihoodfit. In blauw de gereconstrueerde hoek en in groen de gesimuleerde hoek.

Voor de zenithhoek (figuur 5.16) zitten de verschillen voor de meeste hoeken binnen 10° van de echte waarde van de hoek. In de figuur zijn een aantal hoge pieken te zien, dit komt doordat niet alle zenithhoeken gesimuleerd zijn, zie ook figuur 5.14 voor de gesimuleerde hoeken.

Ook voor de azimuthhoek (figuur 5.17) zitten de meeste verschillen binnen 10° van de echte waarde van de hoek. Er zit echter een soort achtergrond van ongeveer 200 events per bin. Dit heeft te maken met de



Figuur 5.16: Het verschil tussen de gereconstrueerde zenithhoek en de gesimuleerde zenithhoek.



Figuur 5.17: Het verschil tussen de gereconstrueerde azimuthhoek en de gesimuleerde azimuthhoek.

grote piek bij 0° in figuur 5.15. Deze piek is een gevolg van het algoritme, voor een aantal events kan het algoritme geen maximalisatie uitvoeren en worden de beginwaarden teruggegeven als resultaat.

Voor een aantal events werkt het algoritme niet. Voor die events geeft het algoritme als resultaat de waarden die worden ingevoerd als beginwaarde. Dit komt door de simulatie. In de simulatie wordt voor de aankomsttijd -999 ingevoerd als er geen deeltje door de detector gaat. Dit om te zorgen dat deze tijd niet wordt meegenomen in de verdere simulatie. Deze tijden worden echter wel verder meegenomen in de simulatie, waardoor voor een aantal events tijdsverschillen ontstaan in de orde van de microseconde. Dit

heeft als gevolg dat het voor het algoritme onmogelijk is om een maximalisatie uit te voeren en wordt als resultaat de beginwaarden teruggegeven.

5.5 Conclusie en discussie

Het blijkt dat de aannames die gedaan worden aan het begin van de reconstructie niet kloppen. Het lawinefront is niet vlak en heeft een dikte. Vooral naar de randen toe is het lawinefront dikker en meer gekromd. Hierdoor zijn veel reconstructies niet mogelijk, met als gevolg dat de lawines een voorkeursrichting lijken te hebben, hoewel dit waarschijnlijk niet het geval is. Dit blijkt uit het feit dat de azimuthverdeling vlak wordt als er alleen gekeken wordt naar events waarbij er in vier platen minimaal vier MIPs gedetecteerd zijn. Als deze eis gebruikt wordt, is de waarschijnlijkheid dat de core van de lawine in dichtbij het station terecht gekomen is, groter. En omdat de lawine in de core een stuk smaller en vlakker is, hebben de aannames van de reconstructie minder effect.

Het huidige algoritme heeft dus te veel beperkingen en er zal een nieuw algoritme moeten komen waarbij rekening gehouden wordt met de vorm van het lawinefront. Dit heeft wel tot gevolg dat niet meer precies bepaald kan worden waar de lawine en dus het primaire deeltje vandaan gekomen is, omdat de gemeten tijdsverschillen niet alleen iets zeggen over de richting van het lawinefront, maar hierbij moet meegenomen worden dat een deeltje ook later aankomt, doordat het achterin het lawinefront zit. Daarom zal het nieuwe algoritme alleen een kansverdeling kunnen geven waaruit moet blijken voor welke richting de waarschijnlijkheid het grootst is dat de lawine daarvandaan gekomen is.

Kortom de gevonden azimuthverdeling is een gevolg van het huidige reconstructiealgoritme en heeft niets met de opstelling van de detectoren te maken.

Bij dit onderzoek is gebruik gemaakt van simulaties voor het station 501. Omdat het draaien van de simulaties veel rekenkracht kost, duurt het daardoor ook lang om genoeg events te krijgen voor de analyse. Hierdoor was de dataset van de simulatie ongeveer 500 keer kleiner dan de dataset die gedownload was voor het jaar 2017. Dit kan gevolgen hebben voor de

statistiek die toegepast wordt bij de analyse van de reconstructie. Maar omdat zowel de data als de gesimuleerde data dezelfde vorm voor de azimutverdeling laten zien, kan aangenomen worden dat ook de gesimuleerde dataset groot genoeg is om conclusies uit te trekken.

Er is gekeken naar een nieuw reconstructiealgoritme op basis van een maximum likelihoodfit. Dit algoritme is getest met simulaties voor station 501. De eerste resultaten zijn veelbelovend. De azimutverdeling is vlak en de gereconstrueerde hoeken liggen voor de meeste gevallen binnen 10° van de gesimuleerde hoeken. Voor de overige events is de afwijking van de gesimuleerde hoeken een gevolg van de simulatie. Doordat in de simulatie bij een aantal events verkeerd is doorgerekend met aankomsttijden, werkte het algoritme niet goed en werden de beginwaarde teruggegeven als resultaat. In vervolg onderzoek zou gekeken moeten worden naar mogelijkheden om deze events niet mee te nemen in de resultaten van de reconstructie.

6 Tot slot

Het afgelopen jaar hebben weer 5 leraren uit Amsterdam, Hilversum tot zelfs uit de regio Nijmegen weer in de keuken van het wetenschappelijk bedrijf kunnen kijken. De resultaten van hun onderzoek worden gepresenteerd in dit document. Al hun onderzoek vond plaats in het kader van het HiSPARC project. Alle aspecten hiervan kwamen aan bod; hardware, software ontwikkeling en data analyse. Verdieping van het theoretisch begrip werd bereikt in een serie seminars. Ook werden actuele wetenschappelijke vraagstukken bestudeerd met begeleiding door leden van de lokale wetenschappelijke staf. Dit jaar is de fokus van de onderzoeken gelegen in het nog beter begrijpen van de opstelling. Nathalie van der Weiden heeft de simulatie en dan de rekonstruktie van de gesimuleerde data vergeleken met de input van de simulaties. Kees van der Velden heeft het station op het dak van zijn school gerepareerd en daarmee een studie voltooid om de afhankelijkheid van de meetresultaten en afstand tussen de platen te bepalen. Jose-Carlos Caballero heeft de globale anisotropie van de intensiteit van kosmische straling proberen te bepalen, en Thijs Aldus heeft kunnen laten zien dat er in de laatste halve seconde significant meer kosmische straling wordt gemeten dan buiten die periode.

Ook dit jaar werd wederom een kickoff bijeenkomst gehouden. Prof. Dr. P. Decowski introduceerde de zoektocht naar *zwarte materie*. In twee kolleges werd de theoretische onderbouwing hiervan en de actuele stand van zaken met het Xenon experiment in het laboratorium in de Gran Sasso onder de loep genomen. Tenslotte werd eind augustus het jaar afgesloten met

een bijeenkomst waarin de LiO's elkaar hun resultaten presenteerden.

Tenslotte vernamen wij in het afgelopen jaar dat dit programma helaas wordt gediskontinueerd door het NWO (de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek). Tijd dus voor een overzicht van de behaalde resultaten. In de afgelopen 10 jaar hebben 50 leraren deelgenomen aan het programma Leraar in Onderzoek. Er zijn 30 profielwerkstukken op de website geplaatst, maar meer gemaakt. Deze 50 leraren hebben ieder jaar weer contact met een paar duizend leerlingen, uitgaande van full-time aanstellingen, en klassen van ongeveer 25 leerlingen. Buiten dit, is er 1 leraar gepromoveerd in deze periode en een tweede zal dat waarschijnlijk het komend jaar doen. Deze promoties zijn rechtstreeks het gevolg van het LiO programma. Er verschenen tot op heden 14 wetenschappelijke artikelen, en 4 presentaties bij conferenties. Mede door dit programma is HiSPARC ieder jaar weer aanwezig bij de jaarlijkse Woudschoten conferentie, waar meer dan 600 docenten Natuurkunde elkaar ontmoeten. Wij kijken tevreden terug op een succesrijk decennium.

Referenties

- [1] T. C. Marshall, M. P. McCarthy, and W. D. Rust. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100:7097–7103, 1995.
- [2] S. Noteboom. Processing, validatie, en analyse van bliksemdata uit het SAFIR/FLITS systeem., 2006. Internal report, IR-2006-01.
- [3] C. Rutjes, A. Dubinova, and U. Ebert. Kosmisch onweer. *Nederlands tijdschrift voor Natuurkunde*, 82:22–26, 2016.
- [4] T. Huege. Radio detection of cosmic ray air showers in the digital era. *Physics reports*, 620:1–52, 2016.
- [5] J.M.C. Montanus. An extended Heitler-Matthews model for the full hadronic cascade in cosmic air showers. *Astroparticle Physics*, 59:4–11, 2014.
- [6] J. Matthews. A Heitler model of extensive air showers. *Astroparticle Physics*, 22:387–397, 2005.
- [7] Jochem D. Haverhoek. Ultra high-energy cosmic-ray extensive air shower simulations using CORSIKA, 2006. Master thesis.
- [8] D.B. Fokkema. *The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of shower direction*. PhD thesis, University of Twente, 2012.
- [9] Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2016/2017, 2016.
- [10] S. Mallick, V. A. Rakov, and J. R. Dwyer. X-ray emissions from first and subsequent leaders in natural cloud-to-ground lightning., 2014. Oral presentation O-06-01. In XV International Conference on Atmospheric Electricity.
- [11] D. R. Poelman. On the science of lightning: An overview., 2010. Wetenschappelijke en technische publicatie Nr 56.
- [12] M. van de Ven. Is een Forbush Decrease waar te nemen in de detectie van HiSPARC? Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2016/2017, 2017.
- [13] L. de Vries. Search for a correlation between HiSPARC cosmic-ray data and weather measurements. Master’s thesis, 2012.
- [14] Th. W. Kool and N.G. Schultheiss. Available from: <http://docs.hisparc.nl/routenet/nl/Fluorescentie.pdf>.
- [15] Andrew T. Young. Temperature Effects in Photomultipliers and Astronomical Photometry. *Applied Optics*, 2:51–60, 1963.
- [16] E. Rutherford and H.L. Cooke. A penetrating radiation from the earth's surface. *Phys. Rev.*, 16:184–192, 1903. Minutes of the Eighteenth Meeting of the American Physical Society.
- [17] J. C. McLennan and F. Burton. Some experiments on the electrical conductivity of atmospheric air. *Phys. Rev.*, 16:184–192, 1903. Minutes of the Eighteenth Meeting of the American Physical Society.
- [18] V.F. Hess. On the absorption of gamma-radiation in the atmosphere. *Phys. Zeit.*, 12:998–1001, 1911.
- [19] V.F. Hess. Observations in low level radiation during seven free balloon flights. *Phys. Zeit.*, 13:1084–1091, 1912.
- [20] R.A. Millikan and G.H. Cameron. High frequency rays of cosmic origin III. Measurements in Snow-Fed Lakes at high altitudes. *Phys. Rev.*, 28:851–, 1926.
- [21] W. Bothe and W. Kolhörster. Das Wesen des Höhenstrahlung. *Zeit. F. Physik*, 56:751–777, 1929.
- [22] A. H. Compton. A geographic study of cosmic-rays. *Phys. Rev.*, 43:387–403, 1933.
- [23] D.B. Fokkema. *The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of shower direction*. PhD thesis, University of Twente, 2012.

- [24] M. Ackermann et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. *Science*, 339:807–811, 2013.
- [25] K. van Dam. Pythonscript voor filteren toevallige coincidenties. private communication, 2018.
- [26] J.M.C. Montanus. *The observability of jets in cosmic air showers*. PhD thesis, University of Amsterdam, 2014.
- [27] M. Stobbelaar. Pythonscript voor plot buitenluchtdruk gedurende twee maanden. Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2017/2018, 2018.
- [28] M. van de Ven. Is een Forbush decrease waar te nemen in de detectie van HiSPARC? Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2016/2017, 2017.
- [29] H. Buisman. Lichtopbrengst en omgevings temperatuur. Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2010/2011, 2011.
- [30] L. de Vries et al. Detector installatie: Detector plaatsing., 2012. Available from: <http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/informatie-pakket/>.
- [31] Hamamatsu photonics (K.K.). Photomultiplier tubes, basics and applications (ed. 3a), 2007. chapter 13.
- [32] K. van Dam. Pythonscript voor bepalen MIP-waarde. private communication, 2018.
- [33] N. van der Weiden. Richtingreconstructie bij opstellingen van drie stations. Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2016/2017, 2017.
- [34] A.P.L.S. de Laat. SAPPHiRE. GitHub, 2017.
- [35] J.M.C. Montanus. *The observability of jets in cosmic air showers*. PhD thesis, University of Amsterdam, 2017.
- [36] J. Steijger, 2018. interne communicatie.
- [37] A. Iyono et al. Zenith angle distribution and atmospheric effect for EAS with LAAS experiments. *Proceedings ICRC-30*, 4:47–50, 2008.