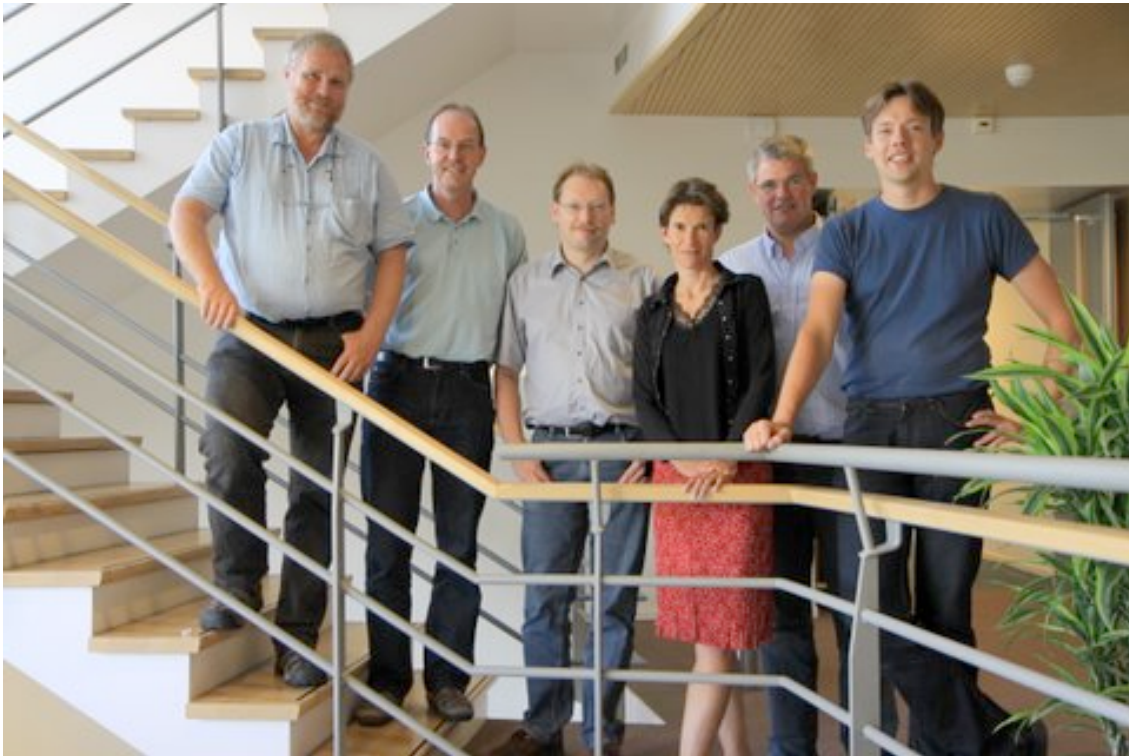


# ‘Leraar in Onderzoek’

## Hoogenergetische Kosmische Straling

5 oktober 2009



Op de voorpagina; de deelnemende docenten op de trappen van het FOM bureau (vlnr):  
Sjaak Wolst, Teun van Heesch, Arjan Vriens, Dorriith Pennink, Machiel Vegting en Frank Poortenga.

Begeleiding: Ad van den Berg, Bob van Eijk, David Fokkema, Jan-Willem van Holten en Charles Timmermans.

Coördinatie: Surya Bonam.

Dit document is ook in pdf formaat beschikbaar op de HiSPARC website: <http://www.hisparc.nl/>

Het project 'Leraar in Onderzoek' is financieel mogelijk gemaakt door de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM). Docenten zijn bij Nikhef, de Radboud Universiteit Nijmegen en het Kernfysisch Versneller instituut van de Rijks Universiteit Groningen werkzaam geweest.



## Inhoud

<b>1.    <b>Introductie: Leraar in Onderzoek</b></b>	<b>5</b>
<b>2.    <b>Deeltjes fysica en astrodeeltjes fysica</b></b>	<b>7</b>
2.1 Deeltjes fysica	7
2.2 Astrodeeltjes fysica	8
2.3 Docenten en (astro)deeltjes fysica	9
2.4 Kosmische straling	10
2.4.1 Deeltjes-lawine	10
2.4.2 Energie spectrum	11
2.4.3 De ‘knie’	12
2.4.4 De ‘enkel’ en hoger	13
2.4.5 Detectie van kosmische straling	13
2.5 Docenten en HiSPARC	15
2.6 Deelprojecten	16
<b>3.    <b>Verslagen Leraren in Onderzoek</b></b>	<b>19</b>
3.1 Analyse data Watergraafsmeercluster	19
3.1.1 Onderzoeksopdracht	19
3.1.2 Introductie	20
3.1.3 Aantal events per station	20
3.1.4 Luchtdrukafhankelijke fluctuaties	21
3.1.5 Waargenomen en toevallige coïncidenties	22
3.1.6 Verhouding tussen twee- en drievoudige coïncidenties	24
3.1.7 Coïncidenties en afstanden stations	25
3.1.8 Conclusie	27
3.2 Simulatie en metingen van deeltjesrespons	28
3.2.1 Onderzoeksopdracht	28
3.2.2 Introductie	28
3.2.3 Fluka model voor de opstelling in de werkplaats	29
3.2.4 Ruimtelijke spreiding deeltjes; energie	30
3.2.5 Ruimtelijke spreiding deeltjes: lood	31
3.2.6 Deeltjes aantallen: energieafhankelijkheid	33
3.2.7 Deeltjes aantallen: invloed lood	34
3.2.8 Elektron-muon verhouding	35
3.2.9 Conclusie	37
3.3 Data analyse cluster Nijmegen	38
3.3.1 Onderzoeksopdracht	38
3.3.2 Introductie	38
3.3.3 De Nijmegen cluster	39

3.3.4	Bewerking ruwe data	40
3.3.5	De MPV waarde	41
3.3.6	De verhouding tussen signaal en achtergrond	43
3.3.7	Tijdverschil tussen de opeenvolgende events	44
3.3.8	Dode tijd van het meetsysteem	47
3.3.9	MPV waarden en meerdere muon-pieken	49
3.3.10	De jaarlijkse variatie in de gemeten aantallen events	50
3.3.11	De werkelijke meettijd van de systemen	52
3.3.12	Richting van de as van de lawine	53
3.3.13	Richting van de as van de lawine	60
3.3.14	Conclusie	65
3.4	Correlaties tussen HiSPARC en Auger data	67
3.4.1	Onderzoeksopdracht	67
3.4.2	Introductie	67
3.4.3	Signaal HiSPARC detector	70
3.4.4	HiSPARC en Auger	72
3.4.5	Conclusie	78
3.5	Signaalanalyse scintillator/lichtgeleider/fotobuis combinatie	81
3.5.1	Onderzoeksopdracht	81
3.5.2	Introductie	81
3.5.3	Signalen	83
3.5.4	De metingen	86
3.5.5	Conclusie	86
<b>4.</b>	<b>Conclusie</b>	<b>89</b>
4.1	Evaluatie en vooruitblik	89
4.2	Reacties deelnemers	90
4.3	Wetenschap, docenten en studiekeuze leerlingen	92
4.4	HiSPARC leerlingensymposium 2009	95
<b>Appendix A</b>	<b>Python scripts</b>	<b>97</b>
<b>Appendix B</b>	<b>FLUKA model</b>	<b>106</b>
<b>Appendix C</b>	<b>Kosmische deeltjesversnellers in de pers</b>	<b>109</b>
<b>Appendix D</b>	<b>HiSPARC leerlingensymposium in de pers</b>	<b>111</b>
	<b>Trefwoordenlijst</b>	<b>112</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>114</b>

## 1.     **Introductie: Leraar in Onderzoek**

Internationaal gezien heeft Nederland in de natuurwetenschappen een uitstekende reputatie. De sterke positie van het Nederlandse onderzoek in deze discipline wordt echter bedreigd. De instroom van studenten is reeds meer dan een decennium relatief (te) laag.

Het probleem van de dalende instroom is terug te voeren op diverse factoren, zoals de interesse die op een middelbare school voor een studie of beroep wordt gewekt, de maatschappelijke relevantie die studie en beroep uitstralen, de glamour van het beroep, alsmede het carrièreperspectief, de beloningsstructuur en onbekendheid van de betreffende docenten met het klimaat aan universiteit of wetenschappelijke instelling, in het bijzonder met het onderzoek.

Het FOM<sup>1</sup> [1] programma ‘Leraar in Onderzoek’ (LiO) stelt HAVO/VWO docenten natuurkunde in de gelegenheid om een jaar lang, 1 dag in de week, onderzoek uit te voeren bij een aan FOM gelieerde wetenschappelijke instelling. Op deze wijze komen docenten uit het voorgezet middelbaar onderwijs een jaar lang in nauw contact met de academia, nemen nader kennis van de huidige wetenschappelijke wijze van werken, ontwikkelen hun eigen onderzoeksvaardigheden en zullen hierdoor waarschijnlijk bewust en onbewust enthousiasme voor een universitaire studie natuurkunde aan scholieren weten over te brengen. Het onderzoek richt zich, naast een aantal didactische aspecten, vooral op het oplossen van hedendaagse natuurwetenschappelijke vraagstukken.

Tijdens het academische jaar 2008/2009 hebben zes docenten onderzoek uitgevoerd op het gebied van de subatomaire natuurkunde. Dorrieth Pennink, Machiel Vegting en Arjan Vriens zijn werkzaam geweest bij Nikhef [2] in Amsterdam. Teun van Heesch en Sjaak Wolst hebben een jaar lang de HEF groep bij de Radboud Universiteit [3] in Nijmegen bezocht. Frank Poortenga is gedetacheerd geweest bij het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) [4] op de Zernike campus van de Rijks Universiteit Groningen [5].

In het volgende hoofdstuk wordt een korte introductie gegeven m.b.t. de deeltjes en astrodeeltjes fysica. Het kader van het docentenonderzoek wordt toegelicht. In hoofdstuk 3 geven de docenten een uitgebreide beschrijving van hun eigen wetenschappelijk onderzoek. Tenslotte delen de docenten in hoofdstuk 4 hun ervaringen met de lezer, wordt door Frank Poortenga gerapporteerd over een discussie met o.a. vakgenoten in de regio Noord-Nederland en wordt een impressie gegeven van het HiSPARC [6] symposium 2009 (mede georganiseerd door Machiel Vegting)...

---

<sup>1</sup> Het project ‘Leraar in Onderzoek’ is financieel mogelijk gemaakt door de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM).

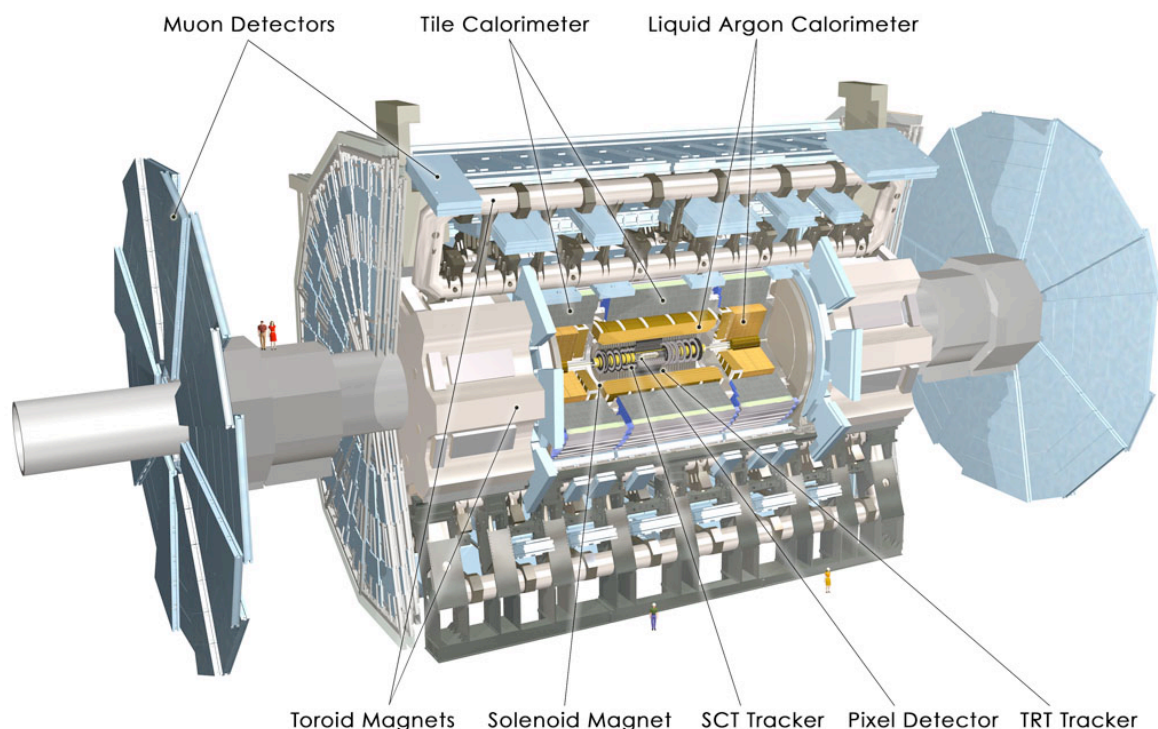


## 2. Deeltjes fysica en astrodeeltjes fysica

### 2.1 Deeltjes fysica

Deeltjesfysica is een vakgebied waarbij met zeer grote detectoren naar zeer kleine deeltjes gekeken wordt (Figuur 2.1). Deeltjesversnellers vormen de basis van dit onderzoeksgebied. Door deeltjes zoals protonen te versnellen, kunnen zij bij een botsing met andere deeltjes veel energie vrijmaken om andere, nieuwe deeltjes te vormen volgens Einstein's  $E=mc^2$ .

Op aarde zijn hiervoor verschillende versnellers gebouwd, in Hamburg bij DESY [7], in Genève bij CERN [8], in Chicago bij Fermilab [9]. In het heelal zijn kosmische versnellers en deze worden steeds vaker gebruikt als welkome aanvulling op wat op aarde mogelijk is. De astrodeeltjesfysica brengt natuur- en sterrenkunde samen.



*Figuur 2.1: De ATLAS deeltjes detector [10] aan de 'Large Hadron Collider' bij het CERN in Genève, Zwitserland, is op jacht naar het Higgs deeltje.*

Nikhef heeft onderzoeksgroepen die zich bezig houden met deze experimenten in de (astro)deeltjesfysica. De theoriegroep rekt mee met de experimentele natuurkundigen. De ondersteunende afdelingen voor de bouw en implementatie van de detectietechnieken en data-analyse ontwikkelen ook steeds nieuwere technieken.

Vandaag weten we dat moleculen uit atomen bestaan die op hun beurt weer deelbaar zijn (ondanks het feit dat atomos 'ondeelbaar' betekent in het Grieks). Protonen, neutronen en elektronen vormen atomen. Elektronen zijn niet meer deelbaar, protonen en neutronen wel; deze bestaan uit een combinatie van verschillende soorten quarks en gluonen. Naast deze bouwstenen van materie hebben deeltjes ook antideeltjes, die antimaterie vormen. Anti-elektronen zijn positronen, en alle quarks hebben

een antideeltje.

Hoe onderzoeken we deze minuscule deeltjes? Om op aarde onderzoek te doen zijn gigantische deeltjesversnellers nodig. Eigenlijk is een versneller een microscoop, en hoe kleiner we willen kijken, hoe groter de microscoop met haar lenzen. In de kosmos vormen zeer grote magnetische velden als het ware een 'natuurlijke' versneller. Voor het astrofysische onderzoek hoeven we daardoor 'alleen' nog de juiste detectoren te bouwen om onderzoek te doen.

## 2.2 Astrodeeltjes fysica

De aarde staat bloot aan een voortdurend bombardement van deeltjes uit het heelal: kosmische straling. Deze deeltjes zijn kleiner dan atomen en ze kunnen extreem veel energie bezitten. Sommige hebben tien miljoen keer meer energie dan deeltjes die met een versneller in het laboratorium zoals CERN bij Geneve kunnen worden gemaakt. Over de oorsprong van deze deeltjes weten we maar weinig.

Kosmische straling kan niet rechtstreeks worden waargenomen op aarde. Als een deeltje de dampkring binnenkomt, botst het met de kern van een atoom daarin en veroorzaakt een zogenaamde deeltjesregen. Deze deeltjesregen bevat miljoenen deeltjes waarvan een deel het aardoppervlak bereikt. Het zijn deze deeltjes die uiteindelijk worden waargenomen (Figuur 2.2).



*Figuur 2.2: Het Auger experiment. Op de voorgrond 1 van de ruim 1600 deeltjesdetectoren. In het gebouw op de achtergrond bevindt zich een fluorescentiedetector waarmee het lichtspoor van een deeltjes-lawine gemeten wordt. Bron: de Auger collaboratie [11].*

Voor de detectie van de geladen deeltjes in een deeltjes-lawine gebruiken we o.a. scintillatoren. Het materiaal waarvan deze detectoren gemaakt zijn, heeft als eigenschap een lichtflits te genereren als er een geladen deeltje doorheen vliegt. De lichtintensiteit van de flits is afhankelijk van de hoeveelheid energie die door het inkomende geladen deeltje in het materiaal wordt afgestaan. De lichtpulsen worden door fotoversterkerbuizen omgezet in elektrische signalen. Deze worden met behulp van een oscilloscoopkaart in een PC opgeslagen.

Het aantal deeltjes dat per tijdseenheid de detector passeert is groot. We zijn alleen geïnteresseerd in die deeltjes die uit dezelfde (grote) lawine komen (en dus van hetzelfde inkomende kosmische deeltje). Daarom wordt gebruik gemaakt van twee scintillatorplaten (ieder  $0.5 \text{ m}^2$ ) met een onderling horizontale afstand van een aantal meter. Alleen als door beide platen tegelijk deeltjes gaan worden ze gemeten. De kans is dan groot dat ze door hetzelfde kosmisch deeltje zijn veroorzaakt. Deeltjes uit dezelfde lawine komen namelijk op bijna precies hetzelfde moment op aarde aan.

Door nu de gegevens van de verschillende meetstations te correleren, kunnen deeltjes-lawines onderzocht worden, die zich over een oppervlak van honderden vierkante kilometer uitstrekken!

Met behulp van de deeltjesdichtheid en hoek van inval kan uiteindelijk de energie van het kosmische deeltje bepaald worden die de lawine veroorzaakt heeft.

## 2.3 Docenten en (astro)deeltjes fysica

Docenten zijn bij instituten ingezet die een leidende positie innemen binnen de experimentele (astro)deeltjes fysica in Nederland: het Kernfysische Versneller Instituut (KVI – Universiteit Groningen), de Radboud Universiteit Nijmegen en het Nikhef in Amsterdam. De docenten maakten afgelopen jaar deel uit van onderzoeksgroepen en hebben kunnen profiteren van een stimulerende academische omgeving. Kernvragen uit de astrodeeltjesfysica zoals:

- Wat is donkere energie?
- Waar bestaat donkere materie uit?
- Wat is kosmische straling en waar komt deze vandaan?
- Hoe is de grootschalige structuur van het heelal ontstaan?

zijn voor zowel de onderzoeker als een groot publiek aansprekend.

Een experiment als HiSPARC (High School Project on Astrophysics Research with Cosmics) [6] maakt gebruik van de belangstelling van de jeugd voor deze vraagstukken. Uiteraard onderzoekt HiSPARC niet alle bovengenoemde vragen, maar het biedt scholen wel de mogelijkheid om deel te nemen aan serieus wetenschappelijk onderzoek in de astrodeeltjesfysica. Het onderwerp van onderzoek betreft kosmische stralen met energieën boven de  $10^{15}$  eV. Het mechanisme waardoor kosmische deeltjes zo een enorme energie krijgen is niet bekend. Daarnaast weet men ook niet precies om wat voor type deeltjes het gaat. Er ligt hier dus een zeer grote wetenschappelijke uitdaging!



## 2.4 Kosmische straling

*'How do cosmic accelerators work and what are they accelerating?'<sup>2</sup>*

Kosmische straling is de deeltjes- en fotonenregen uit het heelal die onophoudelijk inslaat op de aarde. Het verhaal van de ontdekking van kosmische straling voert terug tot het begin van de twintigste eeuw, kort na de ontdekking van radioactieve straling. Theodor Wulf, een Duitse jezuïet, bouwde een elektroscop waarmee de intensiteit van straling nauwkeurig bepaald kon worden. Hij gebruikte het instrument om een theorie te toetsen: de theorie dat natuurlijke achtergrondstraling afkomstig is van radioactieve mineralen in de aardkorst. Metingen in mergelgrotten in Limburg leidden tot een verrassing. Wulf vond een aanzienlijke *afname* in de intensiteit. Hij leidde hieruit af dat de straling van boven moest komen. Wulf's metingen op de top van de Eiffeltoren konden deze hypothese helaas niet bevestigen. In 1911 lukte dit een jonge, Oostenrijkse fysicus wel. In een reeks vluchten met een luchtballon, waarbij hij een hoogte van bijna 6 km bereikte, mat Victor Hess de stralingsintensiteit met een van Wulf's elektrometers. Vanaf ongeveer 4000 m bleek dat met het stijgen van de ballon ook de mate van ionisatie toenam. Hij toonde hiermee aan dat het ioniserende straling betrof afkomstig uit het heelal. Vijfentwintig jaar later kreeg Hess een Nobelprijs voor zijn bevindingen [12].

Hoewel er inmiddels al bijna honderd jaar onderzoek wordt gedaan, zijn de nevelen rondom het fenomeen kosmische straling slechts ten dele opgetrokken...

### 2.4.1 Deeltjes-lawine

Bij de botsing van een hoogenergetisch kosmisch deeltje op atoomkernen in de atmosfeer worden nieuwe deeltjes gemaakt. Deze nieuwe deeltjes bewegen in dezelfde richting als het primaire deeltje; botsen vervolgens waarbij weer nieuwe deeltjes ontstaan. Dit leidt dus tot een kettingreactie waarin een cascade van secundaire en een grote hoeveelheid daarvan afgeleide deeltjes ontstaat. Bij toenemende multipliciteit wordt een pannenkoek gevormd die allengs in omvang toeneemt: de lawine ('shower'). Alle deeltjes, die in zo'n lawine naar beneden komen, bewegen met bijna de lichtsnelheid.

Figuur 2.3 illustreert het ontstaan van zo'n shower. Hadronische deeltjes wisselwerken en produceren nieuwe hadronische deeltjes, waaronder pionen. Sommige van de nieuw gevormde deeltjes zijn instabiel en vallen na enige tijd spontaan uiteen in lichtere deeltjes. Zo ontstaan een groot aantal muonen via pionverval. Een deel van deze muonen vervalt in elektronen. Fotonen en elektronen/positronen kunnen regenereren in een elektromagnetische cascade.

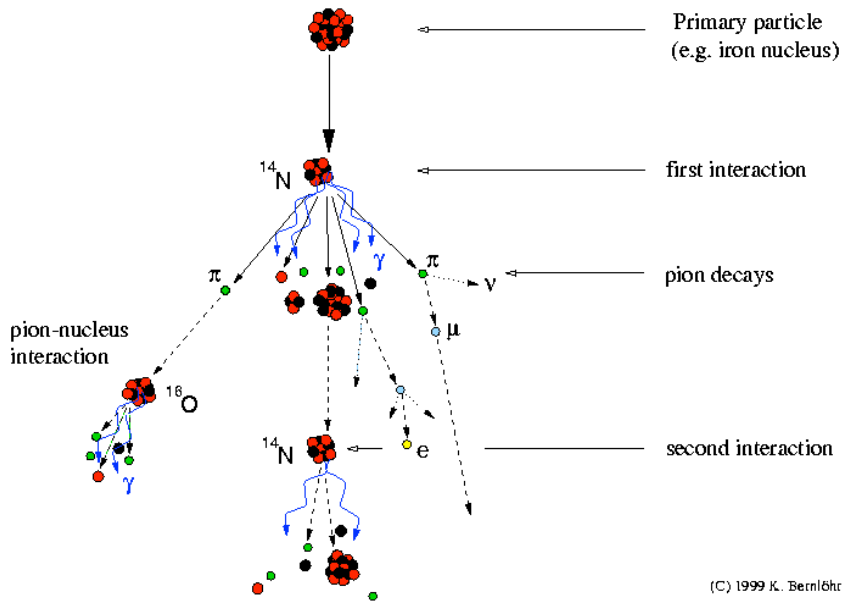
Zolang de energie van de deeltjes groot genoeg is om nieuwe te maken, blijft de lawine groeien door inelastische botsingen. Daarna zijn er alleen nog elastische verstrooiingsprocessen en neemt het aantal deeltjes lager in de atmosfeer af.

Het grootste deel van de energie van het primaire deeltje wordt geabsorbeerd in de atmosfeer. Een beperkt deel bereikt het aardoppervlak. Het zijn vooral muonen die het aardoppervlak bereiken!

---

<sup>2</sup> National Research Council: 'Connecting Quarks with the Cosmos' - Eleven Science Questions for the New Century -. The National Academies Press, Washington D.C.

### Development of cosmic-ray air showers



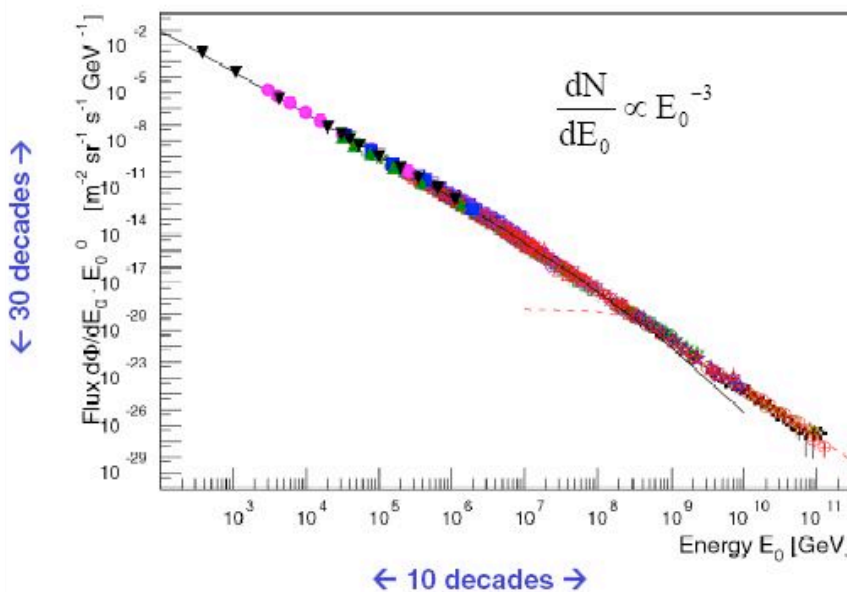
Figuur 2.3: Schematische weergave van de ontwikkeling van een deeltjes-lawine ('cosmic ray air shower').

### 2.4.2 Energie spectrum

De energie van primaire kosmische deeltjes varieert sterk. Figuur 2.4 laat het volledige energiespectrum zien. In het gebied van 1 GeV tot ongeveer 50 EeV voldoet het spectrum aan een machtwet:

$$\frac{dN}{dE} \sim E^\gamma \tag{2.1}$$

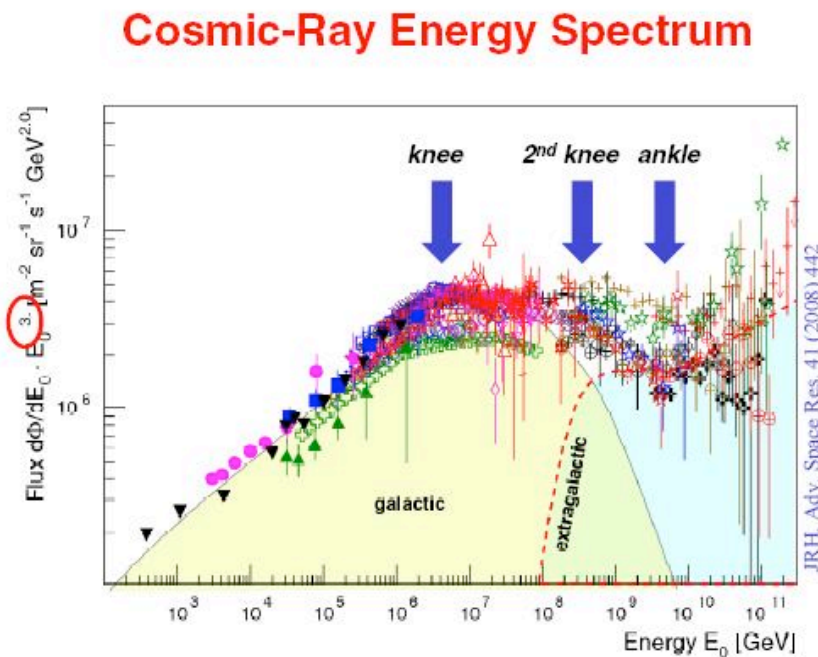
### Cosmic-Ray Energy Spectrum



Figuur 2.4: Energiespectrum van primaire kosmische deeltjes [13].

In dit energiegebied vindt een scherpe daling van de flux plaats met een factor  $10^{30}$ . De helling van het spectrum lijkt tamelijk constant met een waarde van  $y = -2.7$ . Dit suggereert dat er sprake is van een universeel versnellingsmechanisme. Detail analyse leert dat de dimensieloze grootheid  $y$  geen constante is, maar varieert:  $-4 < y < -2.7$ .

In Figuur 2.5 is de deeltjesflux vermenigvuldigd met  $E^3$ . Geringe afwijkingen van  $y$  worden zo beter in beeld gebracht. Inzicht in deze structuur lijkt de sleutel tot het begrijpen van de oorsprong van kosmische straling. Twee gebieden zijn onderwerp van intensief onderzoek: het gebied rond de 'knie' en het gebied rond en voorbij de 'enkel'.



Figuur 2.5: het energiespectrum vermenigvuldigd met  $E^3$  [13].

### 2.4.3 De 'knie'

De knie is het gebied dat ligt net boven een energie hoger van  $4 \times 10^{15}$  eV met een spectrale index  $y \sim -3.1$ . Voor energieën boven de  $4 \times 10^{17}$  eV, wordt het spectrum nog steiler:  $y \sim -3.3$ . Dit noemt men de tweede knie. Aangenomen wordt dat de kniestructuur een weerslag is van de 'rigidity dependent cut-off'. Het galactisch magnetisch veld is bij toenemende energie niet sterk genoeg om kosmische deeltjes te binden. Kosmische deeltjes diffunderen uit het melkwegstelsel, te beginnen met de lichtste (de knie) om vervolgens een steeds grotere fractie te verliezen tot de tweede knie waar zelfs de zwaarste deeltjes voldoende energie hebben om aan het magneetveld te ontsnappen. Deze verklaring wordt bevestigd door metingen waaruit blijkt dat in het kniegebied de gemiddelde massa van kosmische deeltjes toeneemt als functie van de energie.

Hoewel aannemelijk, deze 'rigidity dependent cut-off' is niet boven iedere twijfel verheven. Er zijn nauwelijks data voorhanden in het belangrijke energiegebied tussen  $10^{17}$  en  $10^{19}$  eV, waar de galactische bijdrage aan kosmische straling zou moeten eindigen [14].

#### 2.4.4 De ‘enkel’ en hoger

Voor deeltjes met een energie groter dan  $1-10 \times 10^{18}$  eV wordt het spectrum weer vlakker:  $\gamma$  neemt weer een waarde aan van  $\sim -2.7$ . Men spreekt hier van de ‘enkel’. In dit gebied zou het aandeel van extragalactische straling domineren.

Boven de  $4 \times 10^{19}$  eV is er sprake van een opnieuw steiler wordend spectrum; de spectrale index is hier  $-4$  tot  $-5$ . Dit steiler worden kan worden toegeschreven aan een fenomeen dat de GZK-limiet wordt genoemd. De GZK-limiet is voorspeld door Greisen & Kuzmin en Zatsepin [15]. Zij berekenden dat kosmische deeltjes met een energie groter dan  $5 \times 10^{19}$  eV door wisselwerking met de microgolf achtergrondstraling pionen zouden moeten produceren. Hierdoor verliezen de primaire deeltjes energie tot een niveau wordt bereikt beneden de limiet. Het feit dat de vrije weglengte van kosmische straling beknot wordt door deze interactie leidt tot de volgende conclusie. De kans dat kosmische straling met een energie hoger dan de GZK-limiet de aarde bereikt is verwaarloosbaar, tenzij de bron binnen een straal van ongeveer 50 Mpc ligt. Omdat deeltjes met zulke hoge energieën schaars zijn, is het GZK-effect nog niet experimenteel bewezen. Recent onderzoek (het Auger experiment) wijst wel in die richting.

#### 2.4.5 Detectie van kosmische straling

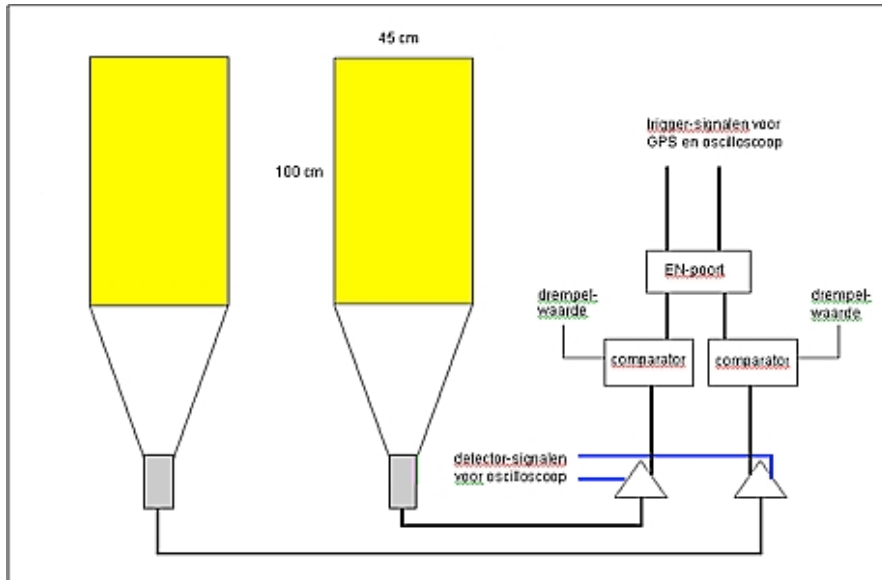
Uit het energiespectrum in Figuur 2.4 blijkt dat het aantal kosmische deeltjes dat de aardatmosfeer binnenkomt (de flux) met toenemende energie extreem sterk afneemt. Van de meest energierijke deeltjes is de flux beperkt tot één deeltje per vierkante kilometer per eeuw. Vanwege deze schaarste is het direct meten (d.w.z. buiten de atmosfeer) van hoogenergetische ( $\geq 1$  PeV) kosmische deeltjes ondoenlijk: meettijd en detectieoppervlak zouden buitensporig lang cq groot moeten zijn. Eind jaren dertig in de vorige eeuw wisten Auger e.a. [16] dit probleem te omzeilen via indirecte metingen. Door uiterst nauwkeurige tijdmetingen wisten ze tijdscoïncidenties vast te stellen van op het aardoppervlak inslaande deeltjes. Zij concludeerden dat deze deeltjes afkomstig moesten zijn van een energierijk primair deeltje. Door deeltjes uit een enkele lawine te observeren is het mogelijk om eigenschappen van het primaire deeltje te bepalen, zoals energie, massa en aankomstrichting. ‘Showerdeeltjes’ die het aardoppervlak bereiken, zoals muonen, elektronen en positronen, kunnen op het aardoppervlak waargenomen worden met behulp van grote grondarrays van detectoren.

HiSPARC [6] is zo’n grondarray van detectoren. Een HiSPARC detector voor kosmische straling bestaat uit een scintillatorplaat, een lichtgeleider en een fotoversterkerbuis (de photomultiplier tube of PMT). Scintillatiemateriaal produceert een lichtflits als er een geladen deeltje doorheen vliegt.

Omdat het onderzoek zich richt op secundaire deeltjes afkomstig van een energierijk kosmisch deeltje zijn dus alleen gelijktijdig doorkomende showerdeeltjes relevant. Een station bestaat daarom uit minimaal twee scintillatorplaten (Figuur 2.6). We spreken van een ‘event’ als in 2 of meer platen op bijna precies hetzelfde moment een signaal gemeten wordt!

Door nu de gegevens van de verschillende meetstations via de gebeurtenissen met hun individuele tijdstempels te correleren, kunnen deeltjes-lawines onderzocht worden die zich over een oppervlak

van honderden vierkante kilometer uitstrekken. Bovendien kan met behulp van de deeltjesdichtheid en hoek van inval uiteindelijk de energie van het primaire kosmische deeltje bepaald worden. Het HiSPARC onderzoek heeft al enkele spectaculaire resultaten opgeleverd, zoals duidelijk wordt uit publicatie in het Nederlands tijdschrift voor Natuurkunde [17] in Figuur 2.7:



Figuur 2.6: Principe schema van een HiSPARC detector met twee scintillatieplaten. De twee platen werken in coïncidentie. Bij een coïncidentie wordt een precisie GPS aangesproken om zo een uniek tijdstempel aan de gebeurtenis toe te kennen.

Metingen aan ultra-hoog energetische kosmische straling

# De eerste resultaten van HiSPARC

De Nijmeegs Scholengemeenschap Groenewoud, het Stedelijk Gymnasium, het Dominicus College, het Kandinsky College, het Montessori College en de Radboud Universiteit Nijmegen (het NAHSA-cluster) hebben in 2003 en 2004 gezamenlijk metingen gedaan aan kosmische straling. Hierbij zijn deeltjes gevonden met energieën van meer dan  $10^{18}$  eV. Dit zijn de hoogste deeltjes-energieën ooit in Nederland gemeten. Deze energie is honderdduizend maal groter dan de hoogst mogelijke energie die we met versnellers in de nabije toekomst op aarde kunnen creëren. C. Timmermans en anderen [7]

ve meentijd van het hele meetnetwerk, en alle mogelijke combinaties van stations.

## COÏNCIDENTIE BEPALING

Indien een deeltjeslawine met de lichtsnelheid naar de aarde komt, wordt het maximale tijdsverschil tussen twee posities op aarde voor het passeren van het front gegeven door  $L/c$ , waarbij  $L$  de afstand tussen de posities is, en  $c$  de lichtsnelheid. In onze opstelling waren maximaal zeven stations aanwezig. Voor ieder mogelijk paar hebben we het aantal coïncidenties en de achtergrond bepaald. Een voorbeeld hiervan is te zien in de linkerhelft van figuur 1.

Figuur 2.7: Wetenschappelijke bijdrage aan het blad van de NNV op basis van analyse van gegevens in de Nijmegen cluster.

## 2.5 Docenten en HiSPARC

Het project 'Leraar in Onderzoek' is op verschillende manieren in te bedden in bestaand deeltjes- en astrodeeltjes onderzoek. Toch is er binnen het Nikhef samenwerkingsverband voor gekozen om projecten te definiëren in het kader van HiSPARC. HiSPARC is een kleinschalig experiment met een klein team van wetenschappers en studenten en met een belangrijk 'outreach' aspect. Er liggen nog een groot aantal zowel technische en experimentele als theoretische uitdagingen. Docenten hebben daarom uitgebreide keuzemogelijkheden een project te definiëren dat aansluit bij hun affiniteit en hun kennis.

Binnen het HiSPARC project komen naast fundamentele natuurkundige vraagstukken, vele aspecten van (astro)deeltjesfysica aan bod. Bovendien is (astro)deeltjesfysica een gebied in de natuurkunde dat sterk tot de verbeelding spreekt van jongeren, wat zeker niet onbelangrijk is in de afweging van docenten om juist daarom mee te werken aan een dergelijk project!



*Figuur 2.8: Leerlingen en technisch onderwijs assistent bij de door hen gebouwde HiSPARC detector op het dak van het Bonhoeffer College [18] in Castricum.*

Binnen HiSPARC vormen middelbare scholen samen met wetenschappelijke instellingen een essentieel onderdeel van het netwerk dat kosmische straling met extreem hoge energie probeert detecteren. Deelname aan HiSPARC biedt dus zowel scholieren als docenten de gelegenheid om aan echt (kleinschalig) wetenschappelijk onderzoek deel te nemen. De resultaten worden daadwerkelijk gebruikt om meer over de mysterieuze en zeldzame hoogenergetische kosmische deeltjes te weten te komen (zie het NTVN artikel in sectie 2.4.5). Niet alleen kunnen scholieren hun deelname aan het experiment gebruiken ter invulling van het profielwerkstuk voor hun eindexamen, de NLT module met straling als onderwerp, zal binnenkort, na een periode van praktijk testen, gecertificeerd worden. Deze module

sluit uitstekend aan bij de natuurkundige onderwerpen die bij HiSPARC van essentieel belang zijn.

Op de daken van de scholen staan door de scholieren zelf gebouwde meentopstellingen welke via het internet verbonden zijn met een centrale computer bij een wetenschappelijke instelling (Figuur 2.8). Zo vormen zij een lokaal netwerk. In Nijmegen worden al sinds 2002 gegevens verzameld en in Amsterdam sinds 2004. Ook in de regio's Leiden, Utrecht, Groningen, Twente en Eindhoven staan HiSPARC detectoren. Het project wordt gecoördineerd vanuit het Nikhef in Amsterdam.

## 2.6 Deelprojecten

De docenten hebben aan een aantal onderzoeksvragen van het HiSPARC project gewerkt. Deze vragen hebben betrekking op de detectoren zelf, waarbij simulaties zijn uitgevoerd en waarbij speciale opstellingen zijn samengebouwd, en op meetresultaten van bestaande opstellingen.

De volgende onderzoeksprojecten zijn uitgevoerd:

1. Er is een opstelling gebouwd en gebruikt om te onderzoeken welke deeltjes (muonen of elektronen) de signalen veroorzaken, die geobserveerd worden met de HiSPARC detectoren. Om deze vraag te beantwoorden werden verschillende detectoren boven elkaar geplaatst met de mogelijkheid om tussen deze detectoren absorberende materialen te plaatsen. Naast het uitvoeren van metingen met deze opstelling zijn ook computer simulaties uitgevoerd om de verkregen gegevens te begrijpen.
2. Met behulp van de gegevens die over een lange periode zijn verzameld met detectoropstellingen, die op scholen of onderzoeksinstituten staan, is onderzocht wat de stabiliteit van het HiSPARC meetsysteem is. Met name de langdurige gemiddelde fluctuaties van de signaalsterkte is onderzocht. Deze fluctuaties kunnen te maken hebben met de luchtdruk, de omgevingstemperatuur, en de leeftijd van de gebruikte opstelling.
3. De meetgegevens van een aantal verschillende meetstations, die relatief dicht bij elkaar staan (onderlinge afstand minder dan 5 km), zijn gebruikt om te onderzoeken of er tijdscoïncidenties zijn gevonden tussen 2 of meer opstellingen. Deze coïncidenties kunnen toevallig zijn of ze kunnen veroorzaakt zijn door één en hetzelfde deeltje, dat op grote hoogte in de atmosfeer een zeer grote lawine aan secundaire deeltjes heeft veroorzaakt. Door deze analyse kan geïnfereerd worden of de klokken van de verschillende meetstations synchroon lopen en kan ook de tijdsresolutie van deze klokken bepaald worden. Als een gebeurtenis door meer dan 2 stations in coïncidentie waargenomen is, kan de aankomstrichting bepaald worden van het primaire kosmische deeltje, dat deze gebeurtenis veroorzaakt kan hebben. De bepaling van deze aankomstrichting is voor 80 gebeurtenissen uitgevoerd.
4. Een van de opstellingen van HiSPARC werd geplaatst tussen de deeltjes detectoren van het Pierre Auger observatorium in Argentinië. Gedurende een periode van meerdere maanden, zijn ongeveer 200 gebeurtenissen geregistreerd met zowel de deeltjes detectoren van dit observatorium als met de HiSPARC opstelling. Er is een analyse uitgevoerd om de geregistreerde signalen van de verschillende detectorsystemen met elkaar te kunnen vergelijken.



Een aantal van deze deelvragen zijn ook zeer geschikt om onderzocht te worden door leerlingen uit het voortgezet onderwijs, die belangstelling hebben voor het toepassen van hun IT-kennis op het uitvoeren van onderzoek in de natuurkunde.

In het volgende hoofdstuk lichten de 'leraren in onderzoek' hun studies toe.



### 3. Verslagen Leraren in Onderzoek

#### 3.1 Analyse data Watergraafsmeercluster



*Figuur 3.1: Dorrith Pennink – Bonhoeffer College Castricum [18] -.*

Dorrith Pennink is sinds 2000 docente natuurkunde/NLT op het Bonhoeffercollege te Castricum. Hiervoor was zij geruime tijd werkzaam als docente biomechanica, natuurkunde en onderzoeksmethodologie op de opleiding fysiotherapie van de Hogeschool Rotterdam & Omstreken.

##### 3.1.1 Onderzoeksoopdracht

In de Watergraafsmeer zijn vijf HiSPARC stations (stationnummers 501 t/m 505) gelegen in een gebied met een straal van een paar honderd meter (Figuur 3.2). Deze detectoren bezitten ieder 4 scintillatieplaten in een sterconfiguratie. In dit onderzoek is een begin gemaakt met de analyse van data van deze stations die zich op relatief korte afstand van elkaar bevinden.



*Figuur 3.2: HiSPARC detectoren 501 t/m 505 in de Watergraafsmeer.*

De doelstelling van het onderzoek is tweeledig:

- Het analyseren van HiSPARC data waarbij onderzoeksvragen aan bod komen waarmee ook leerlingen uit de voeten kunnen.
- Het ontwikkelen van analysetools in de vorm van Pythonscripts [19] waarmee relevante data aan de database onttrokken worden en (geautomatiseerde) grafische presentaties en analytische bewerkingen worden uitgevoerd.

### 3.1.2 Introductie

De volgende onderzoeksvragen komen aan bod:

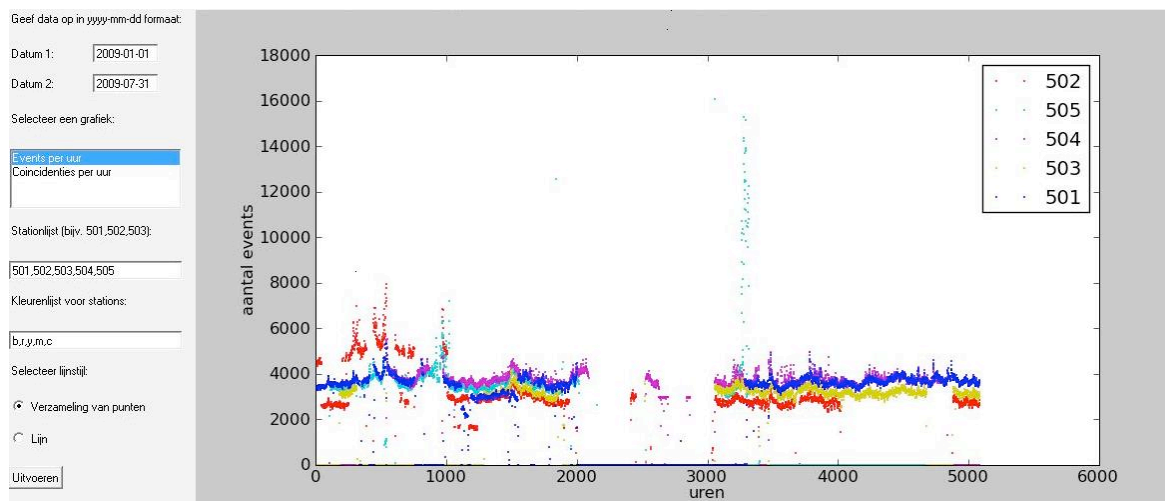
1. Hoe varieert het aantal events per station?
2. Is er sprake van luchtdrukafhankelijke fluctuaties? Hoe kan gecorrigeerd worden voor eventuele luchtdrukvariaties?
3. Hoe verhoudt het aantal waargenomen coïncidenties zich tot het aantal toevallige coïncidenties?
4. Wat is de verhouding tussen het aantal twee- en drievoudige coïncidenties?
5. Wat is het verband tussen aantal niet-toevallige coïncidenties en de afstand tussen stations?

Ter verantwoording van de keuze van dit onderzoek kan het volgende gesteld worden. In het hedendaags fysisch onderzoek, in het bijzonder bij (astro)deeltjes fysica, speelt data-analyse een cruciale rol. Het gaat hierbij om extreem hoge gegevensdichtheden, waarbij het destilleren van relevante data en de interpretatie hiervan behoren tot de grootste uitdagingen voor de onderzoekers.

Het ontwikkelen van adequate analyseprogramma's vervult een sleutelrol in modern onderzoek. Het ontwikkelen van analysescripts vormt ook het zwaartepunt van dit onderzoek.

### 3.1.3 Aantal events per station

Er is een Pythonscript gemaakt <statgui\_v1.py> (Appendix A) waarin – via een graphical user inter



Figuur 3.3: Aantal events/uur over de periode januari - juli 2009.

face (GUI) – een begin- en einddatum en een aantal stationsnummers kunnen worden opgegeven. In een grafiek wordt dan voor ieder station het tijdsverloop van het aantal events per uur weergegeven (Figuur 3.3).

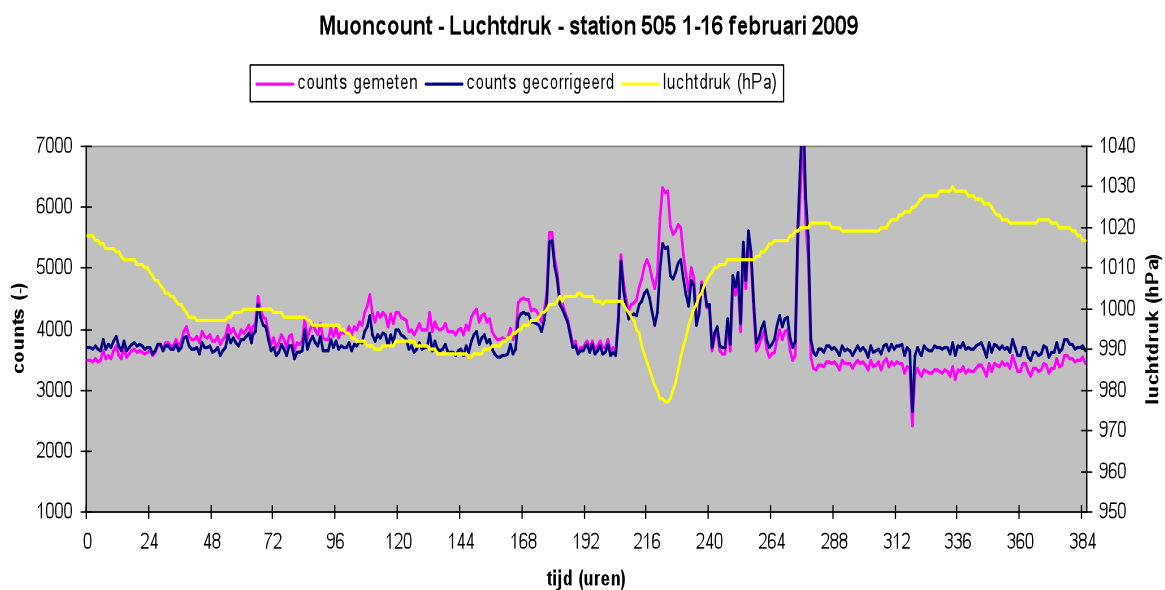
Verder wordt via dit script in een tabel (Tabel 3.1) weergegeven hoeveel uren de query besloeg, het aantal uren dat afzonderlijke stations data registreerden en het gemiddelde aantal events per uur, berekend over de uren dat het aantal events groter dan nul was.

station	# uren	# uren actief	%	<events/uur>
502	5088	2805	55.1	3145
505	5088	1944	38.2	3765
504	5088	3363	66.1	3728
503	5088	2592	50.9	3188
501	5088	3504	68.9	3561

Tabel 3.1: Meettijden van de stations 501 t/m 505.

### 3.1.4 Luchtdrukafhankelijke fluctuaties

In Figuur 3.3 is een trend te zien in de fluctuaties: de schommelingen lopen (gedeeltelijk) synchroon. Het is aannemelijk dat deze synchrone fluctuaties ten dele zijn toe te schrijven aan luchtdrukvariaties. Als wordt gecorrigeerd voor drukvariaties vertonen de curven inderdaad een gelijkmatiger verloop (Figuur 3.4).



Figuur 3.4: Muoncount – Luchtdruk – station 505, 1 - 16 februari 2009.

De methode van corrigeren voor luchtdruk(p)-verschillen is afkomstig van de Nagoya groep [20]. De

gebruikte formule is:

$$1 + c \cdot \frac{p - 1000}{1000} \quad (3.1)$$

Coëfficiënt  $c$  kan worden bepaald aan de hand van de data. Het beste resultaat wordt verkregen met een  $c = 5.1$ .

### 3.1.5 Waargenomen en toevallige coïncidenties

Hoe verhoudt het aantal waargenomen coïncidenties zich tot het aantal toevallige coïncidenties? Een coïncidentie wordt als volgt gedefinieerd. Als binnen een vooraf gedefinieerd tijdsinterval, het coïncidentiewindow  $\Delta$ , in twee of meer verschillende stations een gebeurtenis wordt gedetecteerd, ofwel als  $\Delta t < \Delta$ , dan is er sprake van een coïncidentie. Er is gekozen voor een coïncidentiewindow  $\Delta$  van 200  $\mu s$ . Wanneer een deeltjes-lawine met een snelheid die de lichtsnelheid benadert het aardoppervlak bereikt, wordt het maximale tijdsverschil tussen twee stations voor het passeren van het front gegeven door  $d/c$ , waarbij  $d$  de afstand tussen de stations is en  $c$  de lichtsnelheid.

'Schijnbare' coïncidenties tussen stations waarvoor geldt dat het tijdsverschil tussen de stations ( $\Delta t$ ) groter is dan dit maximale tijdsverschil, ofwel  $\Delta t > d/c$ , krijgen het label 'too late' en worden niet als coïncidentie erkend. Coïncidenties kunnen een aanwijzing zijn voor een deeltjes-lawine, er kan ook sprake zijn van een toevallige samenloop van gebeurtenissen. Het aantal toevallig coïncidenties ( $N$ ) voor een station is te berekenen met:

$$N_{toeval} = \sum_{k=1}^{n_k} 2 \cdot f_A \cdot f_k \cdot \Delta \cdot T \quad (3.2)$$

en

$$\begin{aligned} f_A &= \text{gemiddelde aantal events/uur (detector } A, \text{ gemeten over 24 uur)} \\ f_k &= \text{gemiddelde aantal events/uur (detector } k, \text{ gemeten over 24 uur)} \\ \Delta &= \text{coïncidentie-interval (} 200 \mu s = 200 \cdot 10^{-6} / 3600 = 5,556 \cdot 10^{-8} \text{ uur)} \\ T &= \text{tijdsinterval waarin coïncidenties gemeten worden (1 uur)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

	24-02-09	25-02-09	26-02-09	27-02-09	28-02-09	gemiddeld
501	4.19	4.25	4.48	4.65	4.57	4.4
502	4.14	4.15	4.44	4.49	4.46	4.3
503	4.32	4.35	4.59	4.72	4.7	4.5
504	4.88	4.91	5.23	5.36	5.28	5.1
505	4.6	4.63	4.94	5.08	5.16	4.9

Tabel 3.2: Toevallige coïncidenties tussen 2 stations in het cluster 501 t/m 505.

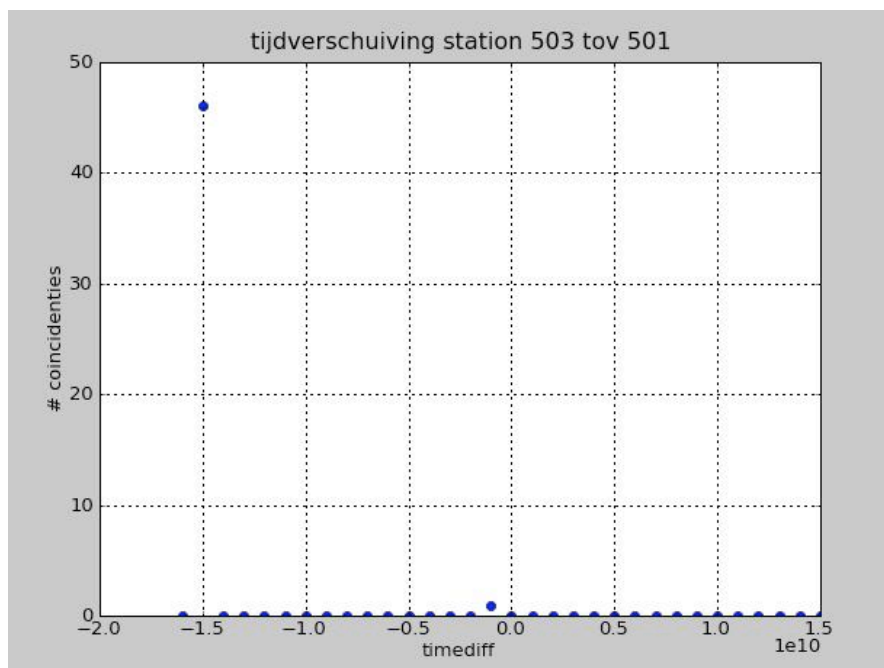
De meting wordt uitgevoerd voor de 5 stations rond het NIKHEF (script: <statistiek\_v2.py>, zie Appendix A). De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.2.

Met behulp van het eveneens in Appendix A opgenomen Pythonscript <find\_coincidences\_v3.py>, een aangepaste versie van het door Master student Lars Beemster ontwikkelde algoritme <find\_coincidences.py>, kan het aantal coïncidenties tussen twee of meer stations bepaald worden. In Tabel 3.3 staan het gemiddelde aantal waargenomen coïncidenties per uur per station (registratie op 24 februari 2009) en het gemiddelde aantal toevallige coïncidenties (Tabel 3.2).

Station	501	502	503	504	505
<waargenomen>	108	98	5	27	33
Toeval. coïnc.	4	4	5	5	5

Tabel 3.3: Waargenomen en toevallige coïncidenties tussen 2 of meer stations.

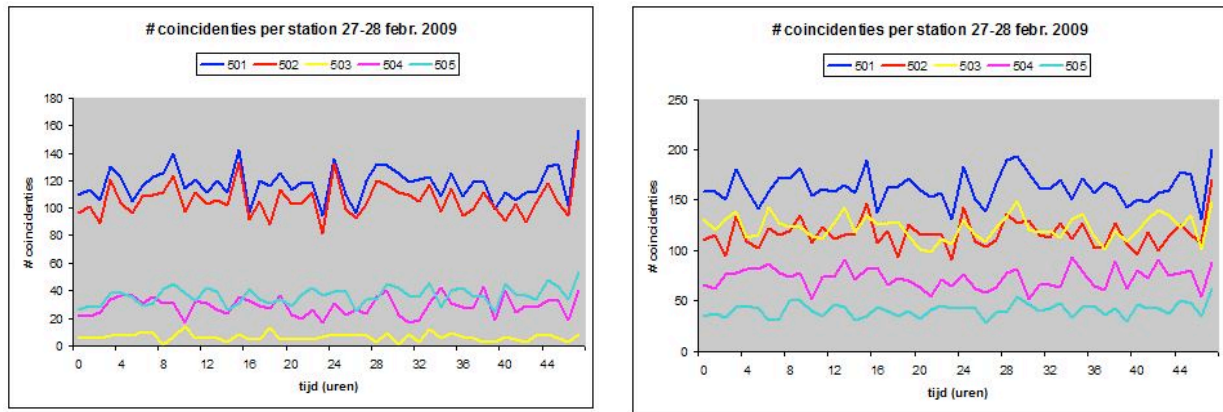
Het aantal waargenomen coïncidenties in station 503 wijkt niet significant af van het aantal toevallige coïncidenties. Kennelijk worden er geen 'kosmische' coïncidenties geregistreerd. Nadere beschouwing laat zien dat dit samenhangt met een afwijkende tijdsregistratie. Station 503 registreert UTC-tijden in tegenstelling tot GPS-tijden voor de andere stations. Het tijdsverschil tussen beide registratiemethoden bedraagt (in 2009) exact 15 seconden (Figuur 3.5). Als wordt gecorrigeerd voor deze afwijking blijkt het aantal coïncidenties van station 503 meer in de lijn der verwachting te liggen.



Figuur 3.5: Tijdverschuiving van station 503 t.o.v. station 501.

Na correctie – conform het tijdsverschil tussen UTC-tijd en GPS-tijd – kan nu het aantal coïncidenties tussen alle stations per tijdseenheid bepaald worden. In Figuur 3.6 worden links de niet-gecorrigeerde coïncidenties in de periode 27-28 februari 2009 gegeven. In de figuur rechts is de toename in het aantal coïncidenties nu duidelijk zichtbaar.





Figuur 3.6: Aantal coïncidenties per station; voor (links) en na (rechts) tijdcorrectie op het tijdstempel van station 503.

### 3.1.6 Verhouding tussen twee- en drievoudige coïncidenties

Met de gegevens in Tabel 3.4 kan het aantal twee- en drievoudige coïncidenties voor de vijf stations vergeleken worden.

24-2-2009	tweevoudige		drievoudige		totaal # coïncidenties		
station		+ tijdcorr. 503	+ toeval corr		+ tijdcorr. 503		+ tijdcorr. 503
501	93	119	115	12	26	108	152
502	83	83	79	12	19	98	108
503	0	83	78	4	23	5	112
504	15	44	39	7	14	27	65
505	20	21	16	11	12	33	38

Tabel 3.4: Waargenomen en toevallige coïncidenties tussen 2 of meer stations.

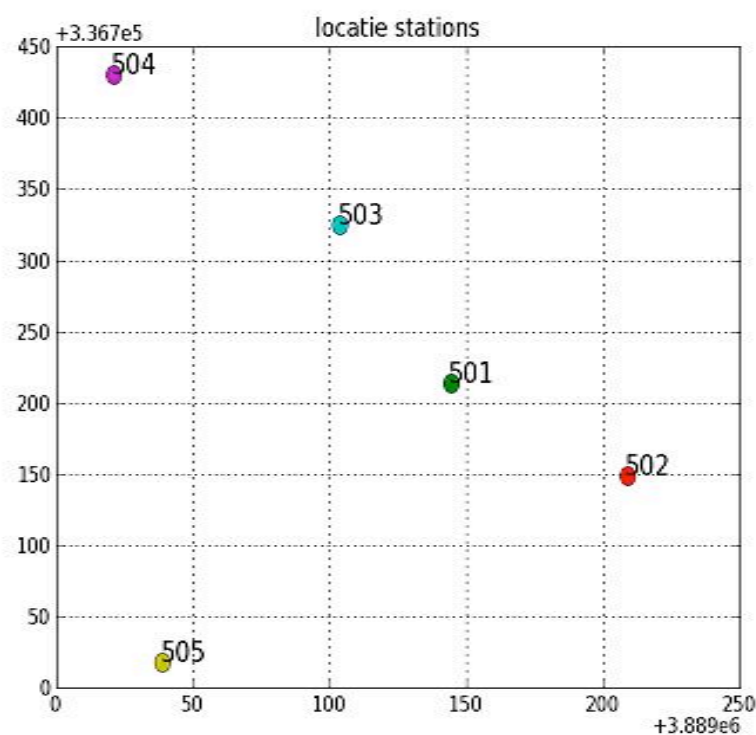
Verder blijkt dat het totaal aantal coïncidenties groter is dan de som van het aantal twee- en drievoudige coïncidenties. Dit impliceert dat er ook coïncidenties zijn met meer dan drie stations. Op waargenomen tweevoudige coïncidenties is een toevalscorrectie toegepast. Bij drievoudige coïncidenties is dit niet nodig: het aantal toevallige drievoudige coïncidenties, te berekenen met

$$N = \sum_{j,k}^{n_{jk}} 6 \cdot f_A \cdot f_j \cdot f_k \cdot \Delta^2 \cdot T \quad (3.4)$$

is (binnen een tijdsbestek van 1 uur) kleiner dan 1. Verwacht mag worden dat het relatieve aantal drievoudige coïncidenties toeneemt naarmate het aantal coïncidenties afneemt. De data in Tabel 3.4 bevestigen dit.

### 3.1.7 Coïncidenties en afstanden stations

Wat is het verband tussen het aantal niet-toevallige coïncidenties en de afstanden tussen stations? Uit het voorgaande is gebleken dat het aantal coïncidenties, waar de verschillende stations bij betrokken zijn, varieert. De verwachting is dat in de frequentie de relatieve ligging van de verschillende stations (Figuur 3.2) tot uitdrukking komt: het meest centrale station, dat wil zeggen het station waar de cumulatieve afstand tot de andere stations het kleinst is zal het grootste aantal coïncidenties laten zien en vice versa (Figuur 3.7). Bij de dichtstbijzijnde stations domineren tweevoudige coïncidenties die het gevolg zijn van kleine lawines. Dit aantal neemt af als de onderlinge afstand tussen stations groter wordt.



Figuur 3.7: Globale posities van de stations zijn bepaald a.d.h.v. de GPS coördinaten.

Het Pythonscript <find\_coincidences\_locatie.py> heeft als input de stationslijst en de GPS-coördinaten (volgens WGS84) van de verschillende stations en berekent/levert de volgende informatie:

station	breedte	lengte	hoogte	x	y	z
501	52.355934	4.951138	56.64	3889144	336914	5027134
502	52.355279	4.950100	58.15	3889209	336849	5027091
503	52.35619	4.952814	43.0	3889104	337025	5027141
504	52.357024	4.95445	43.0	3889021	337130	5027198
505	52.357223	4.94841	43.0	3889039	336719	5027211

Tabel 3.5: Detectorposities (GPS) omgerekend naar cartesische coördinaten.

- Conversie naar cartesische xyz-coördinaten van de stations (Tabel 3.5).
- Grafische weergave van de posities in het x-y vlak.
- Onderlinge afstand tussen stations volgens  $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$ .
- Voor ieder station de 'cumulatieve' afstand ten opzichte van de andere stations.

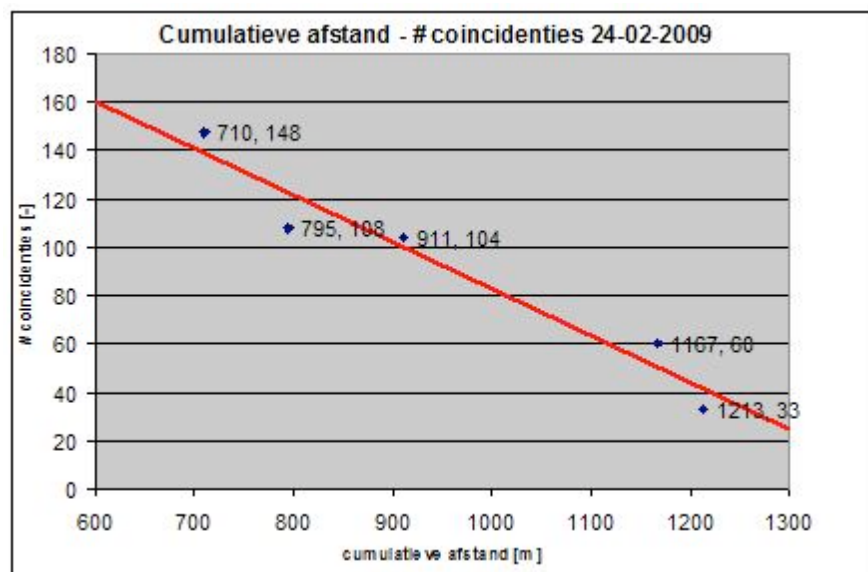
De in Tabel 3.5 weergegeven GPS-coördinaten in rood, zijn onnauwkeurig en moeten nog aangepast worden. Het aantal toevallige en werkelijke coïncidenties kan nu tegen de cumulatieve afstand uitgezet worden (Tabel 3.6).

station	501	502	503	504	505
geobserveerde coïncidenties	152	108	112	65	38
toevallige coïncidenties	4	4	5	5	5
coïncidenties	148	104	107	60	33
cumulatieve afstand	710	911	795	1167	1213

Tabel 3.6: Het totale aantal coïncidenties vermindert met het aantal toevallige coïncidenties levert een schatting van het werkelijke aantal coïncidenties als functie van de cumulatieve afstand tussen de stations.

Het aantal coïncidenties en de cumulatieve afstand zijn in Figuur 3.8 grafisch weergegeven. De data bevestigen de hypothese. Voor nabijgelegen stations geldt dat het aantal coïncidenties afneemt met toenemende cumulatieve afstand. Bij de dichtstbijzijnde stations domineren tweevoudige coïncidenties die het gevolg zijn van kleine showers. De dominantie van tweevoudige coïncidenties neemt af naarmate afstanden groter worden: grotere afstanden betekent grotere showers, met dus een groter aandeel drievoudige coïncidenties.

stations	afstand [m]
501_502	101.6
501_503	118.5
501_504	256.5
501_505	235.2
502_503	211.4
502_504	354.6
502_505	245.5
503_504	145.0
503_505	321.3
504_505	412.1



Figuur 3.8: Afstanden tussen stations (links) en de cumulatieve afstanden uitgezet tegen het aantal coïncidenties (rechts).

### 3.1.8 Conclusie

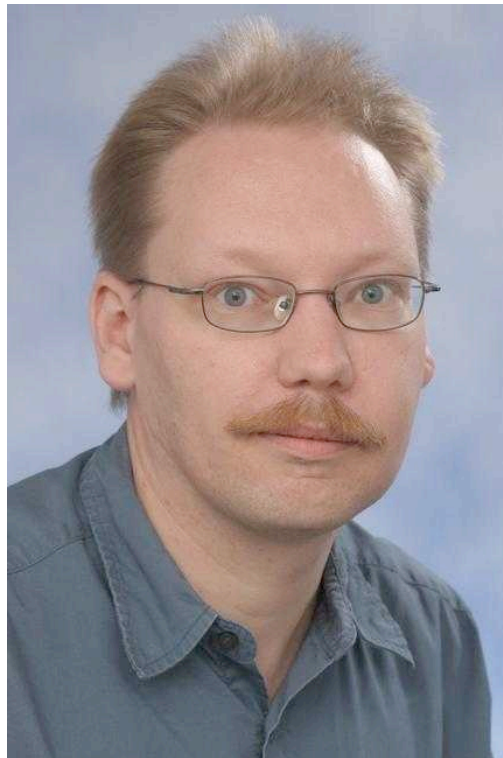
Het ontwikkelen van analyse-tools vergt een lange adem, vooral als wordt begonnen met een marginale, tamelijk gedateerde programmeerervaring! Echter, met het ontwikkelen van relatief eenvoudige tools is het mogelijk om voor een cluster van stations diverse onderzoeksvragen te beantwoorden.

Uniformiteit en ijking van de tijdsregistratie kan gecontroleerd worden door van nabijgelegen stations het aantal geregistreerde coïncidenties te vergelijken met het aantal toevallig coïncidenties.

Door een eenvoudige, empirische correctieformule toe te passen, kan gecorrigeerd worden voor luchtdrukvariaties. Hiermee wordt het eenvoudiger om andere van invloed zijnde factoren aan onderzoek te onderwerpen. Voor HiSPARC-opstellingen in de Watergraafsmeer lijkt coëfficiënt 'c' in de buurt van de 5 te liggen.

Voor nabijgelegen stations geldt dat het relatieve aantal drievoudige coïncidenties toeneemt naarmate het totaal aantal waargenomen coïncidenties kleiner is. Voor nabijgelegen stations geldt ook dat het aantal coïncidenties toeneemt met afnemende cumulatieve afstand.

## 3.2 Simulatie en metingen van deeltjesrespons



*Figuur 3.9: Arjan Vriens – Oostvaarders College Almere [21] -.*

Arjan Vriens is sinds 1996 werkzaam in het voortgezet onderwijs. Sinds 2000 is Arjan verbonden aan het Oostvaarders College te Almere als docent natuurkunde, ANW en NL&T. Naast het docentschap is Arjan coördinator en in-house trainer voor eJournals, een website die gebruikt wordt voor internationale projecten.

### 3.2.1 Onderzoeksopdracht

De onderzoeksopdracht van Machiel Vegting en Arjan Vriens bestaat uit twee delen. De eerste vraag is wat het effect is als er afschermingsmateriaal (zoals bijv. lood) boven de scintillator geplaatst wordt. De tweede vraag is wat de oorsprong is van pulsen met relatief kleine amplitude.

Machiel Vegting heeft zich beziggehouden met het experimentele gedeelte (zie sectie 3.5) en Arjan Vriens met simulaties van de opstelling.

### 3.2.2 Introductie

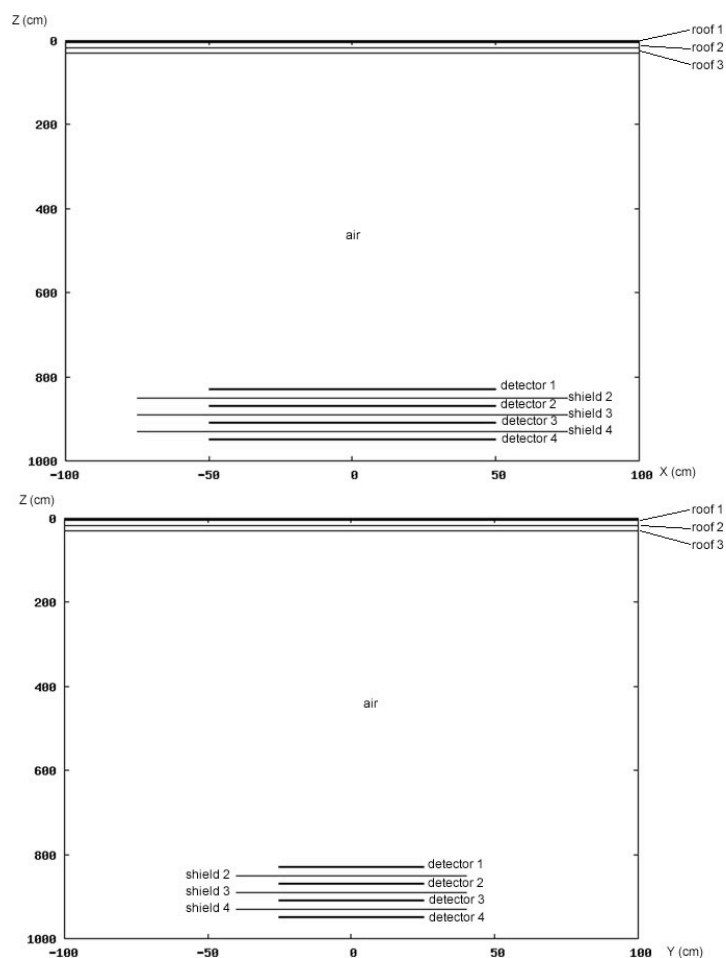
In de werkplaats van het Nikhef hebben Machiel Vegting en Arjan Vriens een opstelling gebouwd bestaande uit vier boven elkaar opgestelde HiSPARC-detectoren. Tussen deze detectoren kan lood geplaatst worden. Het doel van deze opstelling is onder andere nagaan of er naast muonen ook elektronen of andere deeltjes gemeten worden.

Om te weten of er wat gemeten kan worden, in verband met de afmetingen van het dak, en wat er dan gemeten wordt, zijn er simulaties uitgevoerd met behulp van Fluka [22]. Hierbij is aangenomen dat er muonen van bovenaf, door het dak van de werkplaats heen, de detectoren bereiken. Het model en de

resultaten hiervan staan hieronder beschreven. De resultaten van de modelberekeningen en de metingen van de opstelling in de werkplaats moeten nog naast elkaar gelegd worden.

### 3.2.3 Fluka model voor de opstelling in de werkplaats

Voor het simuleren van de werkplaatsopstelling is gebruik gemaakt van Fluka versie 2008.3.7. Als user interface is gebruik gemaakt van Flair [23]. Flair is een 'grafische' user interface waarbij je eenvoudig dingen toevoegt aan het model of wijzigt in het model zonder dat er invoerelementen vergeten worden. Verder heeft Flair het voordeel dat er snel en gemakkelijk een grafische weergave van de resultaten te maken is.



*Figuur 3.10: De geometrie van de opstelling. De verticale richting is positief naar beneden toe.*

*De bovenste afbeelding is het x-z vlak in het model en de onderste het y-z vlak.*

In het model is rekening gehouden met de plaats waar de opstelling staat. De opstelling staat in een hoge ruimte en een gasbetonnen dak (roof 3) van ongeveer 12 cm met daarboven 12 cm isolatie (roof 2) en tussen de 2 tot 5 cm cement (roof 1). De dikte van de cementlaag hangt van de plaats op het dak af. Dit in verband met het afschot van het dak. In het model is gebruik gemaakt van een laagdikte van 3 cm. Onder het dak is een aantal meters lucht en dan de opstelling. De scintillatorplaten liggen op een afstand van ongeveer 40 cm van elkaar op een multiplex plaat van 18 mm dikte. Tussen de platen is ruimte om loden platen op multiplexplaten van 18 mm weg te leggen. De afstand van het lood

tot de scintillatorplaten is 20 cm. Boven de bovenste scintillatorplaat is geen lood aanwezig. Het voordeel voor het model hiervan is dat de simulaties voor de verschillende diktes lood bij de bovenste scintillatorplaat bij dezelfde energie dezelfde resultaten op hoort te leveren.

Bij de opstelling zelf zijn de bovenste 2 platen  $90^\circ$  gedraaid ten opzichte van de 2 onderste platen en ook ten opzichte van elkaar verschoven. Dit is gedaan om de event-rate omlaag te brengen. Omdat dit in het model geen probleem is, is er geen rekening mee gehouden. Zie Figuur 3.10 voor de zijaanzichten van de in het model gebruikte geometrie.

De scintillator (detect 1 t/m detect 4) is in het model een plaat van  $100\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  van polyvinyltolueen. De scintillator is omgeven door een aluminiumfolie van 0,5 mm dikte. Voor de loden afscherming (shield 2 t/m shield 4) is een plaat lood van  $150\text{ cm} \times 80\text{ cm}$  met een dikte van 0 mm, 2 mm en 4 mm genomen. De multiplexondersteuning van zowel het scintillatiemateriaal als de loden afscherming is in het model niet meegenomen. Zowel de scintillatorplaten als de afschermingplaten zijn gecentreerd rond de z-as.

De muonenbundel komt van boven af de ruimte binnen vanaf een hoogte van 103 cm boven het dak, op een oppervlak van  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  gecentreerd rond de z-as loodrecht op het dak van de werkplaats. De muonenbundel wordt gekarakteriseerd door de energie van de bundel in GeV. De impulsverspreiding van de bundel is 0 GeV/c met een vlakke verdeling. De bundeldivergentie is 0,1 mrad met een Gaussische verdeling. Bij het doorrekenen van het model is in elke scintillator gekeken hoeveel energie er in de scintillator afgegeven werd en ook waar die energie in de scintillator afgegeven werd. Hiervoor is de methode USBIN, een methode om de energieverdeling in een regelmatig rooster te scoren, gebruikt met een roosterafmeting van  $120\text{ cm} \times 70\text{ cm}$  gecentreerd rond de z-as. De scintillator past hier netjes in met aan alle kanten 10 cm ruimte. Het gebied waarin de energieafgifte bekeken wordt is met opzet groter genomen dan de scintillatorplaat. Hierdoor is beter te zien of de bundel van  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  buiten de scintillator gaat vallen.

Verder is voor elke scintillator en het dak gekeken hoeveel deeltjes er door heen gegaan zijn, dit onderverdeeld naar elektronen, positieve muonen en totaal aantal deeltjes. Hiervoor is de methode USRTRACK, een methode die het aantal deeltjes dat per seconde de detector treft telt, toegepast. Het energiebereik is hierbij onderverdeeld in 100 intervallen, zodat je ook een idee kan krijgen met welke energie de verschillende deeltjes door de scintillator en het dak zijn gegaan. Uit de resultaten van de USRTRACK is dan de verhouding tussen het aantal elektronen en het aantal muonen bij een bepaalde beginenergie van de muonen te bepalen. Het toegepaste model wordt verder in Appendix B toegelicht.

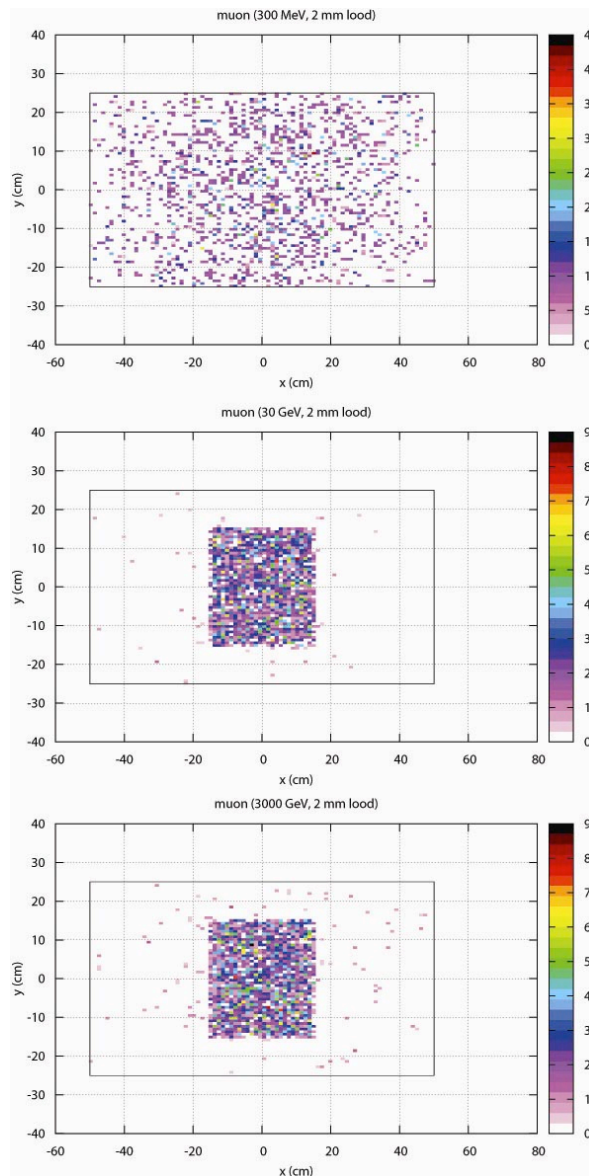
### **3.2.4 Ruimtelijke spreiding deeltjes; energie**

In Figuur 3.11 zijn voorbeelden gegeven voor de ruimtelijke spreiding van de gedeponeerde energie in de bovenste detector (detector 1) bij drie verschillende energieën van de primaire muonenbundel. De rechthoek in de figuur is het gebied waar de detector zich bevindt.

De primaire bundel heeft in het begin een afmeting van  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ . Bij de energieën van 30 GeV



en 3000 GeV is te zien dat de bijna alle energie in een gebied van 30 cm  $\times$  30 cm terecht komt. Bij de energie van 0,3 GeV is te zien dat de energie in een veel groter gebied gedeponereerd wordt dan de primaire bundel beslaat.

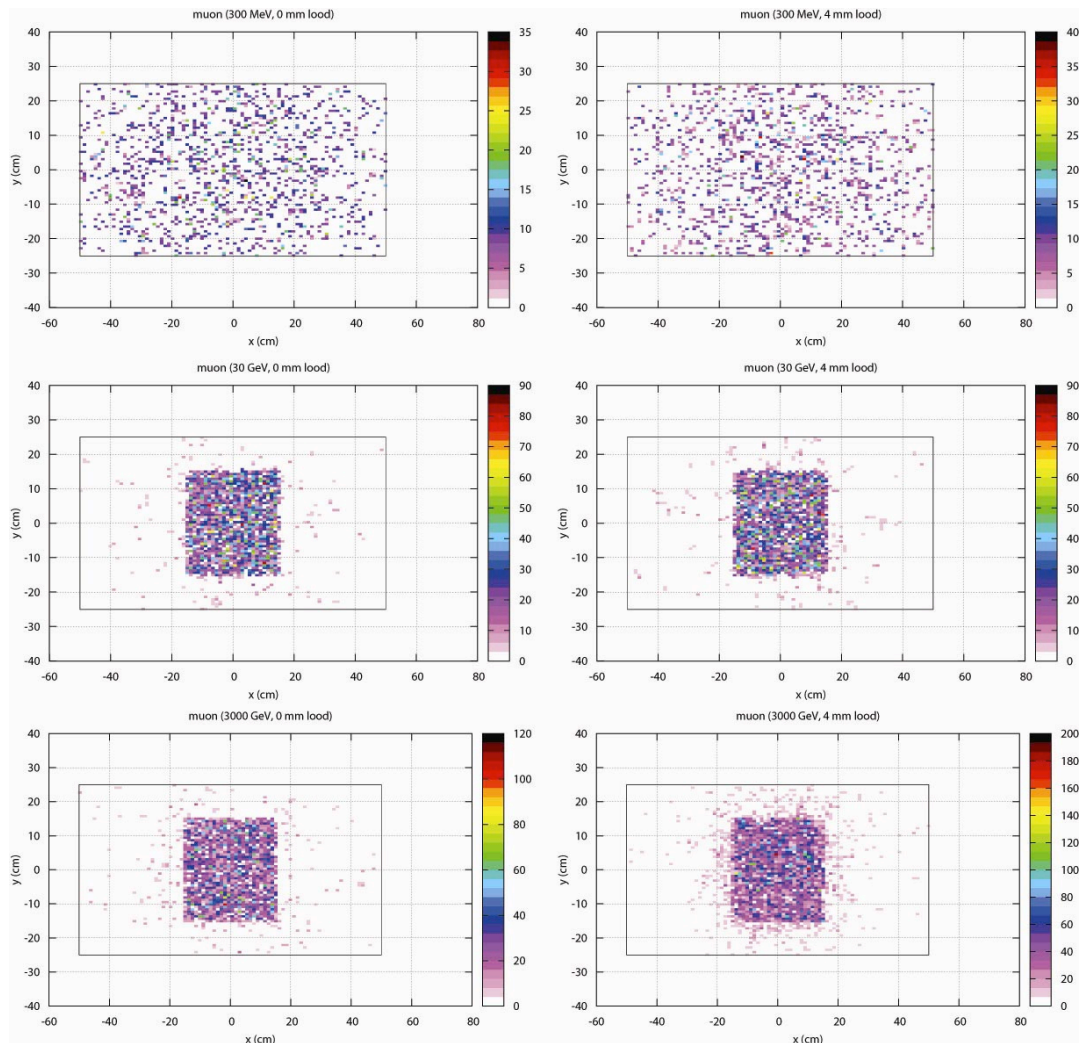


*Figuur 3.11: De invloed van de primaire bundelenergie op de ruimtelijke spreiding van de bundel bij detector 1 voor bundelenergieën van 0,3 GeV, 30 GeV en 3000 GeV, bij een looddikte van 2 mm tussen detectoren 2 t/m 4. De primaire bundel heeft een afmeting van 30 cm  $\times$  30 cm. De rechthoek in de figuur is de positie van de detector. Voor de gebruikte geometrie zie Figuur 3.10.*

### 3.2.5 Ruimtelijke spreiding deeltjes: lood

In Figuur 3.12 is de invloed van het lood op de spreiding van de deeltjes bundel voor de onderste detector (detector 4) te zien. De primaire bundel heeft in het begin een afmeting van 30 cm  $\times$  30 cm. In de linker kolom staat de gedeponereerde energie in de detector bij energieën van 0,3 GeV, 30 GeV en 3000 GeV op het moment dat er tussen de detectoren geen lood aanwezig is. In de rechterkolom staat

de gedeponeerde energie in de detector bij energieën van 0,3 GeV, 30 GeV en 3000 GeV op het moment dat er tussen de detectoren 4 mm lood aanwezig is. Dit betekent dat er dan boven detector 4 in totaal  $3 \times 4 = 12$  mm lood aanwezig is.



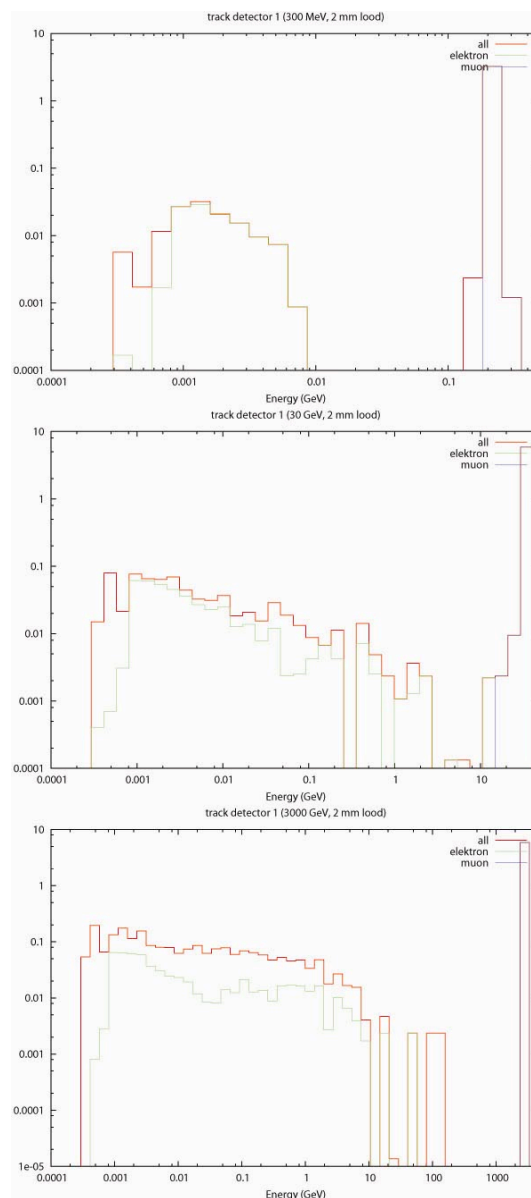
*Figuur 3.12: De invloed van de hoeveelheid lood boven de detector op de ruimtelijke spreiding van de bundel bij detector 4 voor bundelenergieën van 0,3 GeV, 30 GeV en 3000 GeV. De aangegeven looddikte is de dikte per loodafscherming. De primaire bundel had een afmeting van 30 m  $\times$  30 cm. De rechthoek in de figuur is de positie van de detector. Voor de gebruikte geometrie zie Figuur 3.10.*

Bij de energie van 0,3 GeV is er geen direct verschil te zien in de spreiding bij verschillende looddiktes. Het totaal aantal deeltjes bij deze energie is ook niet sterk afhankelijk van de looddikte boven de detector. Bij een energie van 30 GeV is de bundelgrens minder scherp bij 4 mm lood dan bij 0 mm lood. Het aantal deeltjes bij deze energie is bij 4 mm lood ongeveer  $1,6 \times$  hoger dan bij 0 mm lood. Dit verschil wordt veroorzaakt door de secundair geproduceerde deeltjes. Bij een energie van 3000 GeV is duidelijk te zien dat de bundelgrens van 30 cm  $\times$  30 cm van de primaire bundel bij een looddikte van 4 mm veel diffuser is dan bij een looddikte van 0 mm. Wel valt op dat de meeste deeltjes die buiten de bundelgrens vallen in een gebied van ongeveer 10 cm van de bundel terecht komen. Het totaal aantal

deeltjes bij de energie van 3000 GeV is bij 4 mm lood ongeveer  $6,6 \times$  zo hoog als bij een looddikte van 0 mm.

### 3.2.6 Deeltjes aantallen: energieafhankelijkheid

In Figuur 3.13 zijn voorbeelden gegeven voor de resultaten van de simulaties voor de bovenste detector (detector 1) bij energieën van 0,3 GeV, 30 GeV en 3000 GeV en een looddikte van 2 mm tussen de detectoren. De donkerblauwe lijn geeft het aantal muonen aan, de groene lijn het aantal elektronen en de rode lijn het totaal aantal deeltjes in het interval. Zowel de energie (horizontale as) als het deeltjesaantal (verticale as) zijn logaritmisch uitgezet.



*Figuur 3.13: Voorbeeld van de energieafhankelijkheid van de deeltjestrack voor detector 1 voor een primaire bundelenergie van 0,3 GeV, 30 GeV en 3000 GeV resp. Op de horizontale as staat de energie van de deeltjes in GeV en op de verticale as de relatieve hoeveelheid.*

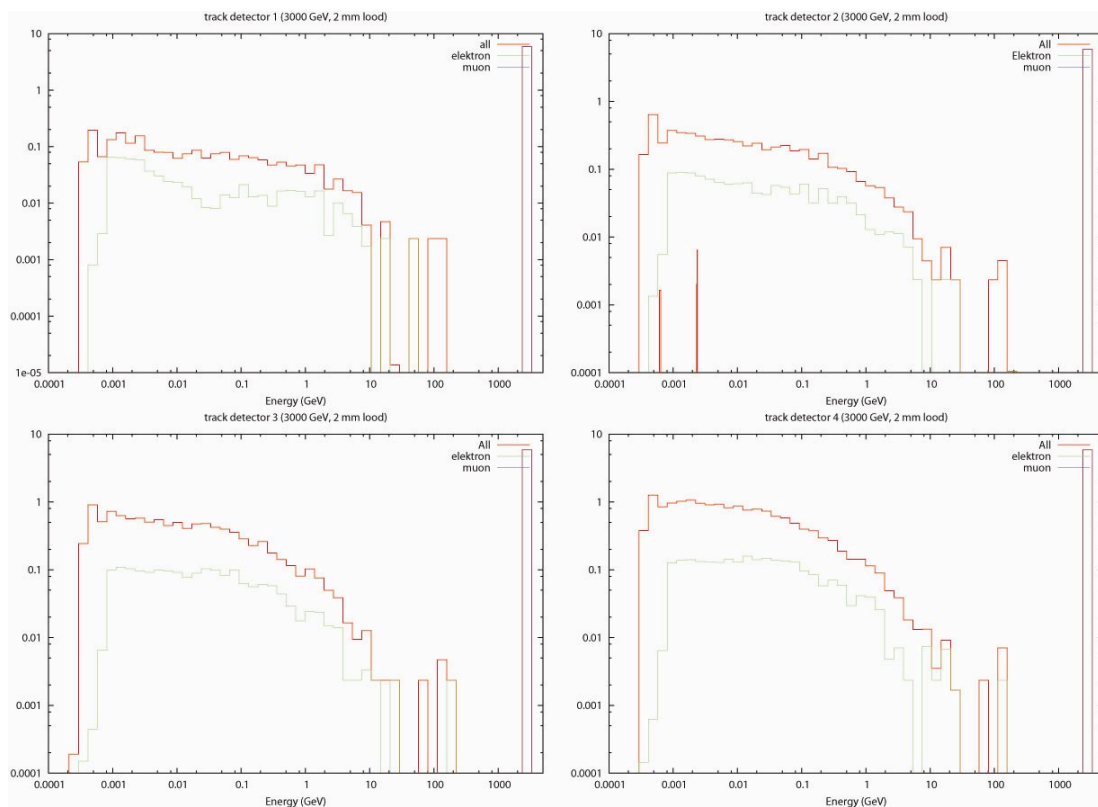
Het is duidelijk te zien dat er naast de secundair geproduceerde elektronen ook nog andere deeltjes

geproduceerd worden. Hierbij valt o.a. te denken aan fotonen. Ongeacht de energie van het primaire deeltje ligt de ondergrens voor de secundaire deeltjes bij ongeveer 0,4 MeV.

Uit de simulaties is op te maken dat het aantal secundair geproduceerde elektronen voor een energie van 30 GeV en 3000 GeV bij de bovenste detector een maximum kent bij een energie van 1 MeV. Verder is op te maken dat het aantal secundaire elektronen, maar ook de andere secundaire deeltjes, per energie-interval, niet constant is bij een bepaalde energie van de primaire muonen.

### 3.2.7 Deeltjes aantallen: invloed lood

In Figuur 3.14 zijn de resultaten voor de modelberekeningen bij een energie van 3000 GeV en een looddikte van 2 mm tussen de detectoren weergegeven. Ook bij deze afbeeldingen geeft de donkerblauwe lijn het aantal muonen, de groene lijn het aantal elektronen en de rode lijn het totaal aantal deeltjes in het interval aan. Zowel de energie (horizontale as) als het deeltjesaantal (verticale as) zijn logaritmisch uitgezet.



*Figuur 3.14: Voorbeeld van de invloed van lood op de deeltjestrack voor de detectoren 1 t/m 4 bij een primaire bundelenergie van 3000 GeV en een looddikte van 2 mm tussen de detectoren. Op de horizontale as staat de energie van de deeltjes in GeV en op de verticale as de relatieve hoeveelheid. Voor de gebruikte geometrie zie Figuur 3.10.*

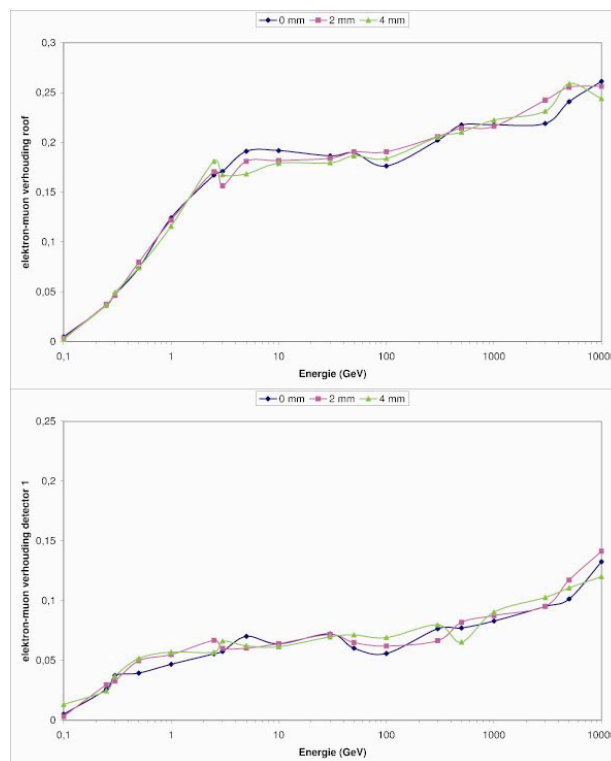
Detector 1 is de bovenste detector, detector 2 de twee detector van bovenaf, detector 3 de één na onderste en detector 4 de onderste. Het lood bevindt zich tussen detector 1 en 2, detector 2 en 3 en tussen detector 3 en 4. Boven detector 1 ligt dus geen lood en boven detector 4 in totaal  $3 \times$  de aangegeven dikte van 2 mm. In de grafieken is te zien dat als de bundel meer lood doorlopen heeft (dus van

detector 1 richting detector 4), dat de verdeling van het totaal aantal deeltjes dat secundair geproduceerd is, verschuift richting lagere energie voor de secundaire deeltjes. Er is bij deze energie geen afname in aantal muonen te zien als de bundel de opstelling heeft doorlopen.

### 3.2.8 Elektron-muon verhouding

Er zijn modelberekeningen gedaan voor verschillende energieën. Hierbij is ook gekeken naar de elektron-muon verhouding bij het dak. In Figuur 3.15 zijn de resultaten voor het dak en de bovenste detector (detector 1) weergegeven, voor de diverse energieën van de invallende muonenbundel met diverse diktes lood tussen de detectoren. Het lood ligt niet boven detector 1. Hierin is te zien dat de berekeningen bij een bepaalde energie, maar met verschillende diktes lood tussen de detectoren redelijk goed met elkaar in overeenstemming zijn. Dit is belangrijk omdat de modelberekeningen telkens maar voor één energie en één dikte van lood tussen de detectoren doorlopen kunnen worden.

De afwijkingen worden veroorzaakt door het aantal secundair geproduceerde elektronen en niet door het aantal muonen. De stijging in elektron-muon verhouding met toenemende energie is niet onverwacht. Hoe hoger de energie, hoe meer secundaire elektronen er door interacties geproduceerd kunnen worden.

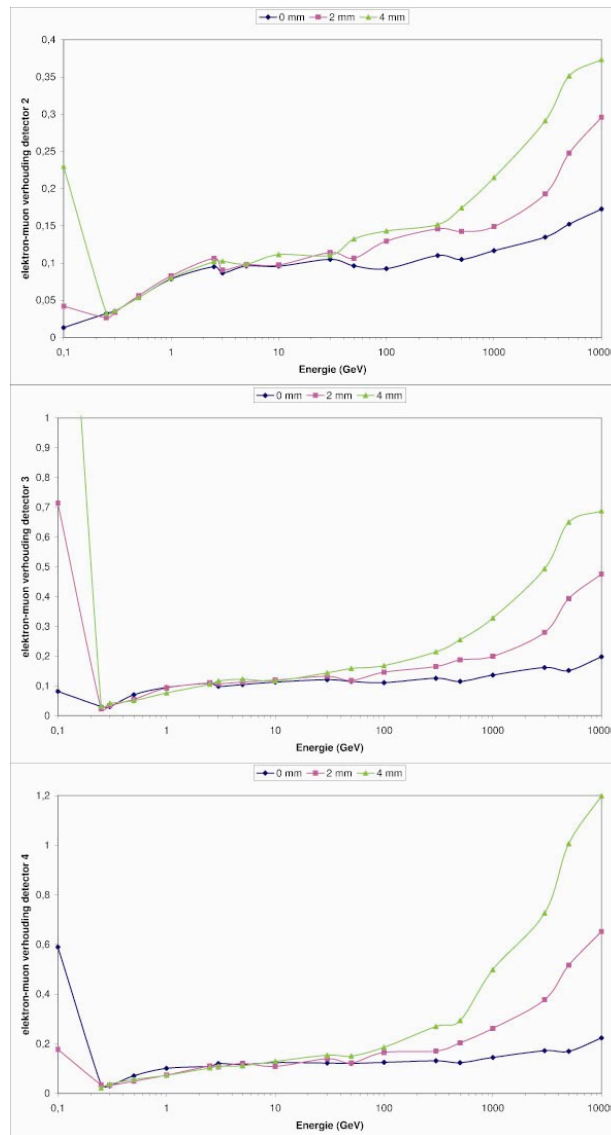


*Figuur 3.15: De elektron-muon verhouding voor het dak en detector 1 bij verschillende primaire bundelenergieën en verschillende diktes lood boven de detectoren. Bij het dak en detector 1 is er geen sprake van afscherming door het lood. Voor de gebruikte geometrie zie Figuur 3.10.*

Bij een energie van lager dan ongeveer 0,1 GeV komen er bijna tot geen muonen meer door het dak heen. Er zijn dan nog wel secundair geproduceerde elektronen aanwezig. Hierdoor neemt de elektron-

muon verhouding bij 0,1 GeV toe bij de lager gelegen detectoren.

In Figuur 3.16 zijn de elektron-muon verhoudingen voor de andere drie detectoren weergegeven voor verschillende diktes van lood tussen de detectoren en verschillende energieën van de invallende muonenbundel. In tegenstelling tot detector 1 ligt het lood bij deze detectoren telkens boven de detector. Dit betekent bij een looddikte van 2 mm dat zich boven detector 2 een looddikte van 2 mm bevindt, boven detector 3 een looddikte van  $2 \times 2 \text{ mm} = 4 \text{ mm}$  en boven detector 4 een looddikte van  $3 \times 2 \text{ mm} = 6 \text{ mm}$ . Te zien valt dat de elektron-muon verhouding bij lage energie, 0,25 GeV tot 10 GeV bijna niet afhangt van de looddikte tussen de detectoren.



*Figuur 3.16: De elektron-muon verhouding voor detector 2 t/m 4 bij verschillende primaire bundel-energieën en verschillende diktes lood boven de detectoren. De invloed van het lood op de elektron-muon verhouding bij hogere energieën is duidelijk waarneembaar. Voor de gebruikte geometrie zie Figuur 3.10.*

Bij hogere energieën is te zien dat hoe dikker het lood, hoe groter de elektron-muon verhouding wordt. In het lood treden dus interacties op die secundaire showers van o.a. elektronen opleveren. Wanneer

de resultaten voor de diverse detectoren vergeleken worden, is te zien dat de elektron-muon verhouding groter is, als de bundel meer materie (lucht en detectoren) heeft doorlopen.

Wat door het gebruik van Fluka niet te achterhalen is, is de richting waarin de secundair geproduceerde deeltjes opgaan. Gezien de kleine kans dat er, bij een van boven naar beneden lopende bundel, secundair geproduceerde deeltjes omhoog gaan, is het geen groot probleem. Indien de exacte richting en looptijd van de primaire en secundaire deeltjes van belang is, bijvoorbeeld in verband met de trigger condities (hoogte thresholds en grootte trigger interval) bij de opstelling, dan zou een ander simulatiepakket (bijvoorbeeld GEANT [24]) nodig zijn.

### **3.2.9 Conclusie**

Het is mogelijk om met de opstelling zoals die in de werkplaats staat muonen, afkomstig van kosmische straling, te detecteren. Het probleem is hierbij dat de muonen in het dak van de werkplaats interacties aangaan met het materiaal van het dak. Hierbij worden secundaire deeltjes, o.a. elektronen, geproduceerd die ook gedetecteerd kunnen worden.

Hoe hoger de energie van de primaire muonen, hoe meer secundaire elektronen er aanwezig zijn.

Als de dikte van het lood tussen de detectoren toeneemt, neemt door interacties van de deeltjesbundel met het lood, het deeltjesaantal toe. Deze grotere deeltjes hoeveelheid hoeft niet noodzakelijk te betekenen dat er in de opstelling meer triggers ontstaan, omdat naast het toenemen van het deeltjesaantal, de deeltjesbundel in de ruimte uitspreidt. Een groter deel van de bundel die de bovenste detector treft, zal door de invloed van het lood de onderste detector niet meer bereiken. Als je dan gaat triggeren op alle vier de detectoren zal je een lagere trigger-rate kunnen vinden. De data-analyse van de opstelling zal hier meer uitsluitsel over moeten geven.

Naast het werken aan de simulaties heb ik mij nog bezig gehouden met het aansturen van een programmeerbare pulsgenerator. De aansturing geschiedt m.b.v. LabView en een USB verbinding. Deze pulsgenerator is speciaal voor HiSPARC gemaakt en kan pulsen met een lengte van 20 ns tot 2555 ns genereren in stappen van 5 ns. Voor de hoogte van de pulsen kan uit twee schalen gekozen worden. Pulsen kunnen gevarieerd worden tussen 0 en 3 V of tussen 0 en 12 V resp. De herhalingsfrequentie van de pulsen is 0,75 Hz. M.b.v. deze pulsgenerator kan op een eenvoudige wijze de overdrachtsfunctie van de nieuwe HiSPARC elektronica bepaald worden. De data kunnen vervolgens gecorrigeerd worden voor niet-lineair gedrag van de elektronica.

De intentie was om de aansturing van de pulsgenerator te integreren in de HiSPARC data acquisitie software zodat regelmatig de overdrachtsfunctie gecontroleerd zou kunnen worden. Van integratie is, vanwege de complexiteit van het DAQ programma afgezien. De aansturing van de pulsgenerator is nu beschikbaar als zelfstandig programma.



### 3.3 Data analyse cluster Nijmegen



*Figuur 3.17: Teun van Heesch (links) - Koning Willem II College Tilburg [25] - en Sjaak Wolst (rechts) - Dr. Moller College Waalwijk [26] (tot medio 2009) -.*

Teun van Heesch is docent natuurkunde aan het Koning Willem II College in Tilburg. Na een carrière in het bedrijfsleven maakte Sjaak Wolst in 1992 de gedeeltelijke overstap naar het onderwijs (coördinator avondopleiding aan de HTS Civiele Techniek te 's-Hertogenbosch). Van 2000 tot 2009 was hij docent natuurkunde/ANW aan het Dr. Moller College in Waalwijk. Per Medio 2009 is hij eveneens verbonden aan het Koning Willem II College.

#### 3.3.1 Onderzoeksopdracht

Het analyseren van de meetresultaten van de HiSPARC Nijmegen cluster.

#### 3.3.2 Introductie

In Nijmegen worden vanaf juni 2002 metingen verricht in het kader van het HiSPARC project. Tot nu toe is er slechts incidenteel naar een aantal coïncidenties gekeken waarbij de richting en de energie hiervan zijn bepaald. We verwijzen hiervoor naar het artikel 'De eerste resultaten van het HiSPARC project' door C. Timmermans et. al. in het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde [27] en het verslag van H. Awater [28]. De bedoeling van onze opdracht is om meer data te analyseren en waar mogelijk deze analyses en de analysesoftware structureel beschikbaar te maken. De analyses hebben dan betrekking op:

- Het verloop van de 'MPV waarde' in de tijd
- Het verloop van het aantal 'events' in de tijd
- De veroudering van de meetsystemen
- De verwerkingstijden van de meetsystemen



- De verhouding tussen signaal en achtergrond
- De bepaling van de richting van drievoudige coïncidenties
- De werkelijke tijd dat een opstelling gemeten heeft
- Het onderzoeken of er pieken van 2 of meer muonen te vinden zijn
- De invloed van de manier van verwerking
- De invloed van het weer

Alle data van de afgelopen 7 jaar is beschikbaar maar er zijn nog nauwelijks computerprogramma's ontwikkeld om deze data te analyseren. In het ontwikkelen hiervan is het grootste deel van onze uren gaan zitten. Naast het programmeren zelf is er behoorlijk wat tijd besteed aan het leren omgaan met C/C++ en ROOT [29]. Dit laatste was noodzakelijk omdat programmatuur waar wij meer ervaring mee hebben, zoals Excel, niet in staat is om de gigantische hoeveelheden data te verwerken.

Alle door ons gemaakte programma's zijn via de HiSPARC site van Nijmegen (eventueel via Charles Timmermans) op te vragen. Mocht de nieuwe HiSPARC site op tijd in de lucht komen is het wellicht mogelijk de programma's via de nieuwe site aan te bieden.

### **3.3.3 De Nijmegen cluster**

In deze cluster zijn een 12-tal meetopstellingen opgenomen waarvan er negen verdeeld over Nijmegen staan en drie in Venray. Deze laatste drie zijn pas relatief kort aangesloten op het netwerk. De data van detectoren op de volgende locaties zijn bij het onderzoek betrokken:

1. Universiteit Nijmegen
2. Nijmeegse Scholengemeenschap Groenewoud
3. Stedelijk Gymnasium Nijmegen
4. Dominicus College Nijmegen
5. Kandinsky College Nijmegen.
6. Universiteit Nijmegen.
7. Montessori College Nijmegen.
8. Stedelijke Scholengemeenschap Nijmegen.
9. Nijmegen West.
20. Raayland Venraij.
21. Gilde Venray.
22. Melkfabriek Venraij

De meetresultaten van de diverse opstellingen worden opgeslagen bij de Radboud Universiteit en kunnen opgehaald worden via <http://hisparc.hef.kun.nl/>. Eerste meetgegevens gaan terug tot 2002. Gegevens zijn gecodeerd middels 4 rijen getallen:

1e regel: 200903150000072441451

2e regel: 20 -128 10000 0.5

3e regel: 12 15 15 17 15 17 15 15 15 15 17 12 15 15 17 12 15 17 12 17 17 17 15 17 17 15 15 20 15 12 17 15  
17 17 15 15 20 12 15 12 12 12 12 15 10 20 12 15 15 15 10 15 12 12 20 17 17 15 12 17 15 20 12 15  
17 17 15 17 15 15 15 17 12 10 17 10 20 15 12 12 15 17 12 12 15 12 12 17 12 15 17 17 15 20 12 17  
17 12 17 17 20 15 20

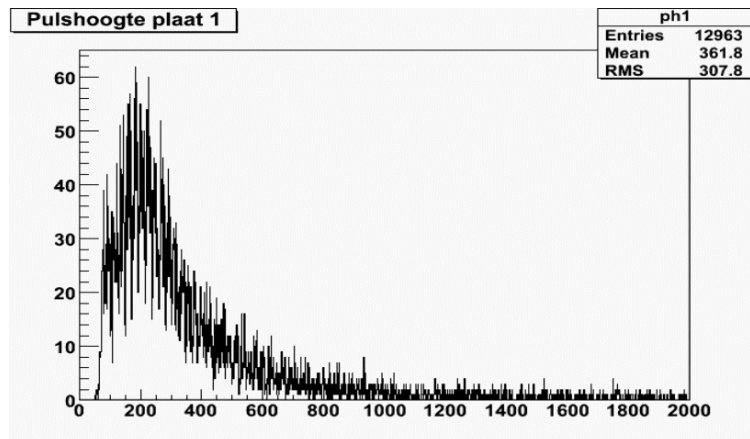
4e regel: 15 15 12 15 15 12 15 12 12 10 12 12 20 17 12 15 12 15 20 12 12 17 15 24 83 110 122 98 90 54 54  
39 32 20 10 7 5 0 5 5 2 2 0 5 0 5 0 7 -7 -5 -5 2 5 5 2 0 7 -5 2 2 -7 0 0 0 0 0 0 0 -10 0 -7 0 2 -7 0 0 5  
2 5 2 2 2 0 0 7 0 5 5 0 2 -7 0 0 5 -7 2 2

De 1e regel bevat informatie betreffende de datum en tijd; de 2e regel bevat een aantal systeeminstellingen zoals de triggervoorwaarden en de 3e en 4e bevatten de door de fotobuis gegenereerde signalen. Per dag worden er tussen 5000 en 20000 metingen per detector opgeslagen. Een meting (= 'event', in het vervolg wordt gesproken over het aantal events per uur of dag; daarmee wordt het aantal coïncidenties tussen de twee platen van een station bedoeld) wordt vastgelegd als de tijd van registratie van een gebeurtenis tussen beide scintillatieplaten niet meer dan  $1,2 \times 10^{-6}$  s ofwel 1200 ns) bedraagt. Dit is een zeer veilige instelling waarbij echter ook veel achtergrond wordt binnengehaald. De beide scintillatieplaten van een meetopstelling staan ca. 5 meter uit elkaar. Gerekend met de lichtsnelheid,  $c$ , betekent dit dat men pas van een gebeurtenis kan spreken als het tijdsverschil niet groter is dan  $1,6 \times 10^{-8}$  s is (16 ns).

Globaal kan men zeggen dat hoe meer opstellingen een gebeurtenis opmerken hoe groter de energie die door het kosmisch deeltje is afgegeven aan de aardse atmosfeer. Heeft men drie of meer meetopstellingen die een gebeurtenis waarnemen dan kan hieruit ook de richting van de kosmische shower worden afgeleid.

### 3.3.4 Bewerking ruwe data

De ruwe data zoals deze per detector is opgeslagen moet bewerkt worden voordat analyse hiervan plaats kan hebben. We hebben hiervoor de programma's <STATHIST.C> en <TEXTHIST.C> geschreven/bewerkt. De basis hiervoor was een programma van Charles Timmermans dat voor de grafische verwerking aangepast is. Het programma <STATHIST.C> maakt de ruwe data geschikt voor verwerking in ROOT door de gegevens van iedere dag in een apart ROOT bestand te zetten. Vanuit dit ROOT bestand zijn diverse 1 en 2 dimensionale histogrammen op te vragen. ROOT is een analyse programma gemaakt op CERN, dat geschikt is voor statistische en wiskundige bewerking van grote hoeveelheden data. Histogrammen geven onder andere de pulshoogte per scintillatieplaat, pulshoogte plaat 1 vs. plaat 2, pulshoogte vs. pulsbreedte en pulshoogte vs. tijd.



Figuur 3.18: Een 1-dimensionaal histogram van de pulshoogte.

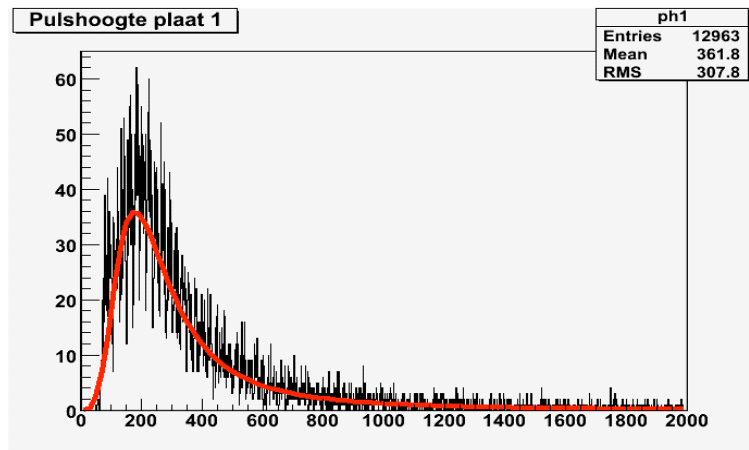
In Figuur 3.18 staat op de horizontale as de pulshoogte in verschillende ‘bins’ en op de verticale as het aantal keren dat een meting in die betreffende bin past. De stapgrootte per bin (op de horizontale as) is 1 mV. Dus de as is ook te ‘lezen’ als de bij de pulshoogte behorende spanning.

Het programma <TEXTHIST.C> selecteert gegevens uit de ruwe data en slaat deze voor iedere dag op in een tabel. De standaard tekstbestanden kunnen op verschillende manieren bewerkt worden. In de tabellen staan o.a. de tijd van een event, de pulshoogte voor beide platen in verhouding tot de MPV (lijsten met de verschillende MPV’s voor elke detector voor elke dag zijn eerst uit de door <STATHIST.C> gemaakte ROOT-files gehaald.), het tijdsverschil tussen beide pulsen en het aantal events van de betreffende dag. De tabellen bestaan louter uit rijen getallen die pas betekenis krijgen na analyse met hiervoor geschreven software. Een voorbeeld van een text file, ROOT-file en de grafieken die daar in opgeslagen zijn te vinden in bijlagen bij de programma’s.

Belangrijk is te beseffen dat niet ieder muon (of elektron) evenveel energie achterlaat in de scintillatieplaat. Dit wordt o.a. bepaald door de lengte van de weg van het muon door de plaat en door de plaats waarop het muon op de plaat valt. Een probleem waar we tegenaan liepen is dat er veel metingen dubbel zijn opgeslagen in de ruwe data. Om te voorkomen dat dit de analyse kan vertekenen, hebben we alle software later zo aangepast dat dubbele waarden eruit gefilterd worden.

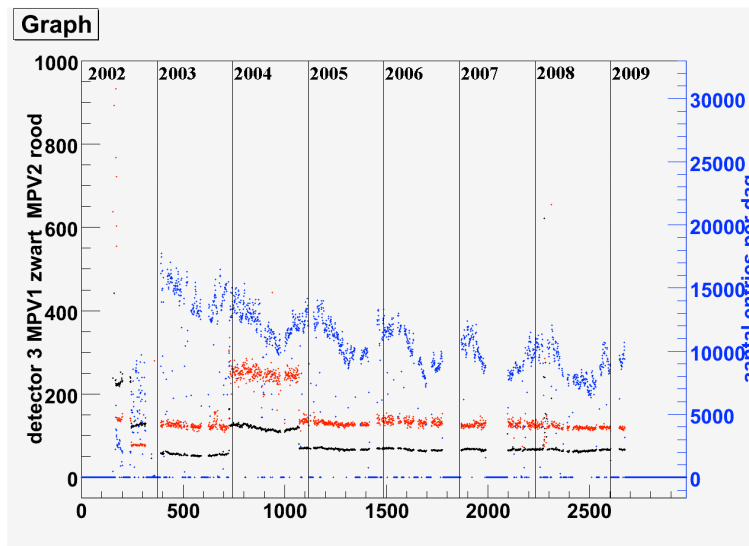
### 3.3.5 De MPV waarde

Vanuit de histogrammen is de eerste bewerking die we hebben gedaan het bepalen van de MPV waarden per dag. Dit hebben we gedaan door in het programma ROOT een Landau-fit te laten leggen over het pulshoogte histogram (Figuur 3.19).



Figuur 3.19: Voorbeeld Landau-fit op de pulshoogte data.

De MPV-waarde is de meest voorkomende pulshoogte van die dag. Het is dus een statistische bewerking. Deze hebben we uitgevoerd omdat het interessant kan zijn om te zien hoe de MPV waarden in de loop van de tijd veranderen. Door gedurende langere tijd de MPV waarden met elkaar te vergelijken kan er iets gezegd worden over de veroudering van de meetsystemen (= fotobuizen, elektronica etc.). De MPV waarde komt niet overeen met de MIP (= minimum ionising particle) waarde die gevonden wordt na kalibratie van een van de detectoren. Uit het onderzoeksverslag van H. Awater komt echter naar voren dat er wel een redelijk constante verhouding zit tussen MPV en MIP. De MPV kun je achteraf bepalen als je terugkijkt naar een drievoudige coïncidentie. De MIP geeft aan wat één muon voor energie afgegeven zou hebben. Dit kun je achteraf echter niet meer bepalen. Dus is de redelijk constante verhouding tussen MPV en MIP nuttig om mee te kunnen rekenen.



Figuur 3.20: Verloop MPV waarden en aantal events.

In de grafiek in Figuur 3.20 zien we de MPV waarden (zwart voor plaat 1 en rood voor plaat 2) uitgezet gedurende de jaren dat deze detector data verzamelt. Bij deze detector is (net als bij alle anderen) een kleine afname in de MPV waarde over de loop der jaren te zien. Deze afname kan voor het grootste

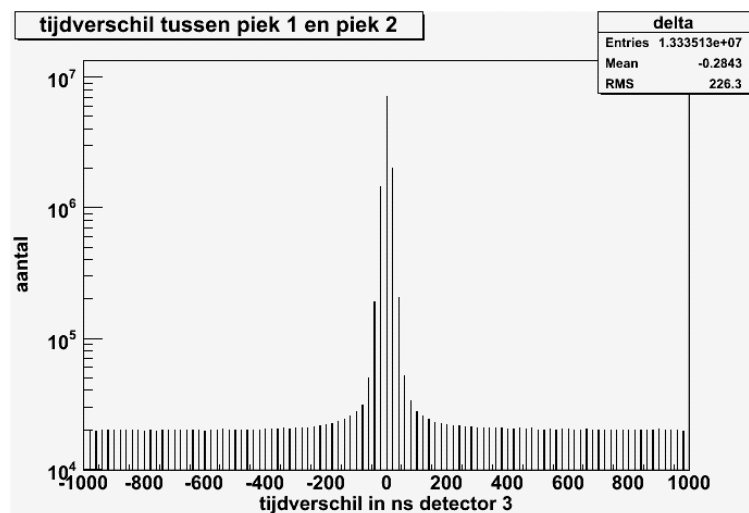
deel verklaard worden het afnemen van de gevoeligheid van de fotobuis. Deze kan teniet gedaan worden door een andere instelling (= hoogspanning) voor de fotobuis te kiezen.

Het aantal events is in het blauw weergegeven. We zien hierbij een stuk duidelijker dat het aantal events afneemt in de tijd. Daarnaast zien we ook verschillen door het jaar heen. Kan de afname in het aantal events gezien worden als een maat voor de veroudering van het meetsysteem? Wij menen van wel. Het is niet aannemelijk dat de kosmische activiteit door de jaren is afgenomen. We komen hier later nog op terug. De histogrammen voor de andere detectoren alsmede de code van de gebruikte analyse programma's zijn op te vragen via HiSPARC Nijmegen.

In Figuur 3.20 is tevens goed af te lezen gedurende welke perioden de meetopstelling niet gefunctioneerd heeft. Door verschillende oorzaken komt het nogal eens voor dat een meetopstelling stil ligt. De meest voorkomende reden is het uitzetten of uitvallen van de computer op de meetlocatie. Dit is met het Nijmeegse systeem niet altijd snel te achterhalen omdat je echt de meetwaarden regelmatig op moet vragen voordat je in de gaten hebt of het systeem al of niet werkt.

### 3.3.6 De verhouding tussen signaal en achtergrond

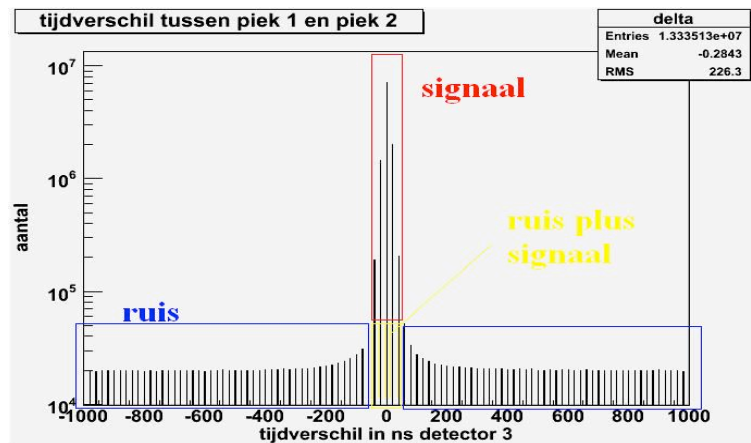
M.b.v. de ROOT bestanden konden we ook de verhouding tussen signaal en achtergrond analyseren. Hiervoor hebben we histogrammen gemaakt uit de tekstfiles en het tijdsverschil tussen de platen van de waargenomen pieken hierin uitgezet (Figuur 3.21).



Figuur 3.21: Voorbeeld verhouding signaal/achtergrond.

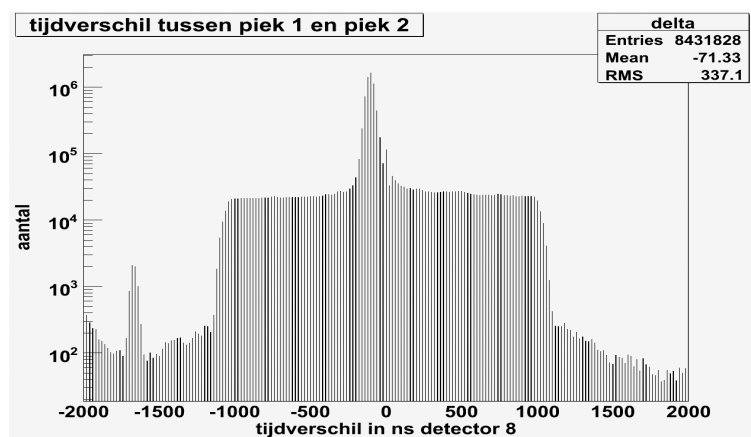
Het histogram geeft het tijdsverschil tussen de signaalpiek in plaat 1 en de signaalpiek in plaat 2 uitgezet in stapjes van 20 ns omdat de resolutie van het meetsysteem niet nauwkeuriger was. Negatieve tijden geven dus aan dat plaat 2 eerder door een muon werd getroffen dan plaat 1. Vanwege de hierboven uitgelegde '16 ns' en het feit dat je niet weet welke weg het licht door de scintillatieplaat neemt kun je het gebied tussen -50 en +50 ns als signaal beschouwen, en het gedeelte daarbuiten als achtergrond (Figuur 3.22). Uit de histogram krijg je een beeld van de verhouding tussen achtergrond en signaal. Alles binnen een tijdvenster van ca. 100 ns bestaat uit signaal (en achtergrond) en alles bui-

ten dit venster bestaat uit achtergrond (met mogelijk hier en daar nog wat signaal). Voor bijna alle stations kregen we vergelijkbare grafieken.



Figuur 3.22: Uitwerking verhouding signaal/achtergrond.

Detector 8 blijkt afwijkend te zijn (Figuur 3.23), hier is het tijdverschil n.l. niet gecentreerd rond 0! Overigens is dit histogram anders begrensd waardoor duidelijk te zien is binnen welke tijdsgrenzen het systeem een meting opslaat.

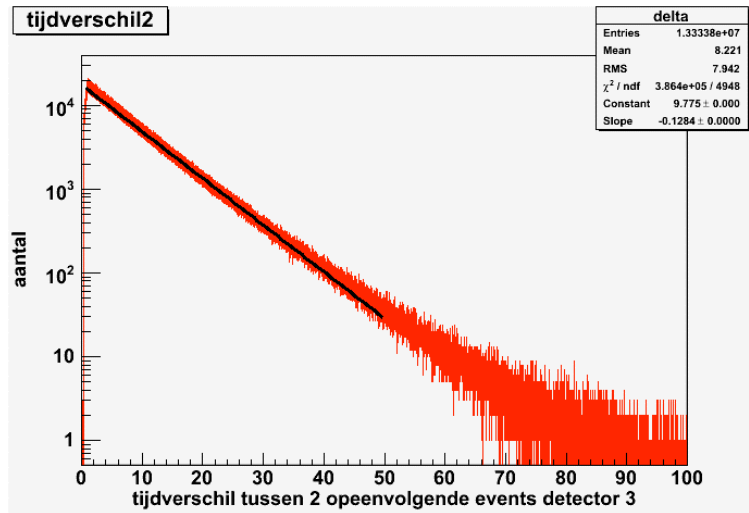


Figuur 3.23: Verhouding signaal/achtergrond bij detector 8.

Dat detector 8 niet gecentreerd ligt rond de 0 komt doordat bij dit systeem een van de scintillatieplaten dicht bij de PC staat maar om praktische redenen de andere hier zo'n 50 meter vandaan staat.

### 3.3.7 Tijdverschil tussen de opeenvolgende events

We ook gekeken naar het tijdverschil tussen twee opeenvolgende events. Figuur 3.24 geeft een voorbeeld van het tijdverschil tussen twee events voor detector 3. Horizontaal staat de tijd tussen twee opeenvolgende events in seconden en vertikaal het aantal keer dat dit voorkwam (meer specifiek; de horizontale as is voor dit histogram onderverdeeld in 10000 'bins', iedere bin heeft dan een breedte van 0,01 seconde en er is geteld hoe vaak een tijd tussen bv 5,00 en 5,01 seconde voorkwam).

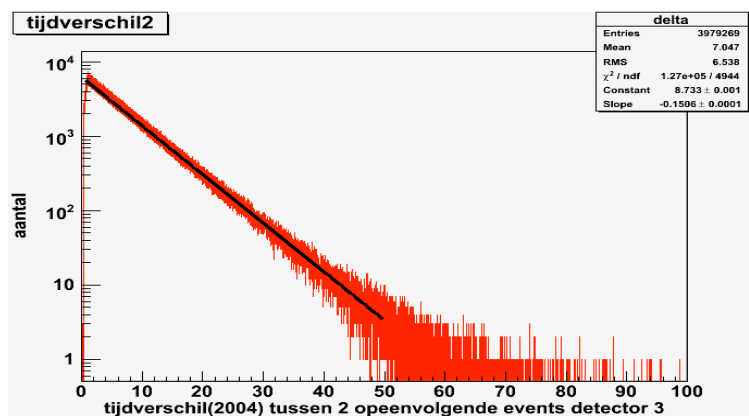


Figuur 3.24: Voorbeeld tijdverschil tussen opeenvolgende events.

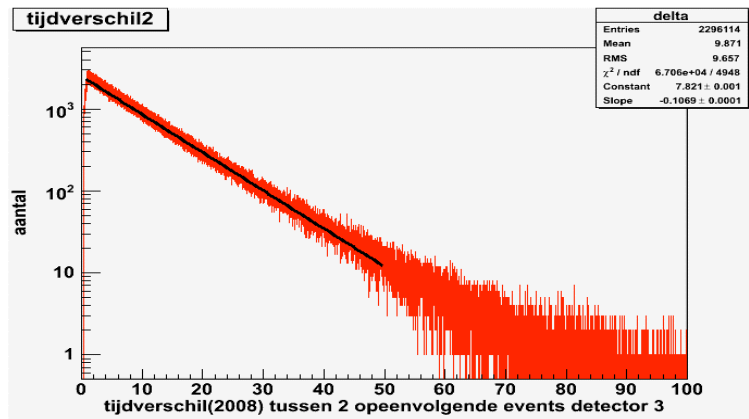
In het histogram is duidelijk te zien dat het grootste deel van het aantal events zich afspeelt tussen +/- 0,5 en 50 s. Daarbuiten komt het wel voor maar slechts sporadisch (let op de logaritmische schaal van de y-as). In het diagram is een zwarte lijn zichtbaar. Dit is de exponentiële fit op het eerste deel van het histogram. Voor dit type fit is gekozen omdat we dit verwachten voor willekeurige processen. Een rechte lijn in een logaritmische grafiek geeft bovendien een exponentieel verband aan. Het bovenstaande diagram bevat alle events van 2004 tot 2008. Hiervoor is gekozen omdat alle detectoren in deze periode gewerkt hebben. De exponentiële functie wordt:

$$aantal = c \cdot e^{-t/T} = c \cdot e^{\frac{1}{T} \cdot t} \quad (3.5)$$

Die  $1/T$  is hier de helling (= 'slope') van de zwarte lijn en geeft de gemiddelde tijd ( $\langle T \rangle$ ) tussen twee opeenvolgende events. De helling,  $0,1284 \text{ s}^{-1}$ , geeft de gemiddelde tijd tussen twee events:  $1/0,1284 = 7,79 \text{ s}$ . Dat is dus een gemiddelde over 5 jaar. Doe je hetzelfde over het eerste jaar (= 2004) en het laatste jaar (= 2008) van deze periode, dan krijg je de onderstaande diagrammen (Figuur 3.25 en Figuur 3.26 resp.).



Figuur 3.25: Tijdverschil tussen opeenvolgende events detector 2 in 2004.



Figuur 3.26: Tijdverschil tussen opeenvolgende events detector 2 in 2008.

Aan de hellingen kun je zien dat de gemiddelde tijd tussen twee events in 2004 gelijk is aan  $1/0,1506$  ofwel 6,64 seconden. In 2008 is dat opgelopen tot 9,35 sec. Dit is te verklaren uit de veroudering van de meetopstelling. In 2004 verwacht je  $24 \times 3600/6,64 \approx 13000$  events per dag en in 2008 nog maar  $24 \times 3600/9,35 \approx 9250$  events per dag. Een afname die duidelijk zichtbaar is maar geen verklaring geeft voor de fluctuaties binnen een jaar (zie Figuur 3.20). Deze komen later nog ter sprake.

Zoals in Tabel 3.7 te zien is heeft elke detector te maken met deze toename in de gemiddelde tijdsduur tussen events.

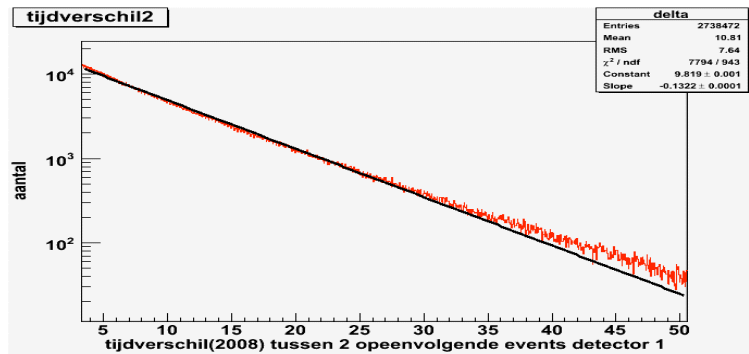
Detector	2004	<2004-2008>	2008
1	5,94	5,82	7,45
2	5,67	6,91	14,10
3	6,64	7,79	9,35
4	4,94	?	10,23?
5	4,91	5,55	6,03
6	6,27	6,88	7,57
7	5,15	5,50	5,64
8	Niet actief	8,03	11,10

Tabel 3.7: Het gemiddelde tijdverschil tussen opeenvolgende events in 2004, de periode 2004 – 2008 en in 2008.

De gevonden gemiddelden zijn enigszins afhankelijk van de grenzen van de exponentiële fit en van het aantal 'bins' waarmee je het histogram maakt. Vandaar dat er altijd gekozen is voor de grenzen van 0,5 - 50 seconden en 10000 bins.

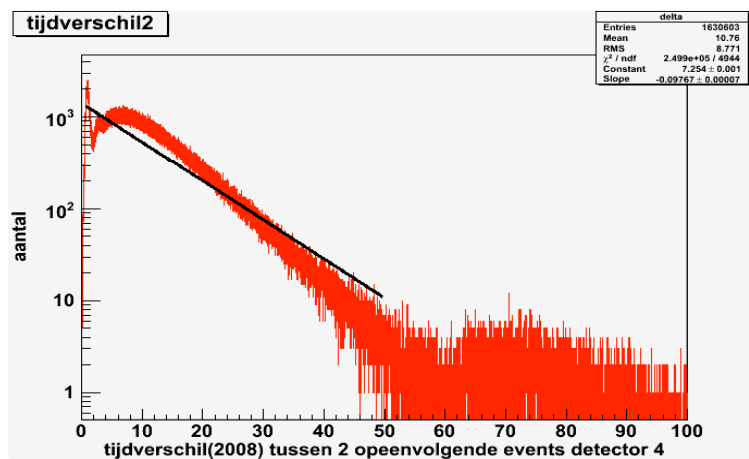
Als illustratie (Figuur 3.27) is het tijdverschil voor detector 1 voor het jaar 2008 gemaakt met 2000 bins en een fit tussen 4,5 en 51 sec. Omdat de bins nu een breedte hebben van 0,05 sec is er minder variatie in de aantallen waardoor de lijn 'rechter' wordt. Uit de helling (het is niet echt een rechte lijn; dat was ook al te zien in de histogrammen van 2004 - 2008) kun je halen dat het gemiddelde tijdverschil 7,56 s is.





Figuur 3.27: Tijdverschil tussen opeenvolgende events in 2008 met aangepaste begrenzing en binning.

Het is goed om voor ogen te houden dat aanpassing van de gebruikte analyse technieken kunnen lijden tot verschillen in de uitkomst. We hebben daarom steeds vergelijkbare analyses uitgevoerd onder gelijke voorwaarden en met gelijke instellingen. Detector 1 valt in Tabel 3.7 op omdat het langjarig gemiddelde lager is dan dat van 2004. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het gegeven dat daar heel wat aan de instellingen gesleuteld is. Dit is de detector die op het dak staat van de faculteit en daarom het meest geschikt was voor allerlei kleine en grote experimenten in de beginjaren van HiSPARC.

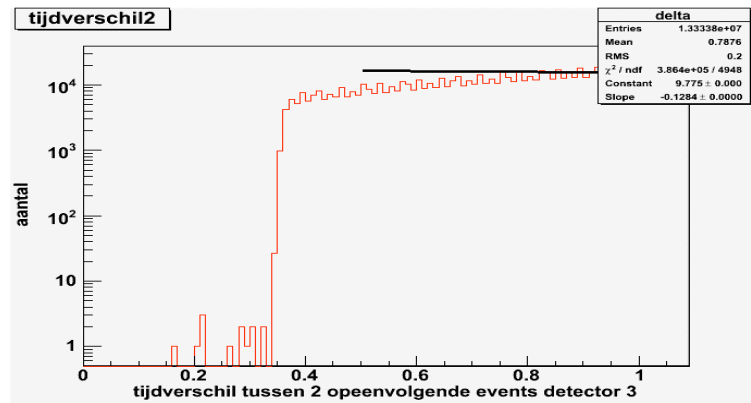


Figuur 3.28: Tijdverschil tussen opeenvolgende events detector 4.

Detector 4 geeft een vreemd histogram (Figuur 3.28) waar met onze methode geen gemiddelde uit te halen valt (dezelfde vorm keerde ook terug in het histogram van 2008). Van deze meetopstelling is waarschijnlijk plaat 1 halverwege 2006 gebarsten.

### 3.3.8 Dode tijd van het meetsysteem

Interessant is ook het linker deel van de histogrammen in Figuur 3.24 t/m Figuur 3.28. Het blijkt dat er een bepaald minimum tijdverschil is tussen twee events. Dit tijdverschil is de dode tijd van het meet-systeem. Om een en ander duidelijk te krijgen hebben we dit deel uitvergroot (Figuur 3.29).



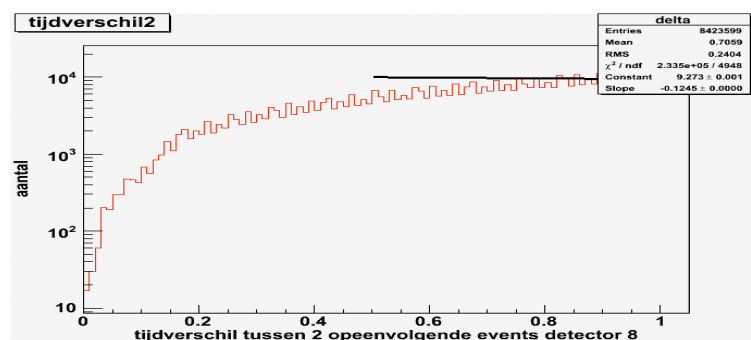
Figuur 3.29: Voorbeeld dode tijd meetsysteem.

Het minimale tijdverschil blijkt ca. 0,35 s te zijn. Dit betekent dat alles wat er binnen deze tijd gebeurt door dit station gemist wordt. Voor de eerste acht detectoren vinden we de volgende waarden voor de dode tijd (Tabel 3.8):

Detector	Dode tijd (s)
1	ca. 0,07
2	ca. 0,16
3	ca. 0,35
4	ca. 0,10
5	ca. 0,15
6	ca. 0,04
7	ca. 0,12
8	ca. 0,10

Tabel 3.8: Dode tijd voor station 1 t/m 8.

Het aflezen van de dode tijd is niet bij iedere grafiek exact te doen zoals het histogram in Figuur 3.30 voor detector 8 aangeeft. Daarom staat voor iedere dode tijd waarneming 'ca'.



Figuur 3.30: Dode tijd van detector 8.

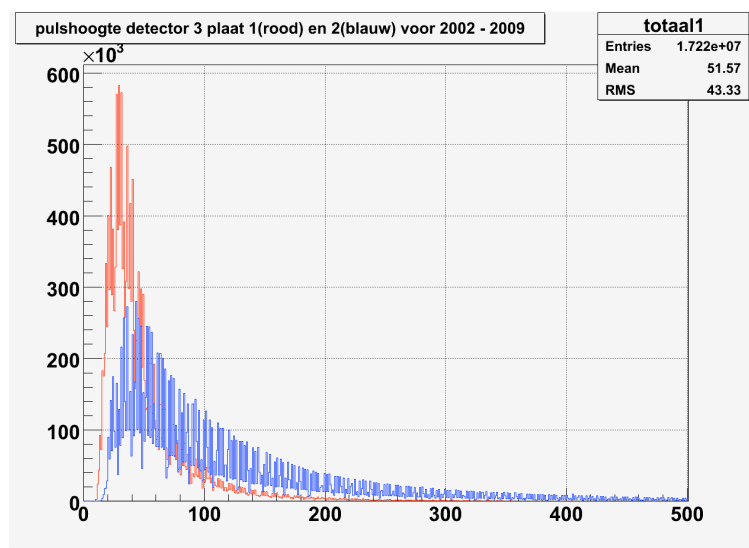
Ook verschillen in het aantal gebruikte bins geven kleine variaties in de dode tijd. Het spreekt voor zich dat we ook hier het aantal bins gelijk hebben gehouden.

### 3.3.9 MPV waarden en meerdere muon-pieken

Een muon geeft een hoeveelheid energie af in de scintillatieplaat. Deze hoeveelheid varieert, zoals de Landauverdeling van de pulshoogtediagrammen ook al aangaf, maar er is toch heel duidelijk een bepaalde waarde te vinden die het meeste voorkomt, de MPV waarde. Het ligt voor de hand om dit als waarde te nemen voor de 1 muon-piek. De vraag die hierbij meteen opkomt is: zijn er mogelijk ook 2 muon-pieken of 3 muon-pieken terug te vinden? Er worden namelijk ook events waargenomen met een veel grotere pulshoogte dan de MPV waarde. Dit zou er mogelijk op kunnen wijzen dat:

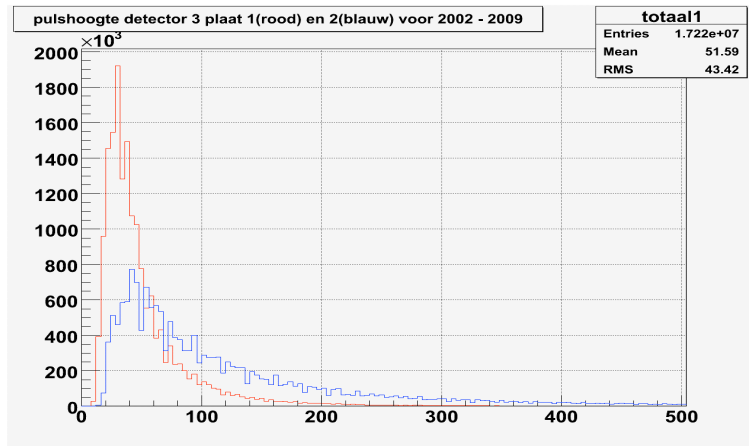
- Er meerdere muonen op hetzelfde moment de scintillator passeren en/of
- Er op hetzelfde moment een elektron binnendringt en/of
- De veroudering van de meetsystemen invloed heeft.

Om de eerste mogelijkheid van meerdere muonen die gelijktijdig door de scintillatieplaat gaan te kunnen onderzoeken, hebben we een programma geschreven dat de bestaande MPV histogrammen bij elkaar optelt. Het idee erachter is dat als je genoeg metingen hebt van een meer-muon-piek dit uiteindelijk in een histogram te herkennen moet zijn (Figuur 3.31).



Figuur 3.31: Voorbeeld samengesteld MPV histogram.

In het histogram valt op dat er geen duidelijke 2<sup>e</sup> of 3<sup>e</sup> piek te zien is. We hebben voor dit histogram het totale aantal bins op 2048 gezet. Wat u ziet is een deel waarop is ingezoomd. We hebben daarnaast ook nog histogrammen gemaakt met 1024, 512 (Figuur 3.32), 256 en 128 bins (binnen ROOT kun je wel makkelijk terug naar een lager aantal bins maar niet overstappen naar een hoger aantal!).



Figuur 3.32: Voorbeeld van een samengesteld histogram met 512 bins.

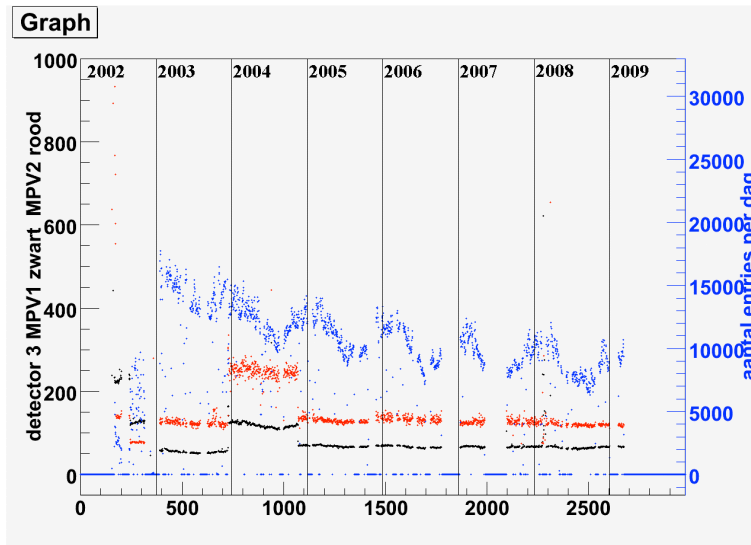
Bij iedere reductie van het aantal bins, nemen de variaties in de histogrammen natuurlijk af, maar nergens kwam duidelijk een volgende piek tevoorschijn. Het lijkt erop dat de twee of meer muon-pieken ofwel niet ofwel slechts zeer sporadisch voorkomen. Een probleem met de samengestelde histogrammen is wel dat we bij bepaalde scintillatieplaten een zekere mate van periodiciteit waar kunnen nemen. We hebben hier geen verklaring voor kunnen vinden.

De tweede mogelijke verklaring voor een grotere MPV waarde is het binnendringen van een elektron ( $\beta$ -straling). De kans hierop is echter klein omdat deze niet eenvoudig door de skibox en het om de scintillatieplaat aanwezige plastic folie kunnen dringen. Tevens bevinden de elektronen zich voornamelijk in de kern van de shower. Hierdoor is de oppervlakte waarbinnen je ze kunt detecteren ook veel kleiner dan bij muonen. Doordat dit een zeldzaam verschijnsel is zullen ze in analyse methoden waarbij gebruik wordt gemaakt van histogrammen vrijwel niet detecteerbaar zijn. Ze verdwijnen in de staart van het histogram. De energie die een elektron achterlaat zal echter wel erg groot kunnen zijn omdat zij niet geheel door de scintillatieplaat heen dringen. Als ze binnendringen, zullen zij vrijwel zeker al hun energie afstaan.

De derde mogelijke verklaring lijkt voorlopig de beste optie. Een muon geeft geen vastgestelde hoeveelheid energie af. Dit hangt sterk af van de interactie die het met het materiaal van de scintillatieplaat heeft. Hier zijn de statistisch verschillen mogelijk erg groot. Dit heeft o.a. te maken met de mate van interactie van het muon met het materiaal, de lengte van het afgelegde pad in de scintillatieplaat en de plaats waar de muon de scintillatieplaat penetreert t.o.v. de positie van de fotobuis.

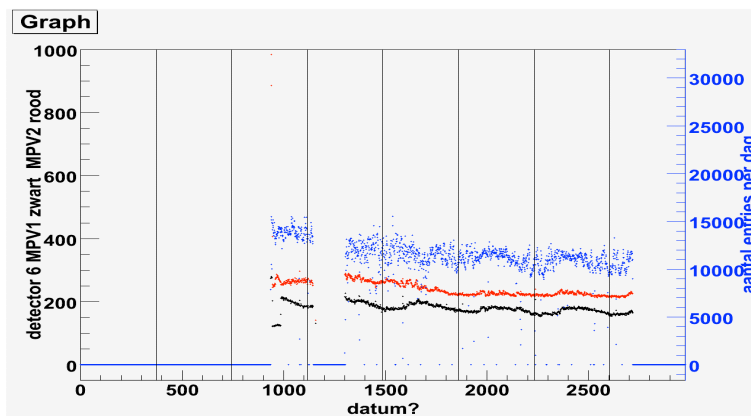
### 3.3.10 De jaarlijkse variatie in de gemeten aantallen events

Een onverklaard fenomeen vinden we in bepaalde jaarlijks terugkerende variaties. Dit is niet bij iedere detector even duidelijk maar stations 3 (Figuur 3.33) en 6 (Figuur 3.34) springen er hierbij uit.



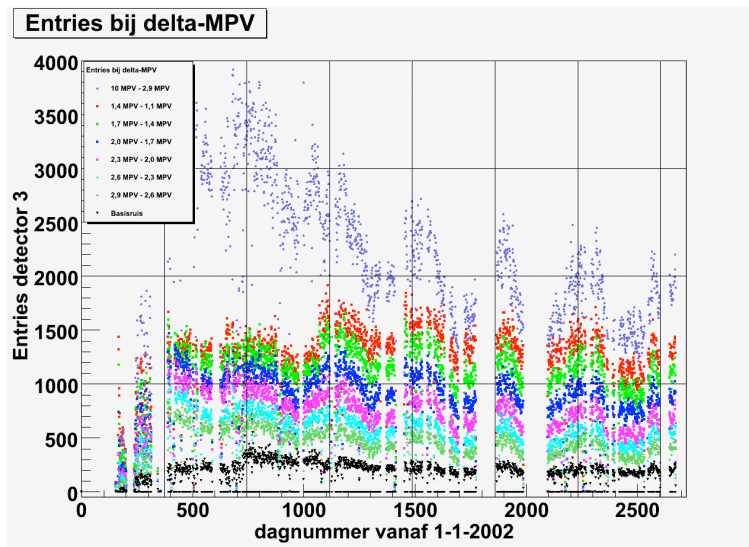
Figuur 3.33: Jaarlijks terugkerend patroon van variaties in het aantal events in station 3.

Bij beide histogrammen is er sprake van een jaarlijks terugkerend patroon van variaties in het aantal events. Wat wel direct opvalt is dat deze periodiciteit tegengesteld is. Bij detector 3 neemt het aantal events af in de zomer en bij detector 6 neemt het aantal events juist toe.



Figuur 3.34: Jaarlijks terugkerend patroon van variaties in het aantal events in station 6.

Om wat meer over dit fenomeen te weten te komen hebben we ook de fracties (de  $\Delta MPV$ ) van de gemeten waarden t.o.v. de MPV waarde uitgezet in Figuur 3.35. Onze hoop hierbij was om terug te kunnen vinden of deze periodiciteit kon worden toegeschreven aan achtergrondsignalen of juist aan de hogere meetwaarden.

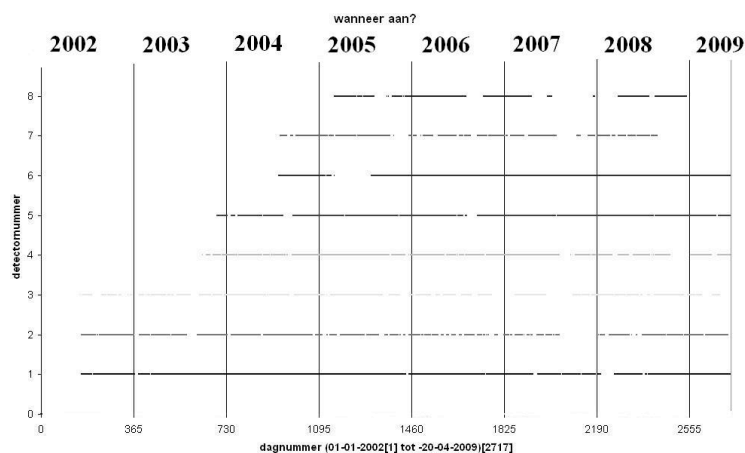


Figuur 3.35: Fracties ( $\Delta$ MPV) van detector-3.

In Figuur 3.35 zijn de events weergegeven die binnen een bepaalde fractie van de MPV waarde vallen. We wilden hiermee onderzoeken of we de periodiciteit kunnen verklaren uit de events die weinig of juist heel veel energie in de scintillatieplaat hebben achtergelaten. Uit de figuur blijkt dat de periodiciteit binnen alle fracties en binnen de achtergrond voor detector 3 herkenbaar is. Dit bleek ook bij detector 6 (niet afgebeeld) het geval te zijn. Het lijkt erop dat individuele meetopstelling op hun eigen manier kunnen reageren op veranderingen in (vermoedelijk) de temperatuur. Bij de overige detectoren is er niet of nauwelijks sprake van een soortgelijke periodiciteit.

### 3.3.11 De werkelijke meettijd van de systemen

Een van de zaken die snel duidelijk is, is dat niet ieder systeem iedere dag aan het meten is (Figuur 3.36). In de cluster Nijmegen is er geen continue bewaking van het al of niet online zijn van de meet-systemen.



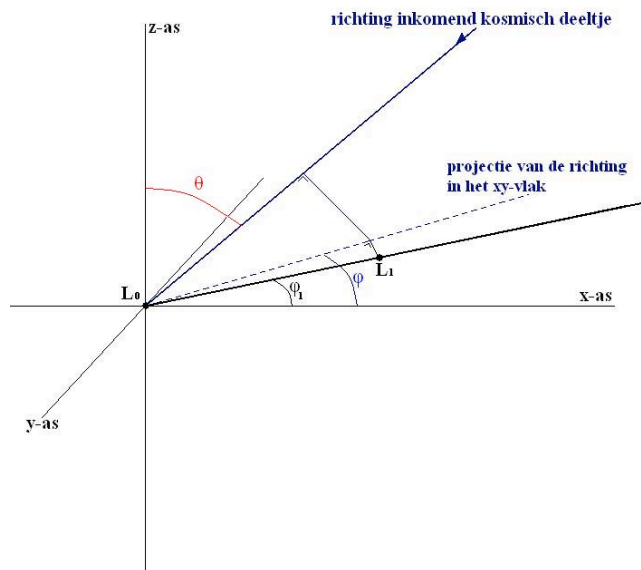
Figuur 3.36: De meettijd van de 8 detectoren.

De hiaten tussen de doorgetrokken lijnen geven de perioden dat een station niet operationeel was. De redenen hiervoor zijn divers maar een van de meest voorkomende redenen is het uitvallen of het niet

meer online zijn van de lokale PC. In de nabije toekomst zal nieuwe elektronica geplaatst worden zodat deze problem minder op zullen treden.

### 3.3.12 Richting van de as van de lawine

De inslag van een kosmisch deeltje boven in de atmosfeer heeft een lawine tot gevolg. De richting van het deeltjes-lawinefront wordt gegeven door een lijn met die een hoek  $\phi$  met een gekozen x-as (x- en y-as op het aardoppervlak, onze x-as is de oost-west lijn en de y-as de noord-zuid lijn) en een hoek  $\theta$  met de z-as maakt (Figuur 3.37). Met andere woorden met die  $\phi$ ,  $\theta$  combinatie kijken we tegen de richting van het deeltje in [28].



Figuur 3.37: Richting kosmisch deeltje.

De afstand tussen de stations  $L_0$  en  $L_1$  en de hoek  $\phi_1$  zijn bekend. De tijd  $T_1$  tussen de inslag bij  $L_0$  en  $L_1$  is gemeten. De lichtsnelheid,  $c$ , is de snelheid waarmee het front beweegt (dit is een aanname en zal niet voor 100% juist zijn). Tussen de hoeken  $\phi$ ,  $\theta$  en  $\phi_1$  alsmede  $T_1$ ,  $L_0L_1$  bestaat de volgende relatie (met  $T_1 = t_1 - t_2$ , voor afkortingen zie Figuur 3.37):

$$cT_1 = L_0L_1 \cdot \cos(\phi - \phi_1) \cdot \sin(\theta) \quad (3.6)$$

Treft het front drie stations  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  (= drievoudige coïncidentie) dan levert de meting van  $T_1$  en  $T_2$  de volgende twee vergelijkingen;

$$\begin{aligned} cT_1 &= L_0L_1 \cdot \cos(\phi - \phi_1) \cdot \sin(\theta) \quad (a) \\ cT_2 &= L_0L_2 \cdot \cos(\phi - \phi_2) \cdot \sin(\theta) \quad (b) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dit stelsel vergelijkingen heeft de volgende oplossing (het oplossen én het opstellen van dat stelsel is iets waar een profielwerkstuk groepje - HiSPARC mee kan starten!):

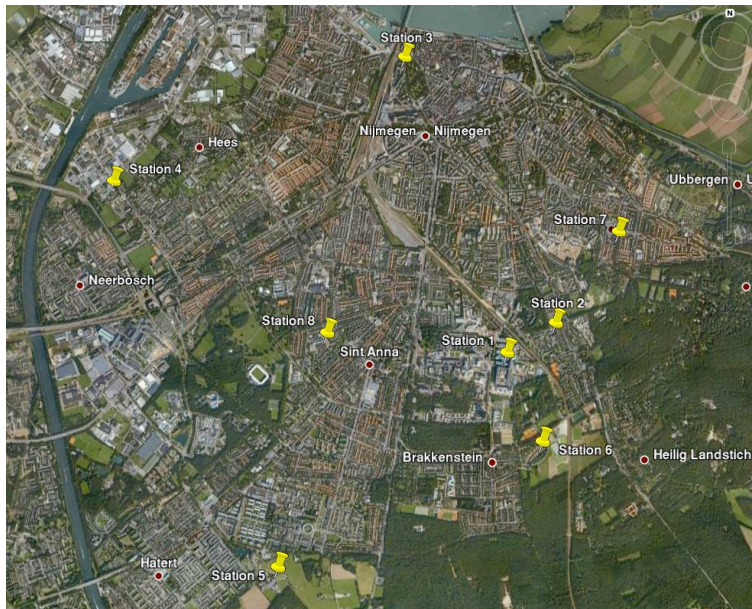
$$\tan(\varphi) = \frac{k \cdot \cos(\varphi_1) - \cos(\varphi_2)}{\sin(\varphi_2) - k \cdot \sin(\varphi_1)} \quad (3.8)$$

$$\sin(\theta) = \frac{c \cdot T_1}{L_0 L_1 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1)}$$

met

$$k = \frac{L_0 L_1 \cdot T_2}{L_0 L_2 \cdot T_1} \quad (3.9)$$

Ga je ‘met de hand’ de gevraagde  $\varphi$  en  $\theta$  uitrekenen dan bestaat die berekening uit het bepalen van  $L_0 L_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $L_0 L_2$ ,  $\varphi_2$ ,  $k$ ,  $\varphi$  en  $\theta$ .  $\theta$  is m.b.v. formules (3.7) (a) en (b) twee keer te berekenen en moet dan (natuurlijk) een gelijke waarde opleveren. De posities van de HiSPARC detectoren in de Nijmegen cluster kunnen uit de Google-plattegrond in Figuur 3.38 afgeleid worden.



*Figuur 3.38: Google Earth foto meetlocaties Nijmegen.*

Uit de positie van de detectoren (gemeten midden tussen de twee skiboxen) op de daken van de verschillende scholen (Figuur 3.39) en de schaal van de foto halen we de  $x$  en  $y$  coördinaten van de verschillende stations en daarmee zijn de verschillende bovengenoemde grootheden te berekenen.





Figuur 3.39: Google Earth foto van het dak met de skiboxen van een van de stations.

De coördinaten van de 8 door ons gebruikte Nijmeegse stations zijn (Tabel 3.9):

station	locatie	oosterlengte	noorderbreedte
1	Universiteit Nijmegen	5 <sup>0</sup> 52' 06".95	51 <sup>0</sup> , 49' 23".93
2	NSG Groenewoud	5 <sup>0</sup> 52' 29".50	51 <sup>0</sup> , 49' 32".41
3	Stedelijk Gymnasium Nijmegen	5 <sup>0</sup> 51' 19".95	51 <sup>0</sup> , 50' 50".46
4	Dominicus College Nijmegen	5 <sup>0</sup> 49' 03".07	51 <sup>0</sup> , 50' 13".73
5	Kandinsky College Nijmegen	5 <sup>0</sup> 50' 21".89	51 <sup>0</sup> , 48' 23".75
6	Universiteit Nijmegen(Adriaan)	5 <sup>0</sup> 52' 22".73	51 <sup>0</sup> , 48' 58".78
7	Montessori College Nijmegen	5 <sup>0</sup> 52' 59".32	51 <sup>0</sup> , 49' 58".65
8	Stedelijke Scholengemeenschap Nijmegen	5 <sup>0</sup> 50' 43".82	51 <sup>0</sup> , 49' 29".60

Tabel 3.9: Positie van de HiSPARC detectoren in de stad Nijmegen.

Voor een drievoudige coïncidentie bestaat de data voor een event uit 13 regels. Hieronder staat een voorbeeld (waarbij hier de regels 4-5, 8-9 en 12-13 ingekort zijn omdat die uit 256 getallen en het signaal van de fotoversterkerbuizen beschrijft):

1e regel:	3 1 2 6	identificatie
2e regel:	200807241650371593221	tijdstempel station 1
3e regel:	20 -128 10000 0.5	instellingen station 1
4e regel:	17 12 15 15 17 20 15 17...	signaal station 1-plaat 1
5e regel:	-22 -24 -22 -29 -24 -29...	signaal station 1-plaat 2
6e regel:	200807241650371593187	tijdstempel station 2
7e regel:	20 -128 10000 0.5	instellingen station 2
8e regel:	27 22 27 22 27 27 27...	signaal station 2-plaat 1
9e regel:	0 -5 5 5 2 0 0 2 5 5...	signaal station 2-plaat 2
10e regel:	200807241650371593221	tijdstempel station 6
11e regel:	20 -128 10000 0.5	instellingen station 6

12e regel: -7 0 5 7 10 10 7 2 2...

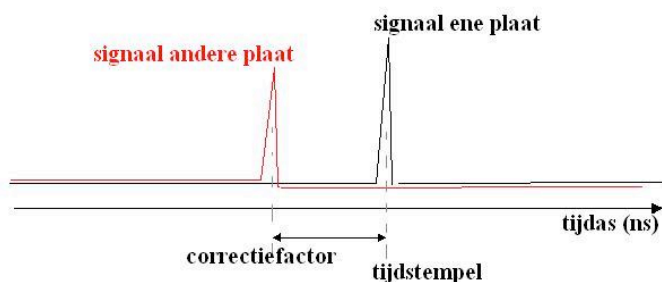
signaal station 6 -plaat 1

13e regel: -20 -22 -32 -34 -37...

signaal station 6-plaat 2

De identificatieregel geeft aan dat het een drievoudige coïncidentie geweest is tussen stations 1, 2 en 6. Het tijdstempel is een getal van 21 cijfers en bestaat uit (het getal achter de komma is het aantal gebruikte cijfers): jaar(4), maand(2), dag(2), uur(2), minuten(2), seconden(2) en subseconden(7). Voordat er gerekend kan worden moeten de volgende correcties uitgevoerd worden op die tijdstempels:

- Voor station 1, vanwege een afwijkende GPS, moet er voor coïncidenties vóór 1-1-2006 bij de tijd 4700 ns opgeteld worden.
- Voor station 2 en 3 moet er altijd (afwijkende GPS) 4700 ns bij de tijd opgeteld worden
- Voor alle stations moet er een correctie plaats vinden omdat een coïncidentie bestaat uit een combinatie van twee signalen. De tijdstempel is de tijd van de tweede piek terwijl de eigenlijke aankomsttijd van het front de tijd van de eerste piek is (Figuur 3.40). Het tijdsverschil van de twee pieken moet opgezocht worden en van het tijdstempel afgetrokken (voor het hierboven gegeven voorbeeld zijn de correctietijden respectievelijk 0 – 280 - 0 ns, deze zijn te vinden in de bijlage <RICHTINGENCORRECTIES.TXT>).



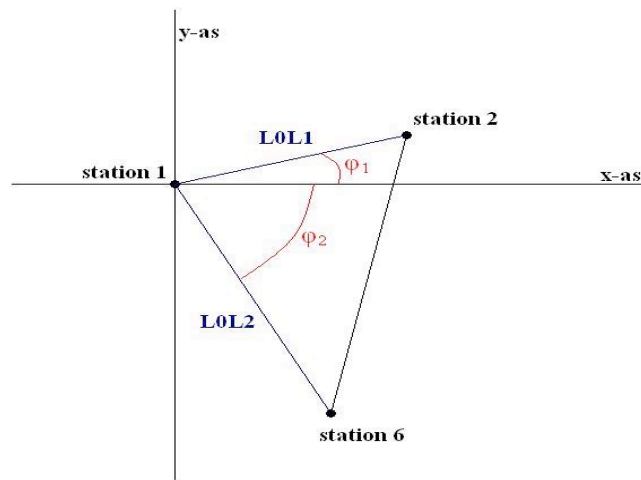
*Figuur 3.40: Tijdsverschillen tussen de signalen in de beide platen geven een correctiefactor; de 'eerste' piek bepaalt het tijdstempel.*

Bij de berekening van de hoeken moet er ook een correctie toegepast worden, een z.g. 'kwadranten-aanpassing' (Figuur 3.41). Omdat je van te voren niet de plaats van de stations weet maar je redeneert wel van het eerste genoemde station naar het tweede.

	I	II	III	IV
sin	+	+	-	-
cos	+	-	-	+
tan	+	-	+	-

*Figuur 3.41: Kwadrantenschema.*

Ligt de verbindingslijn  $L_0L_1$  in het tweede kwadrant dan is  $x$  negatief en  $y$  positief. Dat geeft voor  $\phi$  een negatieve hoek (tussen  $0$  en  $-90^\circ$ ). Voor de  $\sin$ ,  $\cos$  en  $\tan$  is dat een hoek uit het IV<sup>e</sup>-kwadrant. De plussen en minnen vallen dan net anders wat de berekening van  $\phi$  en  $\theta$  verstoort. Bij de in dit geval berekende hoek moet  $180^\circ$  worden opgeteld om hem in het II<sup>e</sup>-kwadrant te krijgen. Ligt de verbindingslijn  $L_0L_1$  in het derde kwadrant dan is  $x$  negatief én  $y$  negatief. Dat geeft voor  $\phi$  een positieve hoek (tussen  $0$  en  $90^\circ$ ). Voor de  $\sin$ ,  $\cos$  en  $\tan$  is dat een hoek uit het I<sup>e</sup> kwadrant. De plussen en minnen vallen dan weer anders dus moet je weer corrigeren. Bij de in dit geval berekende hoek moet  $180^\circ$  worden opgeteld om hem in het III<sup>e</sup> kwadrant te plaatsen.



Figuur 3.42: Driehoek die door de stations 1, 2 en 6 gevormd wordt.

Ligt de verbindingslijn  $L_0L_1$  in het eerste (Figuur 3.42) of vierde kwadrant dan is er geen correctie nodig. Voor het hier gegeven voorbeeld krijg je, als je de berekening met de hand gaat uitvoeren, de volgende waarden, met coördinaten station 1 (0, 0), station 2 (431, 262) en station 3 (301, -777):

$$\begin{aligned}
 L_0L_1 &= \sqrt{431^2 + 262^2} = 504 \text{ meter} \\
 L_0L_2 &= 834 \text{ meter} \\
 \tan \varphi_1 &= \frac{262}{431}, \varphi_1 = 31,3^\circ \\
 \varphi_2 &= 68,8^\circ
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

De tijd ( $t_1$ ) waarop de shower bij station 1 aankwam haal je uit het tijdstempel. Alleen de laatste 7 cijfers zijn van belang. De correctiefactor voor  $t_1 = 0$  ns;  $t_1 = 0,159322100$ .  $t_2 = 0,159318700$  plus de GPS-correctie van 4700 ns min de correctiefactor van 280 ns geeft:  $t_2 = 0,159323120$ .  $t_3 = 0,159322100$  zodat:

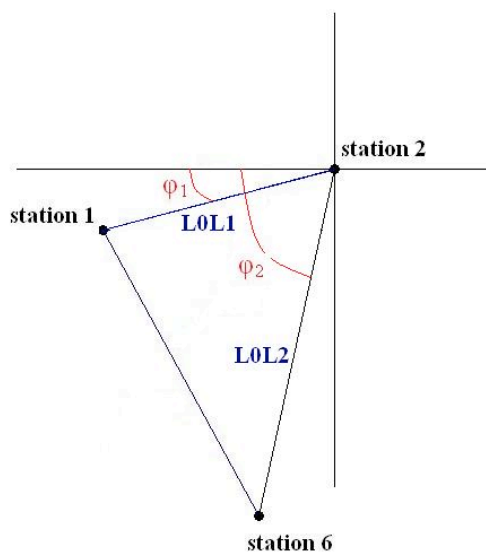
$$\begin{aligned}
 T_1 &= t_1 - t_2 = -1020 \text{ ns} \\
 T_2 &= t_1 - t_3 = 0 \text{ ns}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

terwijl  $k = 0$ !

$$\tan(\varphi) = \frac{-\cos(-68,8)^\circ}{\sin(-68,8)^\circ} \quad \varphi = 21,2^\circ$$

$$\sin(\theta) = \frac{0,3 \text{ m/ns} \cdot 1020}{504 \cdot \cos(21,2 - 31,3)} \quad \theta = 38,1^\circ$$
(3.12)

Zou je als nulpunt niet station 1 maar 2 genomen hebben dan krijg je de volgende driehoek (Figuur 3.43):



Figuur 3.43: Tekening driehoek 2-1-6.

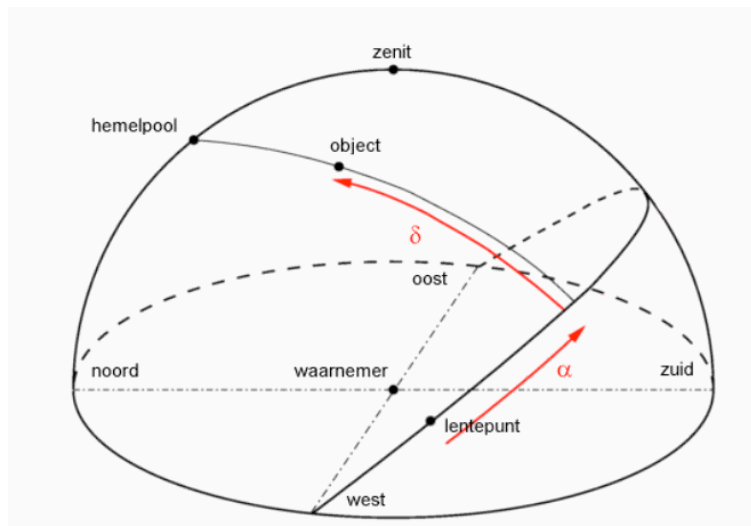
Omdat alle benodigde coördinaten negatief zijn wordt de tangens van  $\varphi_1$  én van  $\varphi_2$  positief wat een hoek in het eerste kwadrant geeft. Tel je daar  $180^\circ$  bij op om weer in het derde kwadrant uit te komen dan krijg je daarna dezelfde  $\varphi$  en  $\theta$ .

Nu lijkt bovenstaande berekening een mooie uitkomst te hebben maar er moet nog een correctie op plaats vinden die zijn oorsprong heeft in het hierboven reeds beschreven 'kwadranten probleem'. De  $\varphi$  die hierboven worden berekend met de sinus en tangens en dan kom je altijd in kwadrant 1 of 4 uit maar dat hoeft niet de richting van het deeltje te zijn, daar moet je op corrigeren waarbij je wel onderscheid maakt tussen die deeltjes die wel de goede  $\varphi$  toegewezen hebben en niet. Het kan in dit geval  $21,2^\circ$  of  $21,2^\circ + 180^\circ = 201,2^\circ$  zijn. Een tweede correctie moet plaatsvinden op de  $\theta$ , vul je de juiste  $\varphi$  in dan moet die hoek positief worden, je buigt dan vanuit de z-as in de richting van waar het deeltje gekomen is. Dit wil zeggen dat je in voorkomende gevallen de  $\theta$  positief moet maken, om via een correctie de juiste  $\varphi$  te vinden. Wat de juiste  $\varphi$  moet worden bepaal je weer met de vergelijkingen in (3.7) alleen vul je nu de gevonden  $\theta$  in om de  $\varphi$  te bepalen.

Dit zal weer twee mogelijkheden opleveren waarbij een van die twee gelijk is aan een van de twee eerder gevonden waarden. Voor het berekende voorbeeld krijg je dan ( $\theta = 38,1^0$ ):

$$\begin{aligned} \cos(\varphi - \varphi_1) &= cT_1 / (L_0 L_1 \cdot \sin(\theta)) \\ \cos(\varphi - \varphi_1) &= 0,3 \cdot -1020 / (504 \cdot \sin(38,1)) = -0,984 \\ \varphi - \varphi_1 &= 169,9^\circ \quad \varphi = 169,9^\circ + 31,3^\circ = 201,2^\circ \\ \varphi - \varphi_1 &= 360^\circ - 169,9^\circ \quad \varphi = 360^\circ - 169,9^\circ + 31,3^\circ = 221,4^\circ \end{aligned} \tag{3.13}$$

De juiste  $\phi$  is dus de  $201,2^0$  want die komt bij beide voor. Na de berekening en correctie van die  $\phi$  en  $\theta$  weet je de richting waarin je, op het moment van inslag {datum én tijdstip} had moeten kijken om het front (en dus het kosmische deeltje) aan te zien komen. Dat geeft niet de plaats aan in het heelal vanuit waar het deeltje gekomen is. Die  $\phi$  en  $\theta$  moeten daarvoor omgezet worden naar (bv) het equatoriale coördinatenstelsel (Figuur 3.44), ra en dec, om aan te geven welk punt aan de hemelbol het vertrekpunt van het deeltje geweest is. De omrekening van de  $\phi$  en  $\theta$  naar de ra en dec van het equatoriale coördinatenstelsel gebeurt door een programma gemaakt door Harm Schoorlemmer [30].



Figuur 3.44: Het equatoriaal coördinatenstelsel.

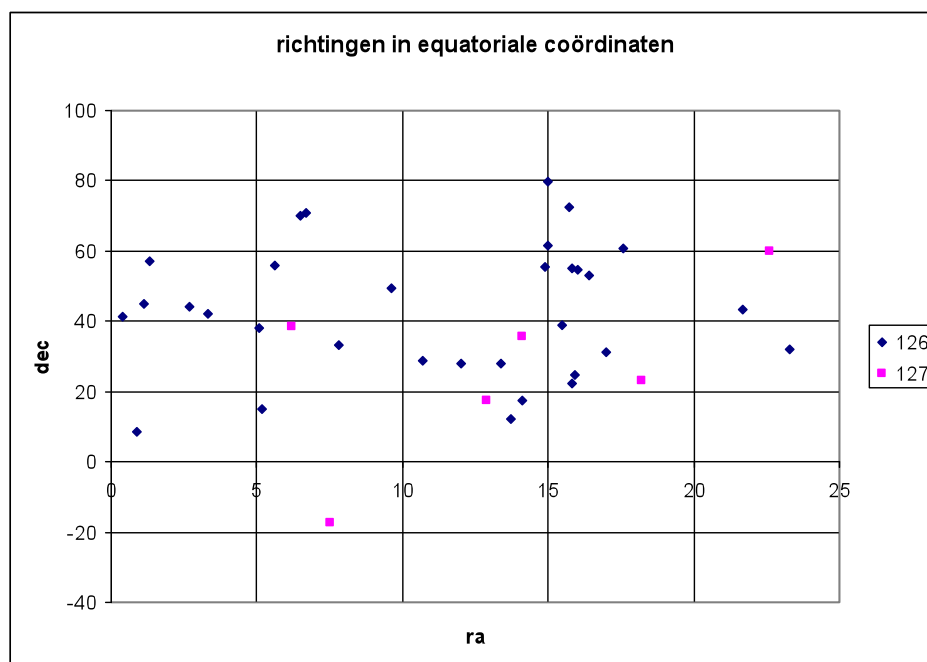
Door de ruim gekozen coïncidentietijd levert niet elke drievoudige coïncidentie een  $\phi$  of  $\theta$  op. De  $T_1$  of  $T_2$  wordt simpelweg te groot<sup>3</sup>.

Wij hebben deze rekenmethode toegepast op alle, in Nijmegen gemeten, drievoudige coïncidenties. Zie hiervoor het programma <PROGRAM\_RICHTINGEN.C> (of <PROGRAM\_RICHTINGEN MET UITLEG.RTF>) In de datafile <DRIEVOUDIGAANGEPAST2> staan de gegevens van alle drievoudige coïncidenties tussen de acht Nijmeegse stations. De file <RICHTINGEN126.TXT> geeft de uiteindelijke berekende waarden voor detector-driehoek 1-2-6 en de file <RICHTINGEN127.TXT> geeft de uiteinde-

<sup>3</sup> Het is opvallend dat de combinatie 1-2-6 met voorsprong de grootste kans heeft om een drievoudige coïncidentie te meten (32 van de 47). Dat ligt er waarschijnlijk aan dat die driehoek de kleinste oppervlakte heeft en geeft een aanwijzing van de grootte van de mogelijke 'pannenkoek'. Van de overige 'driehoeken' heeft 1-2-7 nog een aantal hits (6 van de 47). Alle andere komen 1x voor en zullen onder de noemer 'achtergrond' vallen.

lijke berekende waarden voor detectordriehoek 1-2-7. In deze twee files staat naast de T1 en T2 ook  $T3 = t_1 - t_3$  afgedrukt. De min in sommige gevallen is een 'richtingsmin' en geeft aan of de lawine van 1 naar 2 ging of omgekeerd. Logischer wijze moet gelden dat, als de volgorde van raken bv 1-2-6 is, de tijd van 1-2 + de tijd van 2-6 gelijk is aan de tijd van 1-6. Praktisch gezien moet dan de grootste tijd gelijk zijn aan de som van de twee kleinste (de minnen even weggelaten). Dit klopt bij alle geregistreerde coïncidenties, wat aan zal geven dat het front als een plat vlak te beschouwen is. De file <RICHTINGENCORRECTIES.TXT> geeft de benodigde correctiefactoren.

Zet je de zo gevonden equatoriale coördinaten uit in een grafiek dan krijg je het diagram in Figuur 3.45. Komen er in de komende jaren meer drievoudige coïncidenties dan zul je, mocht de kosmische straling van een aantal bronnen in het heelal komen, een paar clusters van punten vinden. Daar is nu nog niet veel van te zien.



*Figuur 3.45: Richting van hoogenergetische kosmische deeltjes in het equatoriale stelsel.*

Dat het richtingenonderzoek van de HiSPARC opstellingen actueel is bleek weer op 11-07-2009 toen daarover een artikel (zie Appendix C) in de NRC verscheen. Een mogelijke bron is geïdentificeerd nu moeten wij nog laten zien dat er vanuit die richting ook inderdaad straling komt.

### 3.3.13 Richting van de as van de lawine

Natuurlijk is er invloed van het weer op de HiSPARC-metingen. In ieder geval is er invloed aan te wijzen op het aantal coïncidenties dat een station per uur meet. In het algemeen zal gelden dat er minder coïncidenties per uur zullen zijn als er meer lucht boven de detector zit. Daar kunnen twee redenen voor aangewezen worden:

- Meer lucht wil zeggen dat het kosmisch deeltje gemiddeld eerder, dwz. hoger boven het aardoppervlak, zal botsen met een luchtmolecuul en daardoor zal de deeltjesregen (shower, pan-

nenkoek) eerder 'uitgestorven' of 'uitgedund' zijn. Het kosmisch deeltje produceert bij zo'n botsing in eerste instantie pionen die later uiteenvallen naar o.a. muonen. De levensduur van die muonen is niet zodanig groot dat het zeker is dat ze dan het aardoppervlak halen.

- Meer lucht wil ook zeggen dat de shower-deeltjes minder ongestoord naar het aardoppervlak kunnen komen. Dat wil weer zeggen dat de shower sterker uitgedund zal worden waardoor, door een station, minder coïncidenties gemeten zullen worden.

Bij de Radboud Universiteit is daarom ook een weerstation aan de HiSPARC opstelling toegevoegd. Tussen 2003 (week 20) en 2008 (week 17) zijn verschillende weergegevens opgeslagen waarbij er elk kwartier een meting verricht is. Hierbij moet je denken aan;

- Temperatuur en gevoelstemperatuur.
- Luchtvochtigheid.
- Luchtdruk.
- Neerslag.

Bliksem kan ook een invloed hebben op de metingen van een station maar wordt niet gemeten, dat is dus iets wat handmatig bijgehouden moet worden. De correlatie tussen deze grootheden en de coïncidentieaantallen per uur, kunnen antwoord geven op de vraag of de hierboven geschetste invloeden ook inderdaad juist en te zien zijn.

Bij het inlezen en verwerken van de weerdata kwamen een aantal problemen naar voren die in eerste instantie voor een jaar (2006) opgelost zijn. In het programma <WEER2006.C> zie je de uitwerking van volgende (het bestand <weer2006 met uitleg> geeft nadere uitleg over de verschillende stappen):

- Er zijn ongeveer 220 weken gegevens verzameld; er zouden dus evenveel 'weekfiles' moeten zijn. Door een of andere oorzaak ontbreken er een aantal weekfiles.
- Soms heeft een jaar 52, soms 53 weken.
- Soms ontbreekt er een dag, bijv. 01-01-2006. Deze zit niet in week 1 van 2006 maar ook niet in week 53 van 2005.
- Soms ontbreekt er een gedeelte van de weekfile. Begin, midden, eind?
- Soms is er niet vier keer per uur maar drie of twee keer per uur een meting opgeslagen.
- Zomertijd en wintertijd. Een lastig probleem omdat dat elk jaar op een andere dag begint/eindigt en het niet zeker is dat die dagen ook in de beschikbare metingen voorkomen. Vandaar dat de begin en eindmomenten zijn omgerekend naar een uurnummer waarop de zomertijd in het desbetreffende jaar gestart/gestopt is (zie Tabel 3.10)<sup>4</sup>.

Het programma <ENTRIESUUR.C> haalt uit de door ons gemaakte textfiles het aantal events per uur van een detector. Bij de verwerking van de data van beide genoemde programma's heb je nog het

---

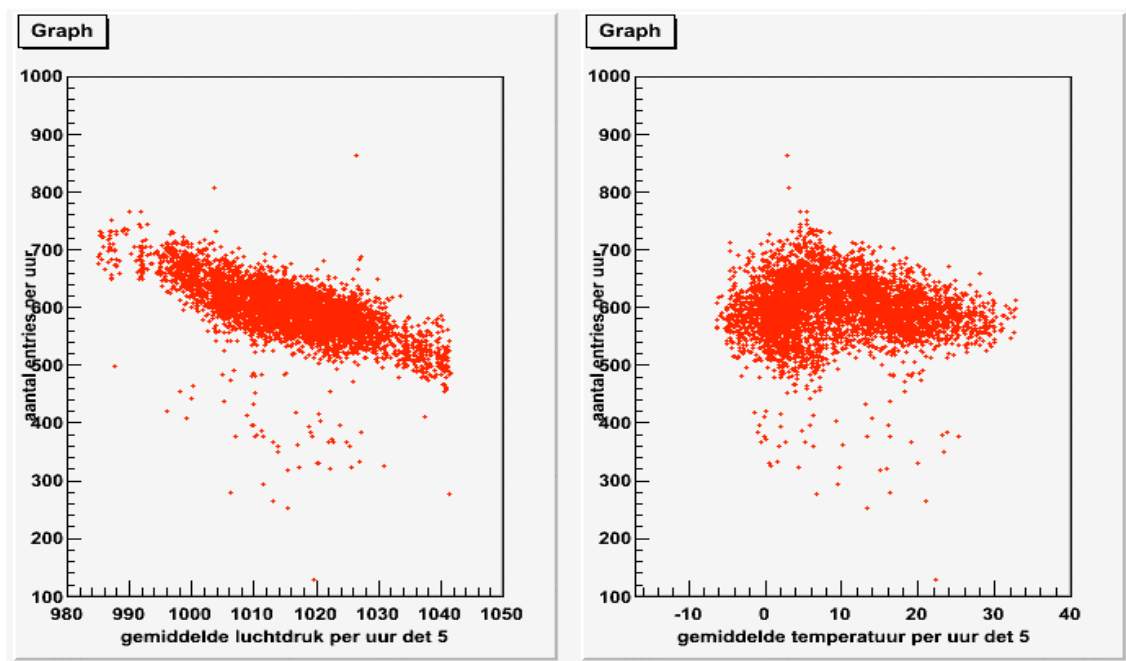
<sup>4</sup> De uurteller bereken je simpelweg door het aantal dagen voor de start/einde te bepalen. Dat aantal vermenigvuldig je met 24 en je telt er 2 bij op omdat het begin/einde van de zomertijd om 02.00 uur valt. Deze getallen vind je terug in het programma <WEER2006.C>.

probleem dat de tijd bij de weerdata de gewone Nederlandse tijd is en bij de HiSPARC data is dat de GMT. De eerste met zomertijd, de andere zonder. Vandaar dat er bij het wegschrijven van de weerdata meteen een correctie naar de GMT gemaakt is en daarom de eerste regel in de datafile met een negatieve uurteller (meting die eigenlijk volgens de GMT in 2005 plaatsgevonden heeft) is weggelaten.

Jaar	Start zomertijd	Einde zomertijd
<b>2003</b>	30 maart	26 oktober
<b>Uurteller:</b>	2114	7154
<b>2004 (schrikkeljaar)</b>	28 maart	31 oktober
<b>Uurteller:</b>	2090	7298
<b>2005</b>	27 maart	30 oktober
<b>Uurteller:</b>	2042	7250
<b>2006</b>	26 maart	29 oktober
<b>Uurteller:</b>	2018	7226
<b>2007</b>	25 maart	28 oktober
<b>uurteller:</b>	1994	7202
<b>2008 (schrikkeljaar)</b>	30 maart	26 oktober
<b>uurteller:</b>	2138	7178

Tabel 3.10: Effectieve aantal uren dat weergegevens opgeslagen zijn.

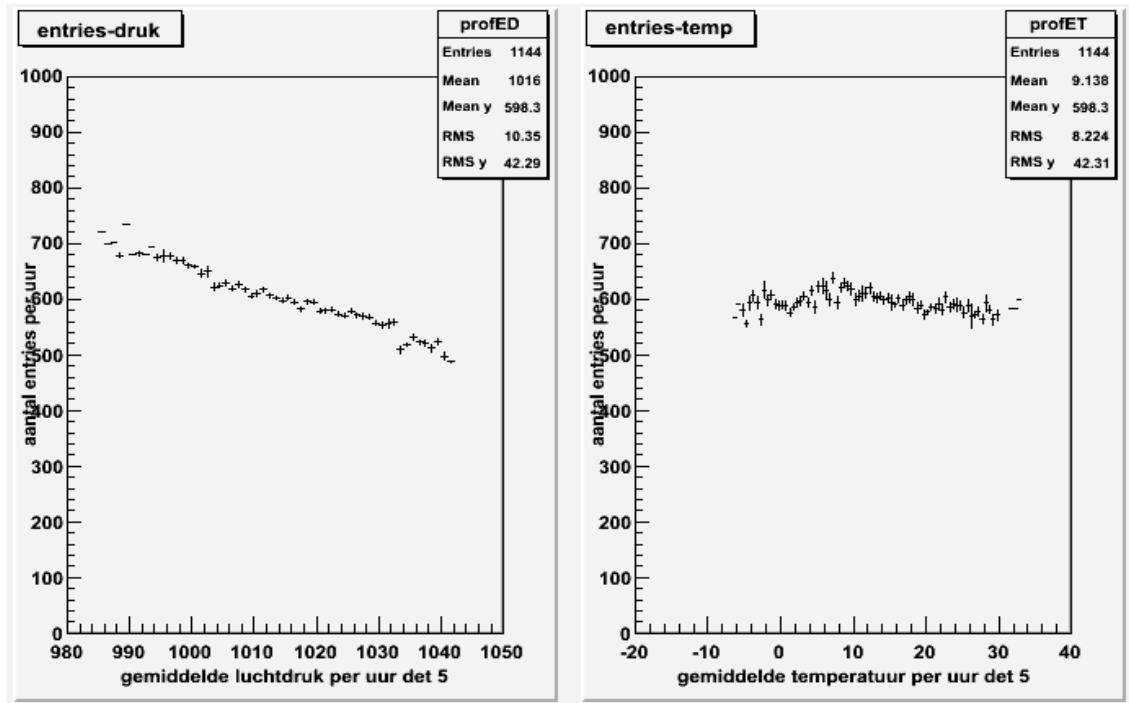
Een eerste weergave van de resultaten is simpelweg een plot (Figuur 3.46) met horizontaal de luchtdruk (links) en temperatuur (rechts) en vertikaal het aantal events per uur.



Figuur 3.46: Relatie tussen luchtdruk (links) / temperatuur (rechts) met het aantal events per uur voor detector 5 in 2006.

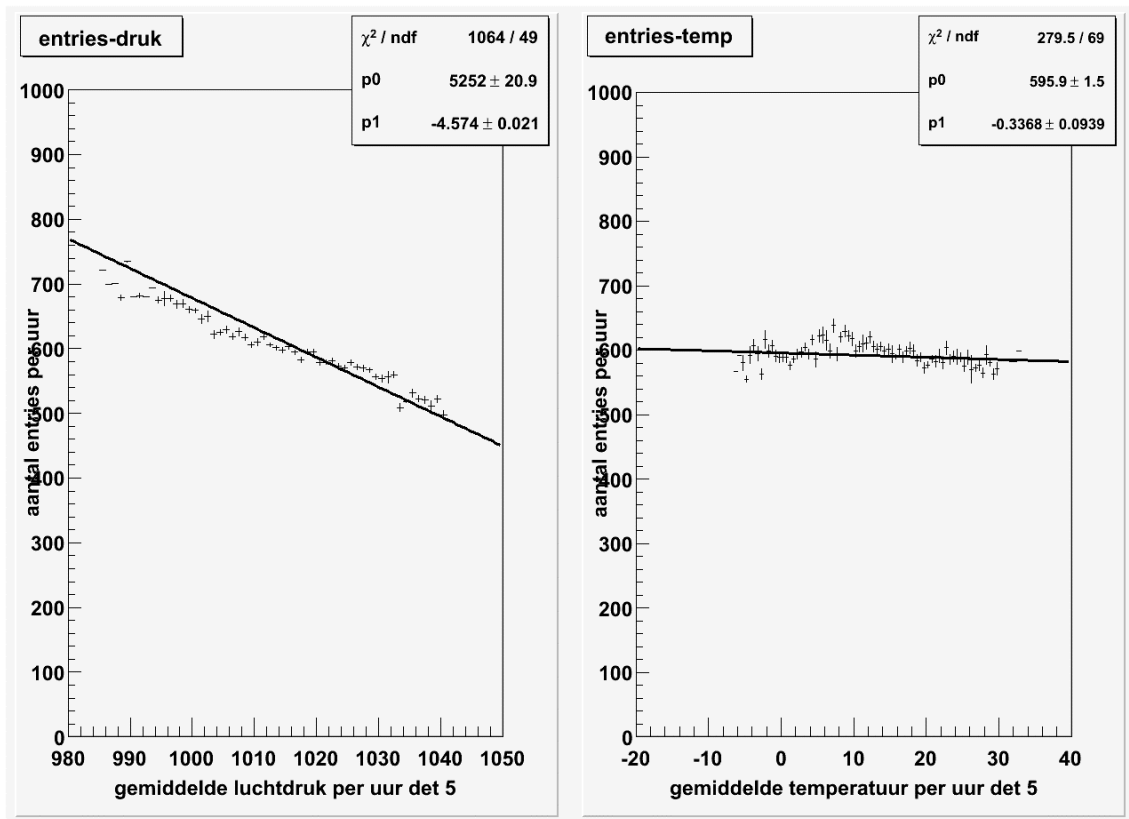


Dit geeft al wel een aanduiding van de aanwezigheid van een verband tussen aantal events en druk en een afwezigheid van een verband tussen aantal events en temperatuur. De puntenwolken zijn echter 'vaag'. Een duidelijker beeld ontstaat wanneer de correlaties in een profile-histogram worden weergegeven (Figuur 3.48).



Figuur 3.47 Profile histogrammen met daarin de relatie tussen luchtdruk (links) / temperatuur (rechts) met het aantal events per uur voor detector 5 in 2006.

Hier staat horizontaal de druk (links) en de temperatuur (rechts), onderverdeeld in een aantal gebiedjes, met vertikaal het gemiddelde van de aantallen events dat bij zo'n gebiedje (druk of temperatuur interval) hoort (horizontaal streepje) én de statistische afwijking op dat gemiddelde (vertikaal streepje). Het verband tussen druk en aantal events (in dit geval van detector 5) is duidelijk; hoe groter de luchtdruk des te lager het aantal events. Het verband tussen temperatuur en aantal events is minder goed zichtbaar. Om een beter beeld te krijgen van deze verbanden hebben we de grafieken opnieuw bewerkt en een lineaire fit gedaan op de gemeten waarden (Figuur 3.48). Hieruit zijn dan per detector de richtingscoëfficiënten van de fit te bepalen. Deze geven de af- of toename van het aantal events weer bij veranderingen van druk of temperatuur.



Figuur 3.48: Lineaire fits op de relaties tussen luchtdruk en temperatuur resp. met het aantal events per uur voor detector 5 in 2006.

Voor de luchtdruk geldt dat de gemiddelde afname 4,958 events per millibar is. Dus iedere 10 mbar hogere luchtdruk veroorzaakt een daling van ca. 50 events per uur. Goed te zien is dat, hoewel de afname per detector verschillend is, alle detectoren dezelfde trend laten zien (Tabel 3.11)<sup>5</sup>.

Detector	events per uur/millibar	events per uur/graad Celsius
1	-7,123	+10,85
2	-10,01	-1,994
3	-1,782	-4,921
4	-5,370	-8,629
5	-4,574	-0,337
6	-4,352	-0,300
7	-3,744	-0,350
8	-2,710	+1,197

Tabel 3.11: Daling van het aantal events per uur als functie van luchtdruk en temperatuur voor de detectoren in de stad Nijmegen.

<sup>5</sup> Gezien de vele veranderingen in instellingen van de meetstations 1, 2 en 3, vooral in de eerste jaren na ingebruikname, is het de vraag of het middelen van de meetresultaten gewenst of zelfs toelaatbaar is.

Bij de temperatuur geldt een gemiddelde afname van 0,561 in het aantal events per uur per graad Celsius. Hierbij moeten we wel aantekenen dat de spreiding erg groot is. De weersgrootheden waar wij naar kunnen kijken zijn, zeker temperatuur, lokale grootheden. Dit wil zeggen het speelt zich in de buurt van het meetstation af. De invloed daarvan zal niet groot zijn. Dat er ook grootschalige effecten te meten zijn blijkt uit het NRC-artikel van 31-01-2009 in Appendix C.

### **3.3.14 Conclusie**

Het onderzoek zoals door ons is uitgevoerd heeft een aantal onderzoeksvragen (deels) wel en een aantal niet kunnen beantwoorden. Van de MPV waarde kunnen we zeggen dat deze in de tijd langzaam afneemt. Hierbij tekenen we echter wel aan dat dit geldt wanneer aan de instellingen van het meetstation niets verandert. Een kleinere of grotere correctie op de instellingen van de fotoversterkerbuis kan de MPV waarde sterk beïnvloeden. Het aantal events neemt duidelijk af in de tijd. Dit zien we bij alle meetstations gebeuren. Ook hiervoor geldt dat de (wijziging van) instellingen een grote invloed kunnen hebben. Bij sommige meetsystemen (vooral stations 3 en 6) zien we periodieke verschijnselen jaarlijks terugkomen. We hebben hierop extra analyses gedaan maar geen verklaring voor dit verschijnsel kunnen vinden.

Uit de afname van de MPV waarde en het aantal events blijkt al dat meetsystemen aan veroudering onderhevig zijn. Dit kan deels gecorrigeerd worden door het veranderen van de instellingen van de fotoversterkerbuis, maar uit metingen blijkt ook dat de verwerkingstijd van de meetsystemen toeneemt in de tijd. Uit de analyses blijkt dat de tijd tussen twee opeenvolgende events toeneemt over de jaren. Daarnaast hebben alle systemen te maken met een tijd dat er geheel niet wordt waargenomen, door ons 'Dode Tijd' genoemd. Per systeem is de dode tijd nogal verschillend. We hebben niet gekeken of de dode tijd per systeem ook is veranderd over de jaren. In de analyses blijkt dat signaal en ruis heel duidelijk van elkaar te scheiden zijn. De tijdbegrenzing van het systeem is duidelijk terug te vinden in de meetresultaten.

Van alle in Nijmegen gemeten drievoudige coïncidenties is de richting bepaald. Niet bij alle drievoudige coïncidenties was deze bepaling mogelijk. Dit wijst erop dat er een aantal toevallige events tot een drievoudige coïncidentie zijn geworden. Dit heeft te maken met de ruime begrenzing van het coïncidentie interval (ca. 1200 ns). Heel duidelijk blijkt dat naarmate de fysieke afstand tussen de platen kleiner wordt er meer coïncidenties waar te nemen zijn. Analyse van de meetresultaten heeft geen bewijs gevonden voor de stelling dat het mogelijk is dat twee of meer muonen een scintillatieplaat gelijktijdig zouden passeren. De kans hierop lijkt dus erg klein te zijn. Tijdens de analyses met behulp van histogrammen is gebleken dat de manier van binning een grote stempel kan drukken op het eindresultaat.

De beschikbaarheid van de meetsystemen is een punt van zorg. Uitval van spanning, wisseling van de personele bezetting van een school en dergelijke leiden er toe dat een meetsysteem regelmatig voor kortere of langere tijd uitvalt. De nieuwe hardware die beschikbaar gaat komen zal het beheer waarschijnlijk vergemakkelijken.

Duidelijk is dat de atmosferische omstandigheden (luchtdruk) invloed hebben op het aantal gemeten events. Bij alle meetstations is er een trend waarneembaar die aangeeft dat het aantal events afneemt met toenemende luchtdruk. De temperatuur lijkt op individuele stations wel invloed te hebben maar hierin is voorsnog geen trend te ontdekken.

### 3.4 Correlaties tussen HiSPARC en Auger data



*Figuur 3.49: Frank Poortenga – Dockinga College Dokkum - [31].*

Frank Poortenga is docent natuurkunde aan het Dockinga College te Dokkum [31] waar hij sinds 2000 lesgeeft in de bovenbouw van de Havo/VWO. Buiten het lesgeven om houdt hij zich op de hoogte van wetenschappelijk onderzoek door vakbladen en internet te raadplegen. Toen bekend werd dat de mogelijkheid ontstond om weer eens te kijken in de keuken van een onderzoekcentrum was zijn interesse gauw gewekt en heeft hij zich ingeschreven als leraar in onderzoek (LIO).

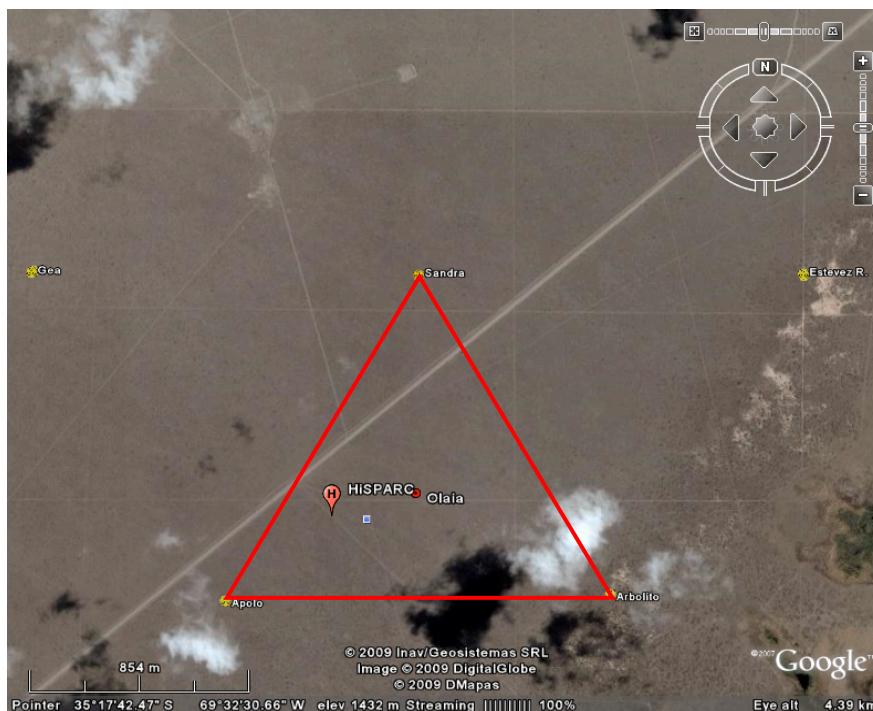
#### 3.4.1 Onderzoeksopdracht

Is er een correlatie tussen het aantal deeltjes in een ‘airshower’, dat geregistreerd wordt op het aardoppervlak met behulp van deeltjesdetectoren van het Pierre Auger Observatorium [11] in Argentinië, en de grootte van het signaal dat de HiSPARC opstelling geeft van hetzelfde event?

#### 3.4.2 Introductie

Kosmische stralen met een zeer hoge energie veroorzaken hoog in de atmosfeer een lawine aan secundaire deeltjes, waarvan een aantal het aardoppervlak kan bereiken. Vanwege de enorme snelheid die de kosmische straal heeft, zullen vrijwel alle secundaire deeltjes in de lawine dezelfde richting hebben als die van de oorspronkelijke kosmische straal. Deze richting is een denkbeeldige lijn die door de atmosfeer gaat en waarlangs het centrum van de deeltjeslawine zich lijkt voort te bewegen. Deze lijn wordt de kern van de deeltjeslawine genoemd. Men vindt het grootste aantal secundaire deeltjes dicht bij deze kern en als functie van de afstand tot deze kern neemt het aantal secundaire deeltjes per oppervlakte eenheid snel af. Door over een bepaald gebied detectoren te plaatsen kan men het aantal geregistreerde deeltjes bepalen als functie van de afstand tot de kern. Daarmee kan men de aankomstrichting en de energie van de oorspronkelijke kosmische straal bepalen. Dit meetprincipe, dat ook toegepast wordt binnen HiSPARC, is ontwikkeld door Pierre Auger, een Franse natuurkundige. Op

een hoogvlakte in Argentinië, dicht tegen het Andesgebergte, staan in het Pierre Auger Observatorium [11] 1600 deeltjesdetectoren, die dag en nacht gebruikt worden voor wetenschappelijk onderzoek naar de oorsprong van kosmische stralen met een zeer hoge energie. Deze detectoren bestaan uit watergevulde tanks (diameter 3.6 meter en hoogte 1.55 m), waarmee een aantal van deze secundaire deeltjes geregistreerd kunnen worden. Omdat deze deeltjes een zeer hoge snelheid hebben (vrijwel de snelheid van het licht in vacuüm) ontstaat in het water van de tank Cherenkov straling, dat met behulp van fotogevoelige meetapparatuur waargenomen kan worden. Hoe meer secundaire deeltjes door de watertank vliegen, des te groter is het lichtsignaal, dat wordt geregistreerd. De grootte van het lichtsignaal wordt uitgedrukt in de VEM eenheid (in het Engels *Vertical Equivalent Muon*). Een waarde van 1 VEM komt overeen met de lichtopbrengst per  $m^2$ , die in de tank veroorzaakt wordt door een muon, dat verticaal door het midden van de tank is gegaan. Dit is een betrouwbaarder getal dan de 'gewone' flux omdat een kosmische straal zelden recht van boven komt: de zenit hoek  $\theta$  voor dergelijke kosmische stralen is dan:  $\theta = 0^\circ$ .



*Figuur 3.50: Google Earth kaart van een gedeelte van het Pierre Auger Observatorium in Argentinië. De HiSPARC detector (H; rode ballon) is geplaatst in de driehoek met als hoekpunten de watertanks Apolo, Arbolito en Sandra (gele punten). In het midden van deze drie tanks staat de tank 'Olaiá' (rode punt).*

Een vergelijkbare meting kan worden uitgevoerd met de grootte van het lichtsignaal dat ontstaat in de scintillatorplaten van een HiSPARC detector, die geplaatst is tussen een aantal van de Auger watertanks. Ook deze scintillatorplaten worden met behulp van een fotogevoelige sensor (in dit geval een fotomultiplicatorbuis) en de HiSPARC elektronica uitgelezen en geregistreerd in het geheugen van een computer. Deze gemeten waarden, die afkomstig zijn van de scintillatorplaat moeten dus gecorrigeerd worden voor de hoek waaronder de secundaire deeltjes door de scintillatorplaat gegaan zijn. De

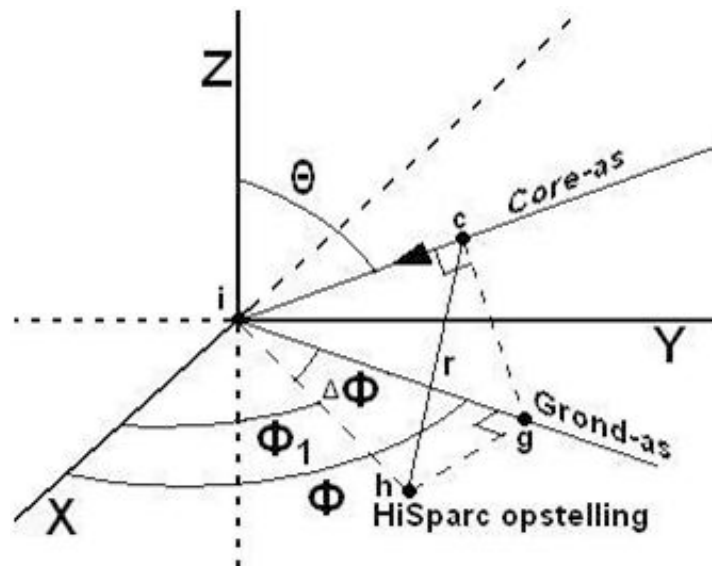
HiSPARC opstelling was niet vlak naast een van de tanks geplaatst maar op een afstand van ongeveer 340 m van de dichtstbijzijnde watertank Olaia (zie Figuur 3.50).

De gegevens, die met de watertanks zijn verkregen en de gegevens van de HiSPARC opstelling worden apart geregistreerd, ieder met een eigen computersysteem. Pas achteraf worden de gegevens van de beide meetopstellingen met elkaar gecombineerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van tijdstempels, die worden weggeschreven bij iedere gebeurtenis, die geregistreerd wordt voor de watertanks en afzonderlijk daarvan ook voor iedere gebeurtenis in de HiSPARC opstelling. In beide gevallen zijn deze tijdstempels gebaseerd op GPS Tijdbepalingen.

De VEM-waarde ter plaatse van de HiSPARC opstelling is vervolgens met behulp van een interpolatie te bepalen. Hiervoor wordt de zogenaamde NKG-LDF functie [32] gebruikt. Deze functie is beschikbaar via het analyse pakket voor de data van het Pierre Auger Observatorium.

$$S(r) = S_{1000} \times \left( \frac{r}{1000} \right) \times \left( \frac{r+700}{1700} \right)^\beta \quad (3.14)$$

Experimenteel is vastgesteld dat de signaalsterkte  $S(r)$ , uitgedrukt in de VEM-waarde, afhangt van de afstand  $r$  tot kern van de deeltjeslawine en van de hoek waarmee de kosmische straal de dampkring is binnengedrongen. Deze hoek wordt beschreven door de zenit hoek  $\theta$  en de azimuthale hoek  $\phi$  en is geparametriseerd via de variabele  $\beta$ . Om de VEM-waarde bij de HiSPARC opstelling te kunnen bepalen moet je dus de afstand weten tussen de kern van de deeltjeslawine en de positie van de HiSPARC opstelling. Het bepalen en daarna het gebruiken van de VEM-waarde voor de locatie van de HiSPARC opstelling zal alleen met behulp van interpolatie mogen gebeuren, dus waarbij de  $r$ -waarde van de HiSPARC opstelling ligt binnen die van de watertanks.



*Figuur 3.51: Definitie van het assenstelsel waarin de kleinste afstand ( $r$ ) tussen HiSPARC detector en het centrum ('core') van de lawine wordt bepaald.*

Extrapoleren wordt niet aanbevolen, omdat je dan met grote onzekerheden zit, dan wanneer je binnen de bekende  $r$ -waarden gaat zitten. Om tot de kleinste afstand te komen tussen de HiSPARC opstelling

en de kern van de deeltjeslawine kun je als volgt te werk gaan (Figuur 3.51). We definiëren:

- $x, y$ : afstand van impact van de kern van de lawine tot de HiSPARC opstelling gemeten in de noord-zuid richting ( $x$ ) en de oost-west richting ( $y$ )
- $r$ : kortste afstand tussen de HiSPARC opstelling en de as door de kern van de deeltjeslawine
- $\phi$ : hoek tussen de lijn naar het zuiden ( $X$ ) en de projectie van de as door de kern op het aardoppervlak (grond-as) van de deeltjeslawine
- $\phi_1$ : hoek tussen de lijn naar het zuiden ( $X$ ) en de HiSPARC opstelling (3.15)
- $\Delta\phi$ : verschil tussen  $\phi$  en  $\phi_1$
- $\theta$ : hoek tussen de verticaal ( $Z$ ) en de as door de kern van de deeltjeslawine

M.b.v. enkele goniometrische regels is te bepalen wat de kleinste afstand is tussen de HiSPARC-detector en een punt op de as door de kern van de deeltjeslawine (core-as):

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad & \tan \phi_1 = \frac{y}{x} \\
 \text{(b)} \quad & \Delta\phi = \phi - \phi_1 \\
 \text{(c)} \quad & hg = \sin(\phi - \phi_1) \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \\
 \text{(d)} \quad & ih = \sqrt{x^2 + y^2} \\
 \text{(e)} \quad & ig = \sqrt{ih^2 + hg^2} \\
 \text{(f)} \quad & cg = ig \cdot \cos \theta \\
 \text{(g)} \quad & r = \sqrt{hg^2 + cg^2}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Vervanging van de relaties a t/m f in g levert een relatie voor  $r$  waarin deze uitgedrukt wordt in  $x, y, \theta$  en  $\phi$ :

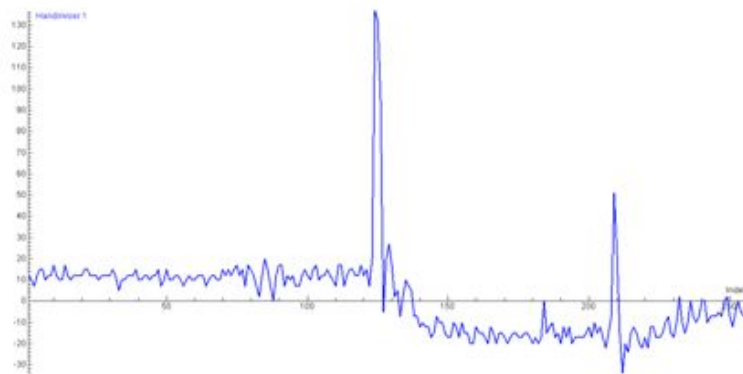
$$r^2 = (x^2 + y^2) \sin^2(\phi - \tan^{-1}(y/x)) + [x^2 + y^2 - (x^2 + y^2) \sin^2(\phi - \tan^{-1}(y/x))] \cos^2(\theta) \tag{3.17}$$

In deze formule zit een onvolmaaktheid: er is geen rekening gehouden met het hoogteverschil tussen de plaats van 'impact' van de deeltjeslawine op aarde en de plaats van de scintillatorplaat. Ik heb mijn berekende waarden verkregen met formule (3.17) vergeleken met de waarden verkregen vanuit het analyse pakket van Auger en ik zit er hooguit 1,0% naast. Dit verschil vervalst wanneer je gaat interpoleren met de VEM waarden. Mijn vraagstelling is of er misschien een correlatie is tussen de grootte van het signaal van de HiSPARC opstelling en de daarbij behorende geïnterpoleerde VEM waarde, die Auger mij biedt.

### 3.4.3 Signaal HiSPARC detector

Een typisch signaal dat de HiSPARC opstelling produceert is weergegeven in Figuur 3.52. Het signaal wordt opgedeeld in 256 stapjes die elk een waarde kan hebben tussen de -4998 mV en de + 4998 mV. Horizontaal heb je 256 stapjes en verticaal de bijbehorende gemeten waarde van de signaalgrootte van de fotomultiplicatorbuis. De verticale waarde kan niet elke waarde hebben maar kent een bepaalde stapgrootte die afhankelijk is van de resolutie van de conversie van een analog signaal naar





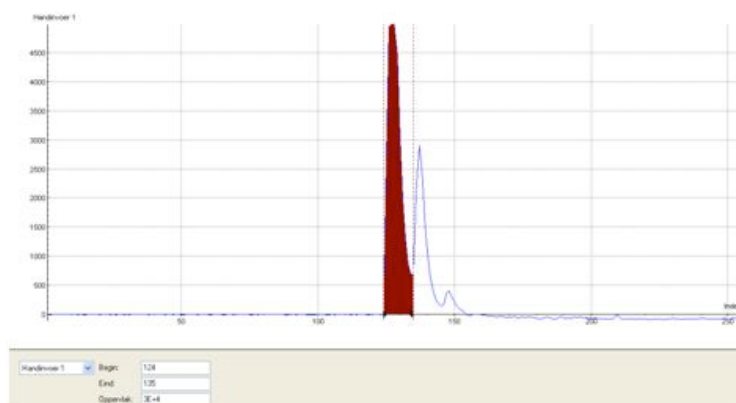
*Figuur 3.52: Signaal vanuit een HiSPARC opstelling, verticaal de piekhoogte en horizontaal de tijdas (256 stapjes = 10  $\mu$ s).*

een digitaal getal. De oppervlakte van de puls wordt bepaald door de waarden onder de pieklijn bij elkaar op te tellen (Figuur 3.53).



*Figuur 3.53: Oppervlakte van de piek.*

In deze oppervlakte is nog een gedeelte ruis meegenomen. Deze kan worden weggehaald door de gemiddelde 'ruiswaarde' te bepalen en deze van het totale oppervlak af te halen. De ruiswaarde heb ik bepaald door het gemiddelde van de eerste 100 meetwaarden te berekenen. Wanneer de piekbreedte bijvoorbeeld uit 7 stapjes bestaat dan worden er ook 7 keer de ruiswaarde af gehaald. Bij gro

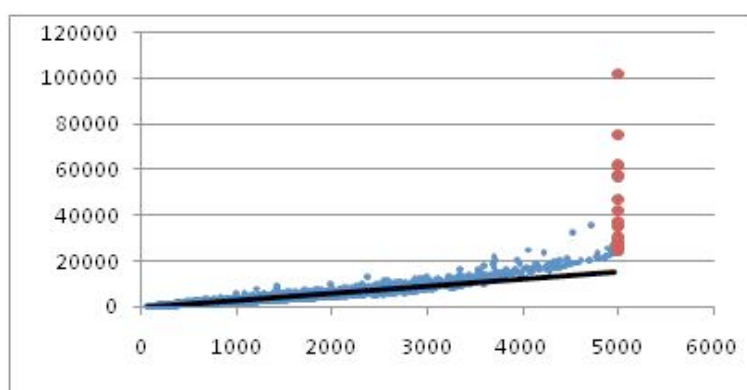


*Figuur 3.54: Oppervlakte van de piek met afgevlakte piektop.*

tere piekwaarden is de ruis van minder grote invloed, zoals in Figuur 3.54 te zien is.

Met Coach 6 (meten en analyseren, CMA [33]) is deze oppervlakte bepaald, aangezien je handmatig de pulsbreedte moet vaststellen heb ik dit voor enkele tientallen signalen gedaan en vergeleken met de oppervlakte berekening die Excel [34] automatisch kan doen. De verschillen zijn zeer klein te noemen (hiervan heb ik geen 'exacte' berekening van de fout gemaakt). Helaas lijkt het erop dat de fotomultiplicator buis bij een grote signaalsterkte in de verzadiging gedrukt wordt. Hierdoor is de oppervlakte minder goed te bepalen en zal dit softwarematig bepaald moeten worden. Of er moet aan de plaat een tweede fotomultiplicator gekoppeld worden die minder gevoelig is. Tevens kan ook de hoogspanning van de fotomultiplicator buis worden verlaagd. Hierdoor zal hij minder snel in de verzadiging worden gedrukt, maar hij zal ook minder metingen registreren.

Wanneer een muon door een scintillatorplaat gaat zal hij een klein gedeelte van zijn energie afstaan. Deze energie is gemiddeld genomen per doorlopen cm in de plaat gelijk, waardoor de oppervlakte van het signaal iets vermindert over de gemiddelde totale afgegeven energie en over het aantal muonen dat door de scintillatorplaat is gegaan. In Figuur 3.55 heb ik de piekwaarden tegen de bijbehorende oppervlakten uitgezet (dit zijn 24647 meetgegevens van de HiSPARC opstelling bij het KVI in Groningen).



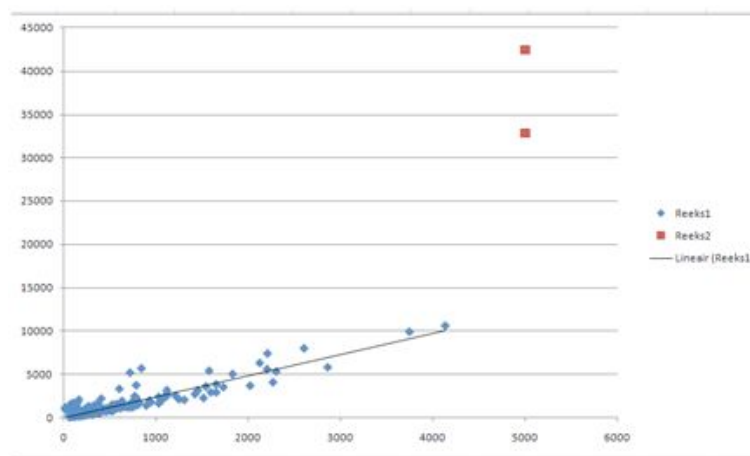
*Figuur 3.55: Verticaal, oppervlakte van de piek tegen de piekhoogte van het signaal (KVI, Groningen).*

In het begin lijkt het op een lineaire functie, maar naarmate de piekwaarden hoger worden, zit de oppervlakte steeds vaker boven de lineaire functie. Een vervolg onderzoek zou moeten uitwijzen waarom dit het geval is. Mogelijke oorzaak kan zijn dat de spanning in de multiplicatorbuis te hoog is en dat daardoor de multiplicatorbuis het signaal niet goed kan verwerken. Ik denk dat de oppervlakte van de puls groter wordt vanwege de hoeveelheid muonen die door de plaat heen gaat. Bij een hoger energetisch primair deeltje zullen er ook meer muonen in de shower ontstaan en zullen er dus ook meer muonen door de plaat gaan. Dit zal leiden tot een hogere piek, maar aangezien de muonen niet allemaal tegelijk door de plaat hoeven te gaan en er dus een tijdsverschil is tussen de opeenvolgende muonen, zal dit tevens leiden tot een pulsverbreding en niet alleen maar tot een piekverhoging.

### **3.4.4 HiSPARC en Auger**

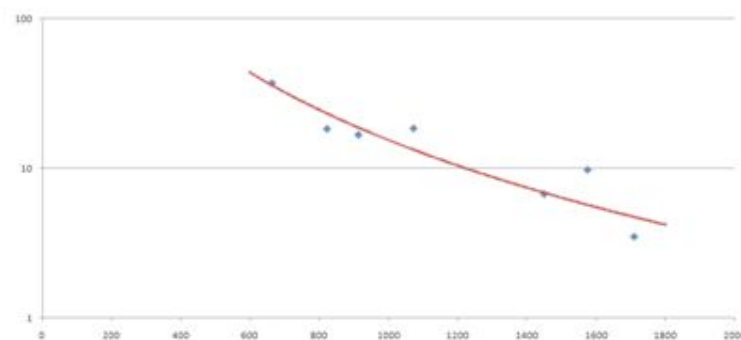
In Figuur 3.56 is de piekhoogte tegen de oppervlakte uitgezet van de HiSPARC opstelling in Argentinië.

Voor de gegevens van Auger zijn er alleen de gegevens geregistreerd wanneer er minimaal 3 watertanks een signaal hebben gegeven, waaronder de Olaia detector, en de HiSPARC opstelling. Dit betekent dat het primaire deeltje een minimale 'basis' energie moet bezitten zodat hij in staat is om in een aantal watertanks een signaal te genereren. Deze minimale energie voor het primaire deeltje ligt rond de 0,04 EeV. Helaas zijn niet alle gegevens geregistreerd van de HiSPARC opstelling, waardoor er in totaal minder gegevens beschikbaar zijn. Er zijn ongeveer 230 meetgegevens van de HiSPARC opstelling die een gelijke GPS-tijdstempel hebben met de GPS-tijdstempel van de watertanks van Auger. Met deze 230 meetgegevens ben ik verder gaan rekenen. De twee rode punten in Figuur 3.56 zijn waarden die de fotomultiplicatorbuis in de verzadiging hebben gedrukt (piekwaarde is maximaal 4998 mV).



*Figuur 3.56: Verticaal, oppervlakte van de piek tegen de piekhoogte (HiSPARC in Argentinië).*

M.b.v. de formule in (3.14) wordt door middel van een fit de VEM waarde bij een willekeurige  $r$ -waarde bepaald. De  $S_{1000}$  en de waarde van  $\beta$  komen uit de analyse van de Auger data [35]. In veel gevallen kunnen deze waarden slechts bepaald worden door gebruik te maken van de gegevens van slechts enkele watertanks, meestal voor slechts 3 of 4, soms voor 6 of 7 watertanks. Hierdoor is extrapolatie om de VEM waarde te bepalen niet betrouwbaar.

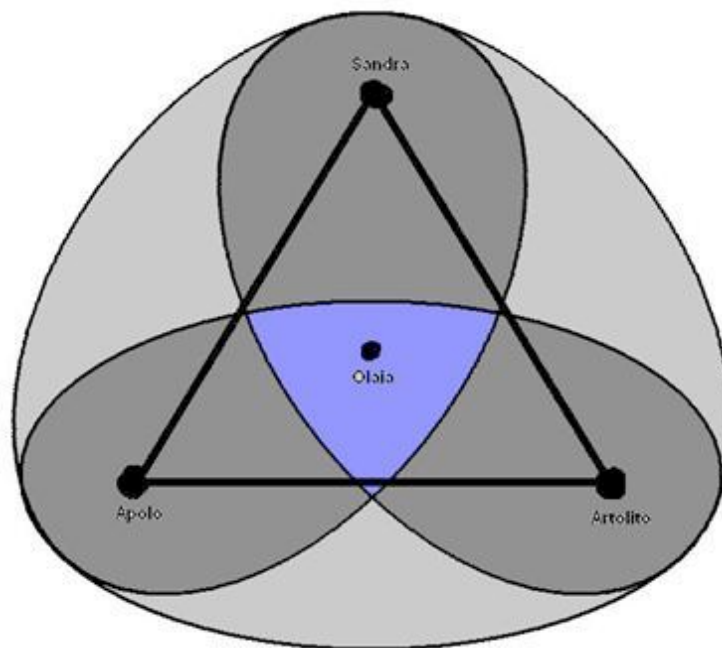


*Figuur 3.57: Plot van de functie  $S(r)$  waarbij 7 watertanks een signaal hebben gegeven. Verticaal de signaalgrootte  $S(r)$  in VEM eenheden, horizontaal de afstand in m van een watertank tot het inslagpunt.*

In Figuur 3.57 is te zien dat de kleinste  $r$  ongeveer 630 meter is. Wanneer de waarde van  $r$  kleiner

wordt, dan wordt de VEM waarde snel groter. Om deze reden is gekozen om alleen de VEM waarde te berekenen wanneer de waarde van  $r$  voor de HiSPARC opstelling groter is dan de kleinste waarde van  $r$  van één van de watertanks.

De tanks staan zo opgesteld dat er tussen twee opeenvolgende tanks steeds 1500 meter zit. Alle normale tanks staan in de vorm van een driehoek opgesteld. Olaia is een 'aparte' detector, die in het centrum van een dergelijk driehoek staat, zie Figuur 3.50. De waarde van  $r$  voor de HiSPARC opstelling is nooit groter dan de grootste  $r$ -waarde van de watertanks (dus  $r < 1500$  m), omdat de HiSPARC opstelling binnen een driehoek valt van 3 tanks met de namen Sandra, Apolo, en Arbolito; zie Figuur 3.50 en de tekening van de Mercedes-ster in Figuur 3.58.



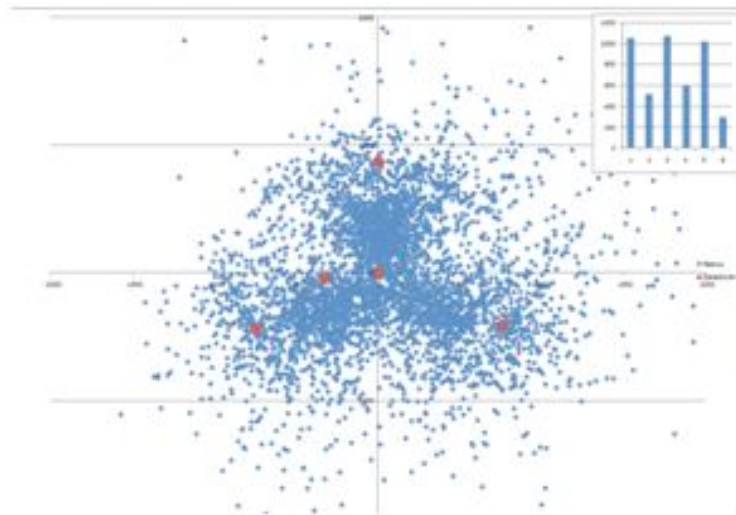
*Figuur 3.58: Grafische voorstelling inslagverdeling.*

Door dit selectie criterium toe te passen houd ik nog 137 meetgegevens over. Zoals eerder vermeld moet de detector Olaia een signaal geven voordat het signaal geregistreerd wordt. Verder moeten er nog minimaal 2 andere willekeurige tanks een signaal geven. Om een signaal te registreren zijn er dus de volgende mogelijkheden:

- Olaia – Apolo - Sandra
- Olaia – Apolo - Arbolito
- Olaia – Sandra - Arbolito

Signalen van meer dan drie tanks is natuurlijk ook mogelijk. Uit de gegevens, die uit de analyse van de Auger data komen kunnen de energie van het inkomende kosmische deeltje en de positie bepaald worden waar de kern van de deeltjeslawine het aardoppervlak heeft geraakt. De coördinaten van dit inslagpunt ten opzichte van de positie van Olaia kunnen weergegeven worden op een  $x$ - $y$  plot met Olaia in het midden. De kans dat je dus een inslag hebt waarbij Olaia een signaal geeft is 100%. Een inslag waarbij één van de andere detectoren een signaal geeft is  $2/3$ . Er zal dus een grote concentra-

tie (Figuur 3.58) vlakbij Olaia zitten (blauw); een kleinere concentratie (donkergrijs) rondom de andere 3 detectoren, en een nog lagere concentratie daar weer buiten (lichtgrijs). Als je naar het donkergrijze gebied kijkt, lijkt dit een beetje op een Mercedes figuur (3 ster). Figuur 3.60 laat een diagram zien van de berekende inslagplaatsen. Hierin is goed de Mercedes figuur te zien. Omdat de HiSPARC opstelling op ruime afstand van Olaia ligt, registreert hij meestal kosmische deeltjes met laagenergetische waarden. Dit komt omdat een laagenergetische kosmische straal vaak slechts 3 watertanks van een signaal voorziet.



*Figuur 3.59: x-y plot van alle events met een minimale energie van 0.04 EeV.*

In de figuur staat rechtsboven het aantal inslagen per sector. Omhoog langs de y-as noem ik gemakshalve  $0^{\circ}$ :

- 1e kolom: sector Sandra van  $-30^{\circ}$  tot en met  $30^{\circ}$
- 2e kolom: sector tussen Sandra & Arbolito van  $30^{\circ}$  t/m  $90^{\circ}$
- 3e kolom: sector Arbolito van  $90^{\circ}$  t/m  $150^{\circ}$
- 4e kolom: sector Arbolito & Apolo van  $150^{\circ}$  t/m  $210^{\circ}$
- 5e kolom: sector tussen Apolo & Sandra van  $270^{\circ}$  t/m  $330^{\circ}$

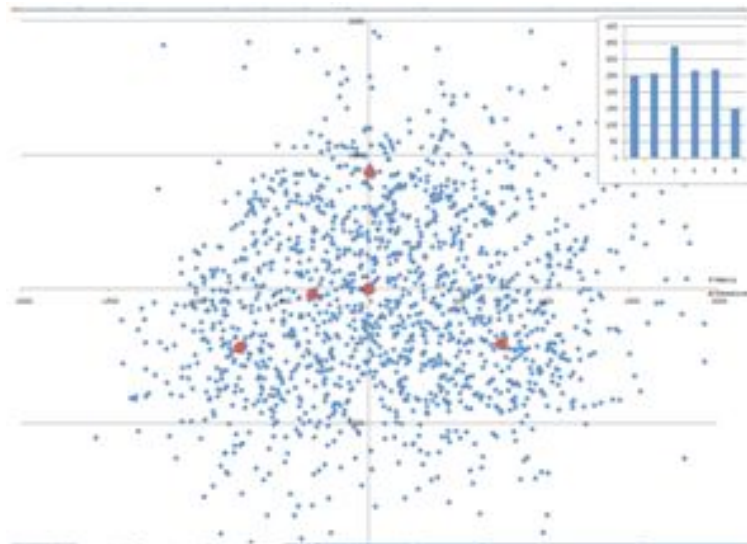
Omdat ik tot nu toe de laagenergetische kosmische stralen laat meetellen en deze het meest in het 'Mercedes gebied' voorkomen, lijkt mij dit niet de meest betrouwbare energie waarmee ik verder wil rekenen. Als ik de minimale energetische waarde ga verhogen voordat ik hem laat meedoen in de plot lijkt er een homogenere verdeling te ontstaan en verdwijnt de 'Mercedes-ster' structuur. Figuur 3.59, Figuur 3.60 en Figuur 3.61 illustreren wat er gebeurt als de laagst energetische waarde verhoogd wordt naar 0.04 EeV, 0.25 EeV en 0.45 EeV respectievelijk.

In Figuur 3.62 (minimale energie: 0.04 EeV) en Figuur 3.63 (minimale energie: 0.45 EeV) staan de gegevens geplot waarbij 3 detectoren én de scintillator een signaal hebben afgegeven. Alle energie waarden staan nog vermeld. De gegevens, waarbij de  $r$ -waarde van de HiSPARC detector buiten het  $r$ -waarde interval van de betrokken watertanks valt, zijn er al uit gehaald. Het aantal meetgegevens, waarbij zowel HiSPARC en de watertanks een gebeurtenis hebben geregistreerd is dan 137 en 95,

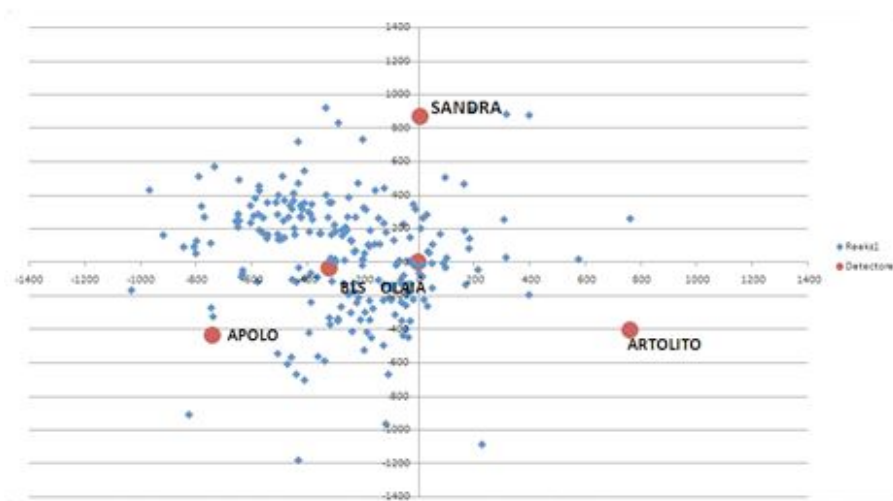
respectievelijk bij een drempel van 0.04 en 0.45 EeV.



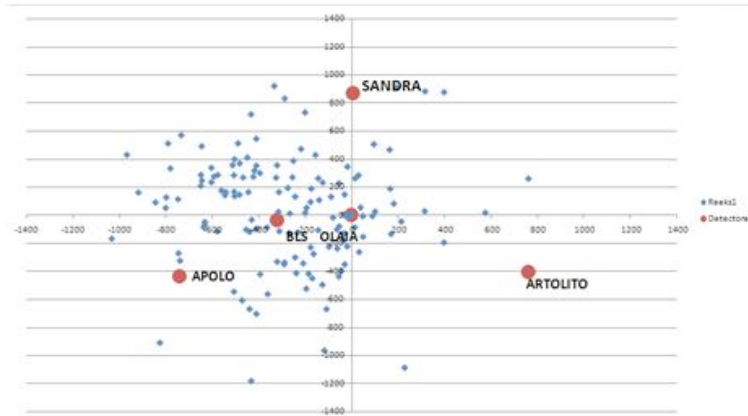
*Figuur 3.60: x-y plot van alle events met een minimale energie van 0.25 EeV.*



*Figuur 3.61: x-y plot van alle events met een minimale energie van 0.45 EeV.*

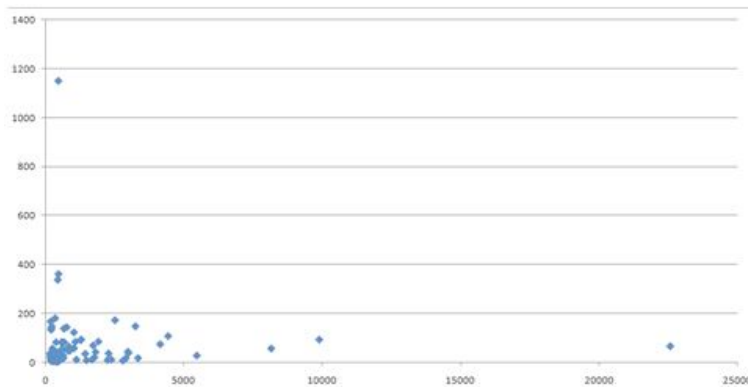


*Figuur 3.62: x-y plot van de HiSPARC events met een minimale energie van 0.04 EeV.*

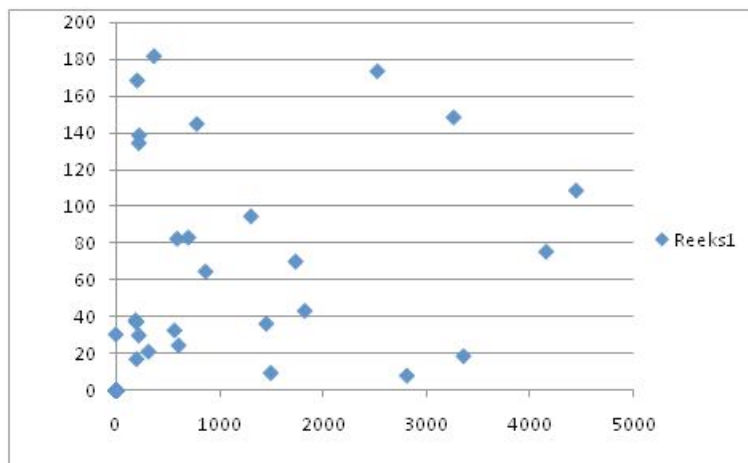


Figuur 3.63: x-y plot van de HiSPARC events met een minimale energie van 0.45 EeV.

De waarde van  $r$ , de geïnterpoleerde signaalsterkte in VEM-eenheden, en de piek- en oppervlaktewaarden van de signalen van de HiSPARC opstelling zijn nu bekend. In Figuur 3.64 staat een plot van de oppervlakte tegen de geïnterpoleerde VEM waarde. Hierbij heb ik nog geen rekening gehouden met de zenit hoek.



Figuur 3.64: Horizontaal: oppervlakte van de piek. Verticaal: bijbehorende VEM-waarde.



Figuur 3.65: Inslagen tussen de  $0^{\circ}$  en de  $22,5^{\circ}$  zijn geplott (25 meetgegevens). Horizontaal staat het oppervlak en verticaal de geïnterpoleerde VEM-waarde.

Aandachtspunt: er zijn dus inslagen waarbij de VEM-waarde groot is en de oppervlakte klein, maar ook omgekeerd; een kleine VEM-waarde en een grote oppervlakte. Als je de hoekverdeling erbij haalt,

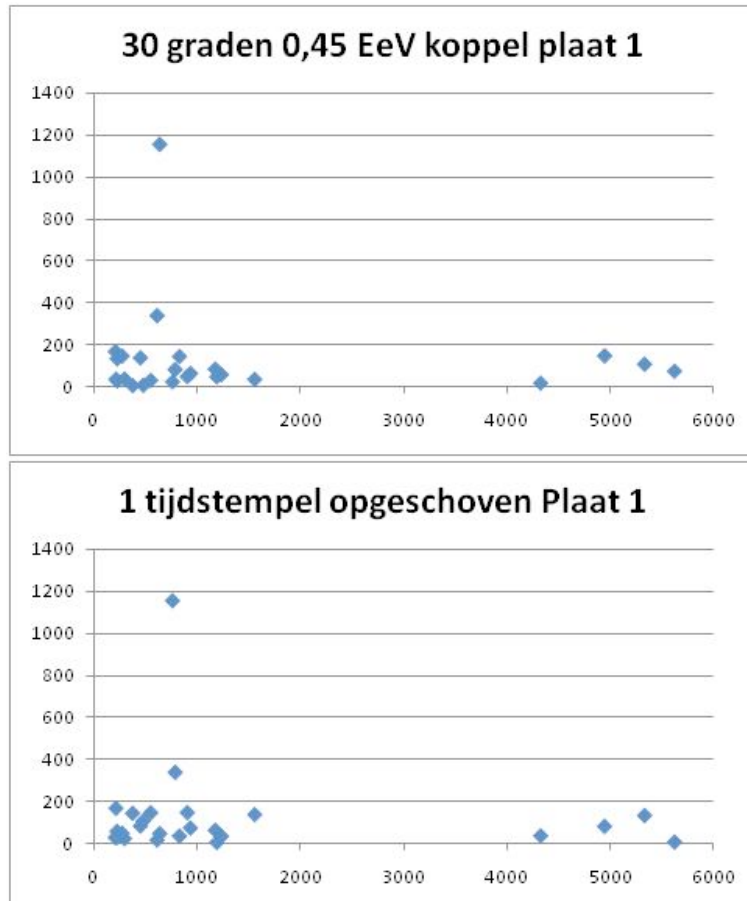


hoe ziet het er dan uit? Ik heb gekeken naar de verdeling gebinned per stap in de zenithoek van 22,5 graden. Nu blijven er van de 95 gegevens nog maar 25 meetgegevens over (0,0 niet meegerekend), zie Figuur 3.65. Dit lijkt op een random spreiding van de gegevens.

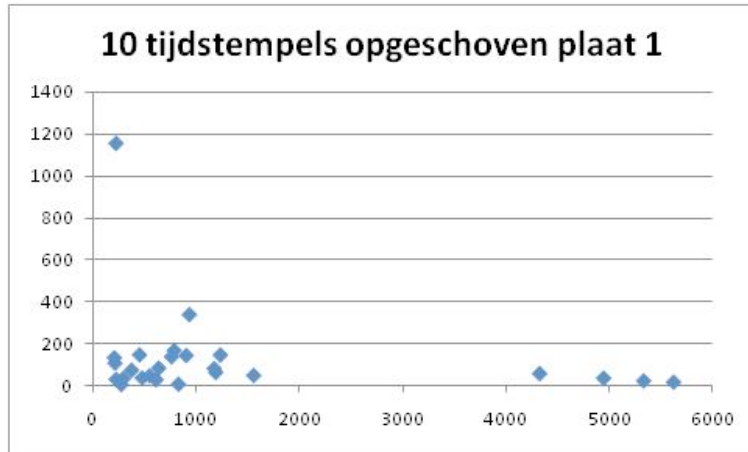
### 3.4.5 Conclusie

Eerste conclusie is dan ook: er is geen correlatie tussen de geïnterpoleerde VEM-waarde en de oppervlakte van het HiSPARC signaal. David Fokkema [36] kwam met de opmerking (6 april 2009) dat de geplote punten langs de assen misschien niet gecorreleerd zijn. Dit zou een fout in de GPS tijdstempel kunnen zijn zodat signalen verkeerd gesynchroniseerd worden. Dit kan ik controleren door bijvoorbeeld met niet gesynchroniseerde waarden te gaan doorrekenen. Ik kan dit doen door de HiSPARC signalen te gaan vergelijken met opgeschoven signalen van Auger (plus 1 tijdstempel). Als er geen correlatie is tussen de geïnterpoleerde VEM waarde en de oppervlakte van het HiSPARC signaal, dan zal het diagram er niet wezenlijk anders uit komen te zien.

Hieronder staan twee sets van drie diagrammen (Figuur 3.66 en Figuur 3.67) corresponderend met metingen van scintillator 1 en 2 resp. Voor alle diagrammen geldt dat de zenithoek kleiner is dan  $30^{\circ}$  en dat de energie groter dan 0.45 EeV is. Het eerste diagram van beide sets laat steeds de resultaten met 'gesynchroniseerde' signalen zien. De resultaten in het tweede diagram zijn verkregen door de tijdstempel met 1 positie op te schuiven, terwijl het derde diagram laat zien wat er gebeurt als het tijdstempel 10 posities verplaatst wordt.

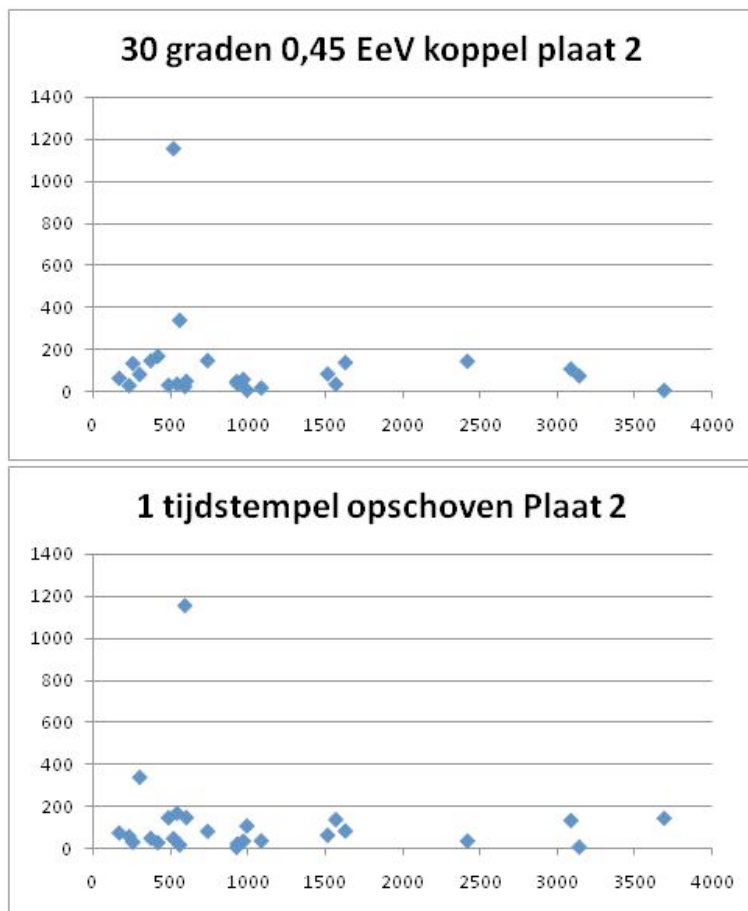


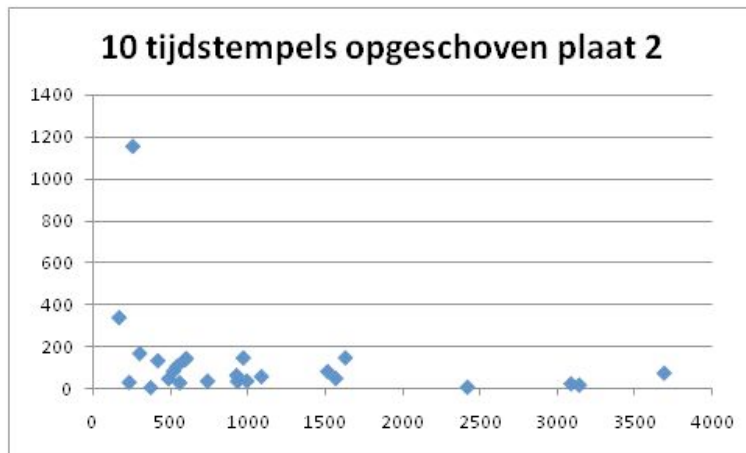




*Figuur 3.66: Scintillator 1: Geïnterpoleerde VEM waarde tegen signaal oppervlakte van de HiSPARC detector voor ‘gesynchroniseerde’ signalen (boven), signalen waarvoor het tijdstempel 1 positie opgeschoven is (midden) en waarvoor het tijdstempel 10 posities verschoven is (onder).*

Er treden geen grote veranderingen op; dit kan meerdere dingen betekenen. Als eerste kan het inderdaad zo zijn dat de signalen niet goed zijn gesynchroniseerd, maar deze optie heb ik dubbel gecheckt. Als eerste heb ik navraag hierover gedaan bij Ad van den Berg en Sybren Harsma [37]. Als tweede heb ik gekeken naar de GPS tijdstempel zelf. De verschillen tussen de tijdstempels van Auger en





*Figuur 3.67: Scintillator 2: Geïnterpoleerde VEM waarde tegen signaal oppervlakte van de HiSPARC detector voor 'gesynchroniseerde' signalen (boven), signalen waarvoor het tijdstempel 1 positie opgeschoven is (midden) en waarvoor het tijdstempel 10 posities verschoven is (onder).*

HiSPARC zijn er niet, want bij de synchronisatie moest er een gelijke tijdstempel zijn. Het lijkt er dus op dat er inderdaad geen correlatie is tussen de VEM waarde en de oppervlakte van het HiSPARC signaal!

### 3.5 Signaalanalyse scintillator/lichtgeleider/fotobuis combinatie



*Figuur 3.68: Machiel Vegting – Vechtstede College Weesp [38] -.*

Machiel Vegting werkt sinds 1987 in het onderwijs. Eerst in het speciaal onderwijs en middelbaar beroepsonderwijs. Vanaf 1997 werkt hij in het voortgezet onderwijs als leraar Natuurkunde, ANW en Natuur, Leven en Technologie (NLT). Vanaf 2000 is Machiel verbonden aan het Vechtstede College te Weesp. Het Vechtstede College is Universumschool en hij is daarvoor de Bètacoördinator.

#### 3.5.1 Onderzoeksoopdracht

In de werkplaats van het Nikhef heb ik een opstelling gebouwd bestaande uit vier boven elkaar opgestelde HiSPARC-detectors. Tussen deze detectors kan lood geplaatst worden. Het doel van deze opstelling is onder andere nagaan of er naast muonen ook elektronen of andere deeltjes gemeten worden.

#### 3.5.2 Introductie

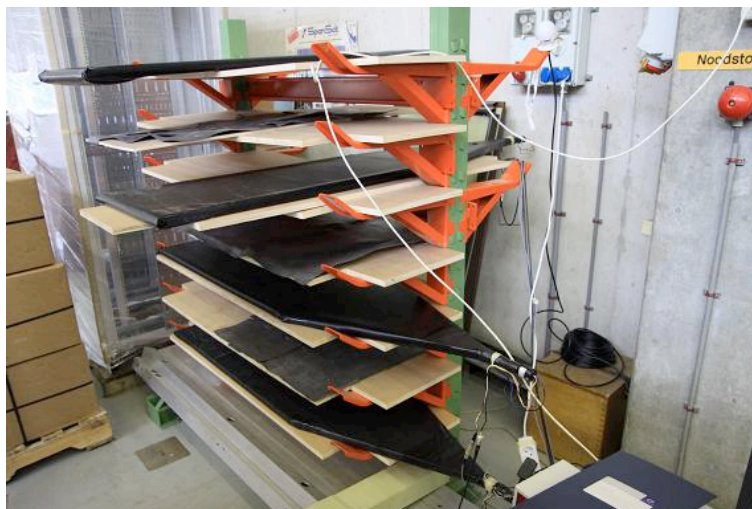
In onze omgeving is altijd kosmische straling aanwezig. Wat wij natuurlijke achtergrondstraling noemen is echter heel fundamenteel en de term is dan ook eerder misleidend. De samenstelling van de achtergrondstraling is echter moeilijk te bepalen. De realisatie dat deze straling voortdurend door ons heen gaat, roept vragen op over de samenstelling van deze straling en vragen over de kosmos en de atmosfeer, gezondheid en evolutie, techniek en ruimtevaart.

Kosmische straling is verantwoordelijk voor een deel van de achtergrondstraling. Wat op het aardoppervlak terecht komt zijn niet de primaire deeltjes die door de kosmos reizen, maar de deeltjes die na interactie tussen kosmische straling en de atmosfeer ontstaan. Dan gaat het vooral over muonen. Daarvan gaan er bij het aardoppervlak elke seconde bijna 200 door een vierkante meter. De muonen hebben een grote energie (800 MeV en meer) waarvan ze 1 á 2 MeV afstaan per  $\text{g/cm}^2$  materie die ze passeren. Ze ondervinden geen invloed van de sterke kracht en gaan hierdoor gemakkelijk door de

kernen van atomen. Het 'doordringend vermogen' van muonen is dan ook groot. Er is zeker sprake van interactie met biologische structuren, maar niet in een mate die gevaarlijk is. De stralingsbelasting is een fractie van de belasting ten gevolge van de natuurlijke achtergrondstraling.

De aarde staat bloot aan een voortdurend bombardement van deeltjes uit het heelal: kosmische straling. Deze deeltjes zijn kleiner dan atomen, maar ze kunnen extreem veel energie bezitten. Sommige hebben tien miljoen keer meer energie dan deeltjes die met een versneller in het laboratorium zoals CERN bij Geneve kunnen worden gemaakt. Over de oorsprong van deze deeltjes weten we (nog steeds) maar weinig. Sterker nog... we begrijpen niet eens waarom ze kunnen bestaan.

Tijdens mijn onderzoek heb ik mij niet gericht op het werken met een van de standaard HiSPARC opstellingen (zie sectie 2.5). Ik heb echter een nieuwe configuratie met vier scintillatieplaten ontworpen om onderzoek te kunnen doen naar de details van de signalen die uit de scintillator/lichtgeleider/fotobuis combinatie komen. Deze nieuwe opstelling bestaat uit vier scintillatieplaten die bijna direct boven elkaar zijn geplaatst (Figuur 3.69).



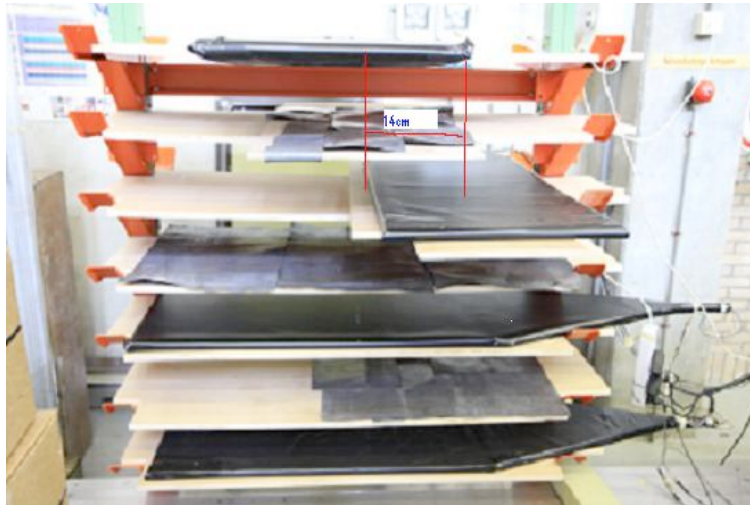
*Figuur 3.69: Vier scintillatieplaten zijn paarsgewijs kruislings boven elkaar geplaatst. De scintillatoren worden ondersteund door multiplex platen. Tussen de scintillatoren zijn extra steunen aangebracht waarop lood geplaatst kan worden.*

Tijdens het testen bleek dat de trigger rate te hoog was; daarop hebben we twee platen  $90^\circ$  ten opzichte van elkaar gedraaid. Daarnaast hebben we de platen zo verplaatst dat er een overlap overbleef van slechts 14 cm (overlap is aangegeven door de rode lijnen tussen 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> scintillatieplaat in Figuur 3.70).

Het totale oppervlak van de overlap voor de vier de platen (van bovenaf gezien) wordt dan  $0.14 \times 0.50 = 0.070 \text{ m}^2$  (in de simulatie van de opstelling speelt deze beperking geen rol, zie ook de bijdrage van Arjan Vriens in sectie 3.2). De onderlinge afstand tussen de platen is (van boven naar beneden): 36.5 cm, 41 cm en 41 cm.

De scintillatieplaten worden ondersteund m.b.v. een stalen frame waarop 7 multiplex platen met een dikte van 8 mm liggen. De scintillatieplaten zijn op het multiplex gelegd en worden op de gebruikelijke manier aangesloten op de HiSPARC data acquisitie (DAQ) elektronica. De elektronica is via USB di-

rect gekoppeld aan een PC (rechts op de foto in Figuur 3.71). De data worden op de PC ingelezen en vervolgens naar de centrale database bij Nikhef gestuurd.



*Figuur 3.70: Frontaanzicht van de opstelling. De overlap tussen de platen is duidelijk gereduceerd. De driehoekige lichtgeleiders maken geen deel uit van het scintillerende oppervlak.*



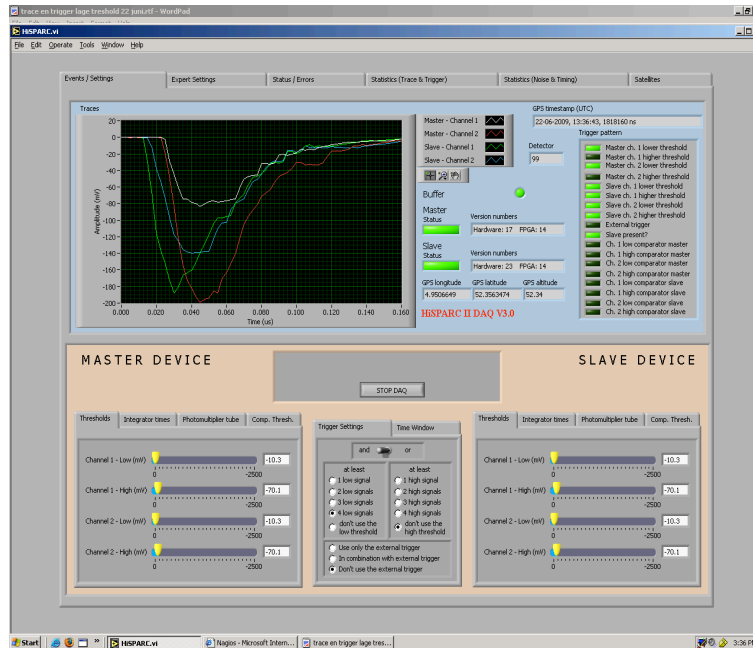
*Figuur 3.71: Zijaanzicht van de opstelling met rechts de HiSPARC elektronica en data acquisitie PC.*

Het experiment bestaat uit twee sets metingen. We hebben tussen de platen zoals in de figuren duidelijk waar te nemen valt, lood geplaatst. Dit lood wordt eveneens ondersteund door multiplex platen. We hebben het lood zo gepositioneerd dat het overlap gebied van de vier scintillatieplaten volledig afgedekt wordt. Daarnaast hebben we het experiment herhaald maar nu zonder lood tussen de scintillatoren.

### 3.5.3 Signalen

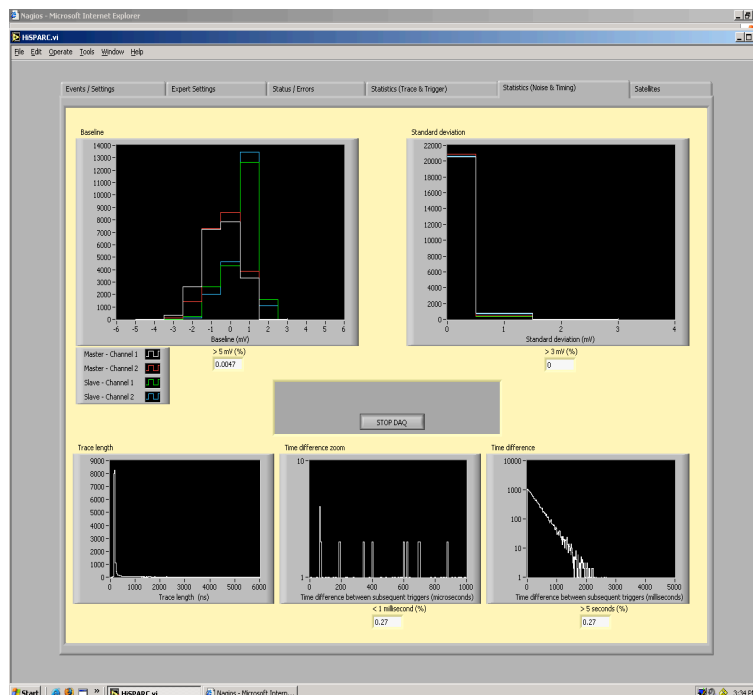
De HiSPARC elektronica bezat firmware versie 14. De trigger werd zodanig ingesteld dat alle vier platen een signaal binnen een vast gedefinieerd tijdvenster ( $2.0 \mu\text{s}$ ) moesten geven. Ieder signaal moest

bovendien de laagste aangelegde drempel (-25 mV) overstijgen (zie onderste deel van het DAQ scherm in Figuur 3.72).



Figuur 3.72: DAQ scherm met de instellingen voor de signaaldrempels en trigger condities.

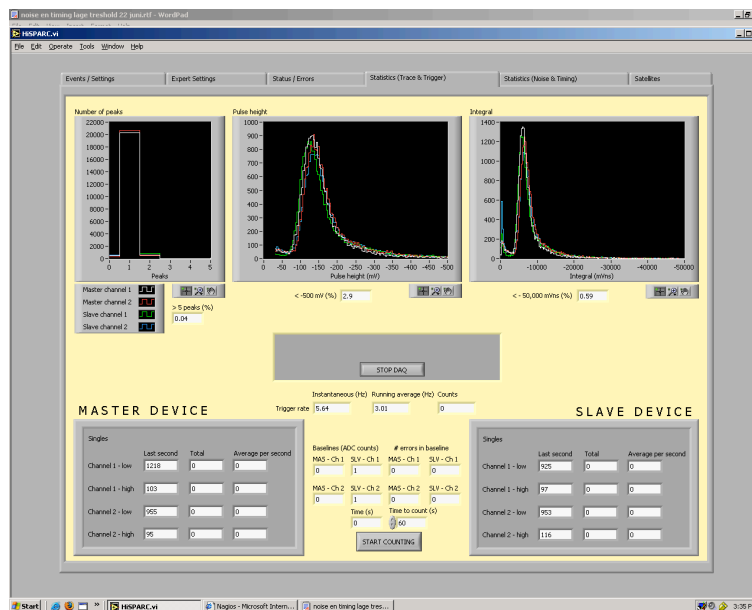
Het histogram links boven in Figuur 3.73 laat zien dat de baseline van alle vier fotoversterkerbuis-signalen een net gedrag vertoont. De spreiding op deze distributies is klein (hoogstens enkele mV, rechts boven). Data zijn genomen onder toepassing van een datareductie algoritme; dit geeft een belangrijke afname van de hoeveelheid data (= lengte van het tijdvenster waarover de data bij iedere trigger verzameld wordt, zie links onder) die naar de database geschreven moet worden.





*Figuur 3.73: Statistische verwerking van de meetresultaten met linksboven de variatie in de signaal baseline en rechtsboven de bijbehorende standaarddeviatie. Linksonder wordt de trace lengte gegeven, terwijl de twee histogrammen rechts het tijdsverschil tussen twee opeenvolgende triggers weergeven.*

Het histogram uiterst rechts onder laat zien dat het tijdsverschil tussen opeenvolgende triggers zich netjes gedraagt; inzoomen op zeer kleine tijdsverschillen tussen de triggers (middelste histogram) laat zien dat het systeem zonder waarneembare dode tijd opereerde.

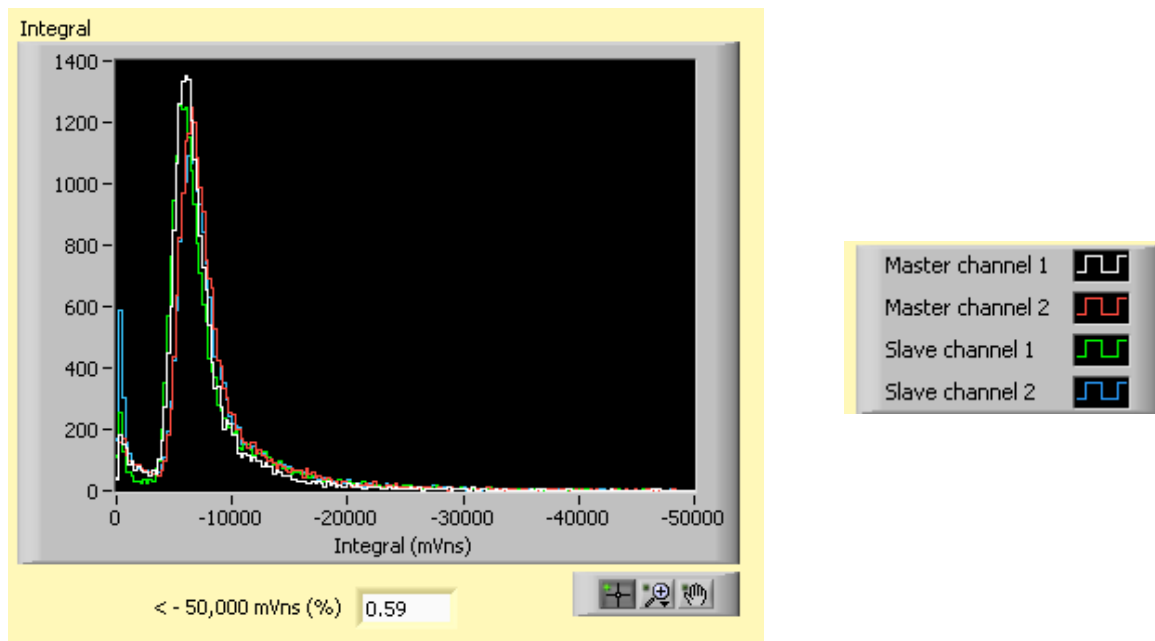


*Figuur 3.74: Op de bovenste rij: het aantal 'signalen' per event, de pulshoogte en de integraal over de signalen welke de drempel passeren. Onderaan worden de individuele telsnelheden weergegeven.*

Het histogram links boven in Figuur 3.74 registreert het aantal pieken (multipliciteit) dat bij iedere trigger bepaald wordt. Voor alle vier de scintillatoren geldt dat de signalen gedomineerd worden door een enkele puls; de kans dat een tweede deeltje binnen een periode dat de data na een trigger genomen wordt een of meer van de scintillatoren penetreert, is blijkbaar klein. Het middelste histogram laat de pulshoogte distributies van de vier scintillator/lichtgeleider/fotobuis combinaties zien. De hoogspanning op de buizen is zo afgesteld dat de vier lagen in de opstelling een vergelijkbare respons geven. De centrale piek correspondeert met de meest waarschijnlijke energie afgifte van een muon in de scintillator. In het histogram rechts, is de pulshoogte vervangen door het oppervlak onder de puls. Wederom geven de vier detectielagen in het experiment een vergelijkbaar resultaat. Bij nadere beschouwing van het rechter histogram in Figuur 3.74, zie Figuur 3.75, zijn er toch kleine verschillen aan te wijzen in het gebied van de kleinste signalen (links).

De volgorde in de kleurcode voor de signalen (rechts) correspondeert met de positie van de scintillatoren in het experiment d.w.z. de bovenste plaat correspondeert met het 'witte signaal', de op een na bovenste plaat levert het 'rode signaal' etc. Het relatief grote aantal 'kleine pulsen' in het signaal van de onderste plaat (blauwe histogram), kan diverse oorzaken hebben en geeft aanleiding tot verder

onderzoek. Een mogelijke verklaring zou kunnen zijn dat de multipliciteit van kleine pulsen (beneden de drempel van -25 mV) in deze plaat voor een groot aantal events groter is dan die in de andere platen.



*Figuur 3.75: .Hoewel de histogrammen van de integraal over de signalen voor de vier platen in eerste instantie vrijwel identiek verlopen, zijn er toch duidelijk verschillen aan te wijzen in het linkerdeel van de distributies.*

### 3.5.4 De metingen

M.b.v. Pythonscripts zijn de data uit de database gelezen en is een eerste analyse gemaakt. In Figuur 3.76 wordt de pulshoogte distributie gegeven voor metingen zonder lood (boven) en dezelfde distributie maar nu met een opstelling waarin de loodlagen zijn aangebracht (onder). Er zijn geen noemenswaardige verschillen tussen beide distributies. Ook hier geldt dat de volgorde in de kleurcode voor de signalen (rechts) correspondeert met de positie van de scintillatoren in het experiment d.w.z. de bovenste plaat correspondeert met het 'blauwe signaal', de op een na bovenste plaat levert het 'groene signaal' etc.

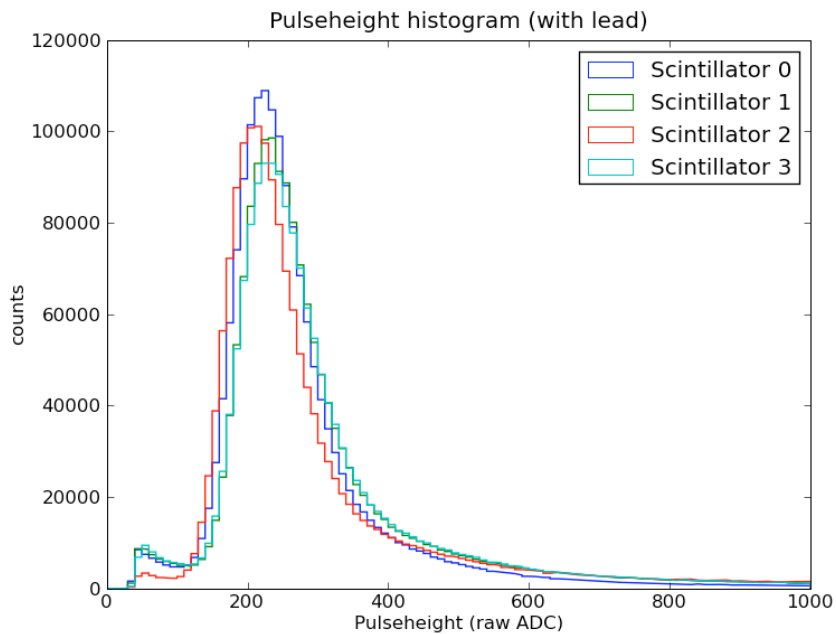
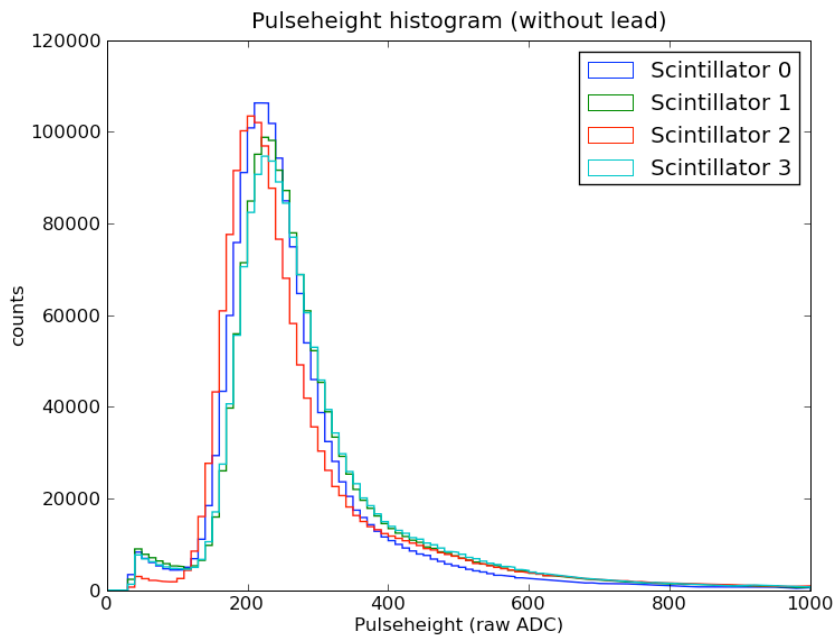
In Figuur 3.77 wordt eenzelfde vergelijking gemaakt, maar nu voor de distributies van de integraal over de pulsen, zonder lood (boven) en met lood (onder). Wederom zijn er geen opvallende verschillen waar te nemen.

### 3.5.5 Conclusie

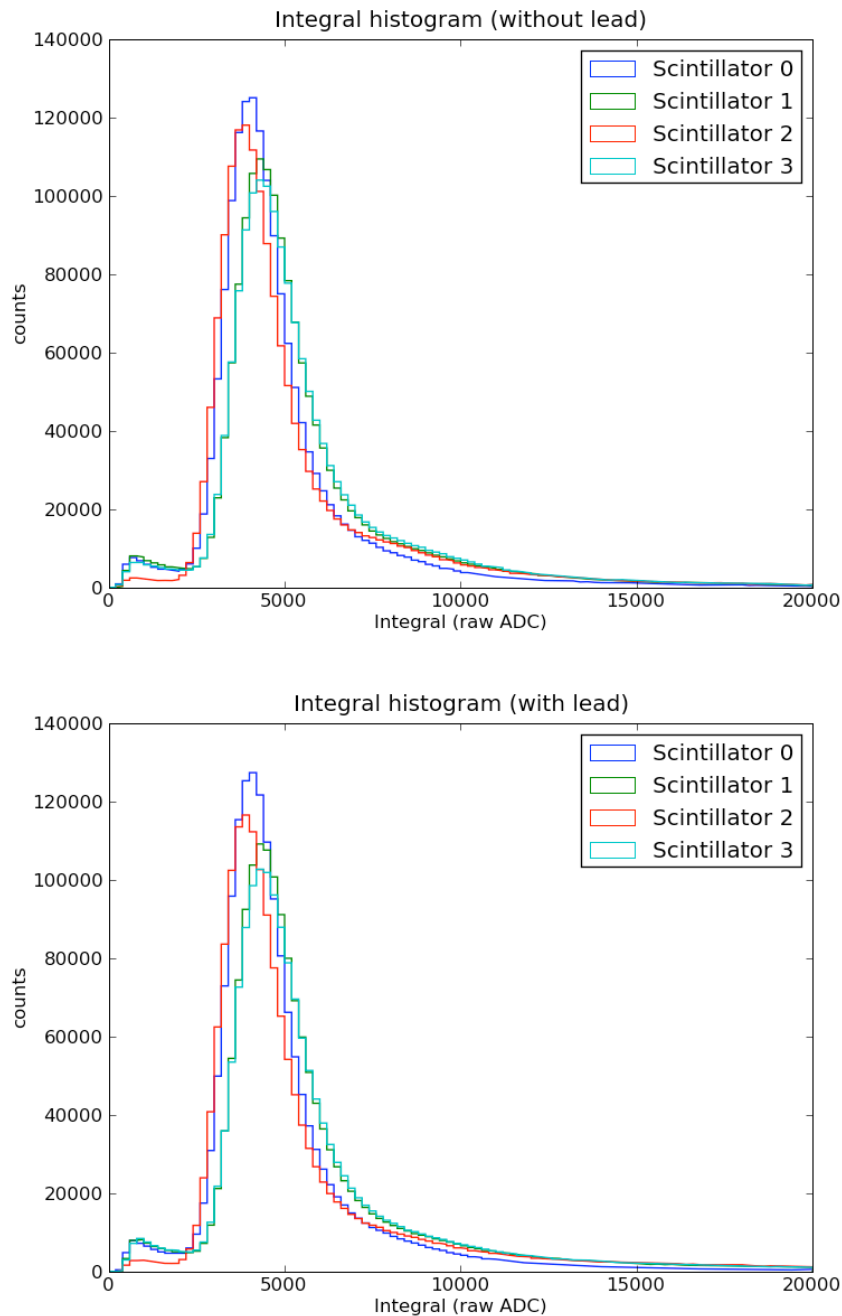
Enige conclusie van deze eerste analyse van meetgegevens moet zijn dat verder onderzoek noodzakelijk is. Uit de huidige distributies zijn geen duidelijke verschillen tussen de metingen aan de opstelling zonder lood en met lood te destilleren. Een mogelijkheid is om uit de database alle piekgegevens te halen (dus ook de kleinere pieken) om zo mogelijke verschillen tussen de lagen in detail te analyseren.



Verder hebben we nu op een coïncidentie tussen vier platen getriggered. Dit houdt in dat alle vier de platen binnen het tijdvenster van de trigger, een signaal moeten leveren. Het is dan ook niet onwaarschijnlijk dat we hierdoor exclusief muonen geselecteerd hebben en mogelijke andere deeltjes die de platen penetreren (elektronen, fotonen), uitsluiten omdat deze mogelijk voor het bereiken van de vierde scintillator, geabsorbeerd worden. De HiSPARC trigger logica laat echter niet toe om bijvoorbeeld bij een trigger die reageert op een signaal in drie platen, precies aan te wijzen welke platen wel en welke niet aan de trigger mogen bijdragen. Uitbreiding van de opstelling met externe logica om zo een externe trigger te genereren is dan ook een uitdaging voor de toekomst.



*Figuur 3.76: Pulshoogte histogram met het aantal pulshoogten langs de verticale as en de pulshoogte (in mV) langs de horizontale as. De distributie in de bovenste figuur is het resultaat van metingen zonder lood; de onderste figuur met lood.*



*Figuur 3.77: Histogrammen van de integraal over de pulsen voor de opstelling zonder lood (boven) en met lood (onder).*

## 4. Conclusie

### 4.1 Evaluatie en vooruitblik

Afgelopen jaar hebben docenten uit het voorgezet onderwijs in Amsterdam, Groningen en Nijmegen in de keuken van het wetenschappelijk bedrijf kunnen kijken. De diverse onderzoeksresultaten worden gepresenteerd in dit document.

Zoals in de inleiding is beargumenteerd, is gekozen om onderzoek uit te voeren binnen het kader dat het HiSPARC project biedt. Alle aspecten komen aan bod; hardware en software ontwikkeling, data analyse, verdieping theoretisch begrip en bestuderen van actuele wetenschappelijke vraagstukken. Zwaartepunt van het onderzoek is geweest beter inzicht te krijgen in de verschillende aspecten van de HiSPARC detectoren.

Het goed omlijnde kader en het deelnemen aan een gemeenschappelijk project, heeft ook geleid tot veelvuldig overleg tussen alle deelnemers en begeleiders. Regelmatige bijeenkomsten op het FOM bureau (vanwege de centrale ligging) heeft, naar aanleiding van de door de deelnemers gepresenteerde voortgangrapporten, uitgebreide en inspirerende discussies geïnitieerd. Docenten hebben elkaar dan ook vaak getroffen als 'sparring partners'; vergelijkbare vragen werden voor het voetlicht gebracht en besproken.

Zowel in Amsterdam als in Nijmegen zijn eigenschappen van individuele detectoren binnen een HiSPARC opstelling bestudeerd. Hierdoor is een beter begrip ontstaan van de eigenschappen van de meetopstelling op scholen. Vooral de veroudering van de detector en atmosferische aspecten zijn aan bod gekomen. De data van een HiSPARC detector die bij het Auger experiment is geplaatst, is in Groningen geanalyseerd. In principe geeft dit de mogelijkheid tot het correleren van de bij Auger gemeten deeltjesdichtheden en de signaalgrootte van de HiSPARC detector. In de praktijk bleek dat de statistiek (nog) niet toereikend was. Daarnaast zijn er in Amsterdam simulaties verricht met betrekking tot metingen in een gebouw. Ter controle van deze simulaties is een speciale opstelling gebouwd waarmee eerste metingen gedaan zijn.

De resultaten van afgelopen jaar illustreren dat wetenschappelijk onderzoek bedrijven een uitdagende onderneming is; ook voor wie het geen alledaagse activiteit is. Bij ieder resultaat komen weer nieuwe vragen naar boven zoals ook uit de reacties van de docenten in de aansluitende sectie naar voren komt. De bevindingen, in beknopte vorm neergelegd in dit rapport, zullen komend jaar de basis vormen voor het wetenschappelijke werk dat een nieuwe groep docenten uit gaat voeren. In ieder geval heeft het nu al geleid tot een beter begrip van de HiSPARC data, waarmee we weer een belangrijke stap hebben gezet die ons dichterbij de interpretatie van deze data brengt. En dus ook een stap dichterbij de analyse van de primaire kosmische straling...

Naast reacties van de betrokken, heeft Frank Poortenga een 'enquête' uitgevoerd naar het beeld dat leerlingen en docenten hebben van het (natuur)wetenschappelijk bedrijf (Sectie 4.3). Focus is op de vraag hoe leerlingen (en docenten) beter bediend kunnen worden zodat meer enthousiasme voor moderne natuurwetenschappelijke vragen en technologische ontwikkelingen gewekt kan worden. Frank

beschrijft een aantal interessante reacties en doet aanbevelingen.

Tot slot volgt een impressie van het HiSPARC leerlingen symposium dat dit jaar mede georganiseerd werd door Machiel Vegting.

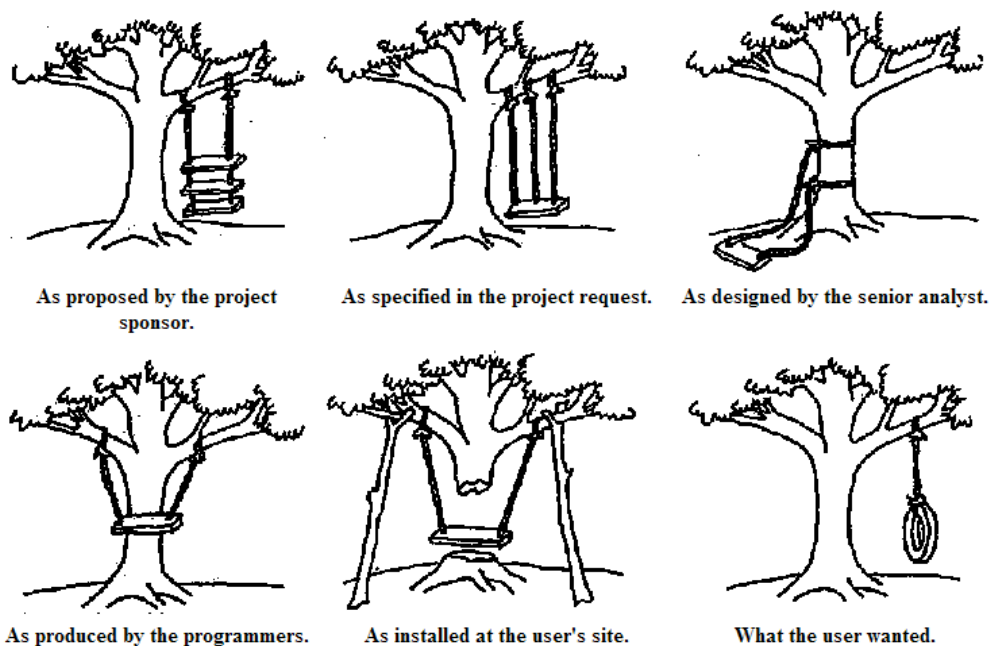
## 4.2 Reacties deelnemers

**Dorrih Pennink:**

*‘Wat heeft dit onderzoek opgeleverd? De oorspronkelijke onderzoeksvragen luiden als volgt:*

- *Zijn er coïncidenties aantoonbaar tussen de clusters van Amsterdam en Leiden?*
- *Kan aannemelijk worden gemaakt dat deze coïncidenties het gevolg zijn van spallatie in ons zonnestelsel?*

*Deze vragen zijn aanzienlijk ambitieuzer dan de onderzoeksvragen die in het voorgaande aan bod zijn gekomen. Waarom is van het oorspronkelijke plan afgeweken? Dit onderzoek heeft geleerd dat er vele klippen omzeild dienen te worden voordat complexe onderzoeksvragen beantwoord kunnen worden. De grootste problemen liggen op het gebied van de programmatuur. Enerzijds betreft het de beheersing van Python om adequate scripts te ontwikkelen. De cartoon in Figuur 4.1 vormt een toepasselijke illustratie van de stadia die worden doorlopen om een relatief eenvoudige vraag om te zetten in een script, waarmee de vraag beantwoord kan worden.*



*Figuur 4.1: Software ontwikkeling: de verschillende fasen (van excitatie).*

*Anderzijds heeft een haperende database voor stagnatie gezorgd. Het uploaden van gegevens in de nieuwe database verloopt traag. Hierdoor is het aantal stations waarvan de data beschikbaar zijn zeer beperkt: een van de clusters die ontbreekt is Leiden. Daarnaast speelt een ander probleem. Naarmate de database gevulder raakt kost het ontsluiten van informatie meer tijd. Zoekopdrachten worden zo*

*traag verwerkt, dat dit belemmerend werkt bij het onderzoek. Daar staat tegenover dat na het zaaien, het investeren in Python, daadwerkelijk geoogst is.*

*Diverse onderzoeksvragen zijn aan bod gekomen. Scripts zijn geschreven om een antwoord te vinden. Sluiers zijn opgelicht in dit onderzoek, maar analyse en interpretatie zijn nog lang niet voltooid. Op het oog wellicht bescheiden onderzoeksvragen, al doende een leerzame en interessante queeste voor een leraar in onderzoek.'*

#### **Arjan Vriens:**

*'Door het project is mijn kennis over kosmische straling weer redelijk up-to-date. Het gezamenlijk doorwerken van het overzichtsartikel van Nagano en Watson [32] was een goed idee.*

*Het 1 dag per week bij het Nikhef aan het project werken is eigenlijk te weinig. Het kost namelijk elke week wel wat tijd om te kijken waar je gebleven was. Beter is om meerdere dagen per week aan het onderzoek te werken.*

*Over het totaal bekeken was het zeer nuttig om te doen. Het project heeft mij gestimuleerd in het lesgeven.'*

#### **Teun van Heesch en Sjaak Wolst:**

*'Het LiO-jaar is voor ons voorbijgevlogen. Het is een mooi en inspirerend jaar geworden waarin onze kennis niet alleen is opgefrist maar ook uitgebreid. In dit jaar zijn we noodgedwongen veel bezig geweest met programmeren in C en het verwerken van de resultaten in ROOT. Het eigen maken van deze vaardigheden heeft de nodige tijd gekost en frustraties opgeleverd. Vele programma versies werden gemaakt, getest en verworpen alvorens we tot een definitieve versie kwamen. We zijn hierbij gelukkig altijd ondersteund door Charles Timmermans.*

*Door het jaar heen kwamen we er steeds meer achter dat ieder antwoord dat we via een analyse vorder gevolgd werd door een nooit aflatende reeks nieuwe vragen. Wij zullen dan ook de laatste zijn die zullen beweren dat er ook maar één door ons aangepakt onderwerp nu af is!*

*Wij willen bij dezen het FOM, Nikhef en in het bijzonder Charles Timmermans bedanken voor de mogelijkheid en de ondersteuning die zij ons geboden hebben.'*

#### **Frank Poortenga:**

*'Ik wil graag besluiten met het volgende. De kosmische straling die het meest intrigeert, is de straling waarbij het deeltje een hogere energie heeft dan 0,5 EeV. De aarde wordt niet extreem vaak geraakt door deeltjes met zo'n energie. Mijn bevindingen en conclusies zijn gebaseerd op nog geen 30 metingen. Om deze 30 meetwaarden te kunnen krijgen is gekeken naar metingen die gemaakt zijn tussen 1 april 2007 en 1 juni 2008. Er is dus meer dan een jaar overheen gegaan om 30 meetwaarden te verkrijgen.*

*Ik zou graag zien dat het onderzoek wordt doorgezet, want persoonlijk zou ik zeggen dat deeltjes met grote energieën een grotere muonendichtheid creëren waardoor het signaal van de HiSPARC opstel-*

ling een grotere oppervlakte zal laten zien. Ik ben namelijk nog niet overtuigd doordat ik moest werken met erg weinig gegevens zodat er statistisch gezien een erg grote onnauwkeurigheid ontstaat'.

### **Machiel Vegting:**

*'HiSPARC is een fantastisch project waarbij leerlingen echt kunnen kennismaken met en participeren in wetenschappelijk onderzoek. Voor mij als docent is het dan geweldig om een dag in de week ook bij het onderzoek betrokken te zijn.*

*De meerwaarde van dit project is voor mij dan ook groot. De meerwaarde bestaat uit een betere kennis van de theorie van de kosmische straling en de ervaring om met een nieuwe opstelling experimenten te doen. De resultaten van deze experimenten geven aanleiding om de opstelling nog te verbeteren zodat we betere antwoorden kunnen vinden op de vragen die we stellen en dan vooral in het gebied van de laagenergetische straling. Een dag per week gedurende een jaar is eigenlijk te kort om zowel een experiment op te stellen en uit te voeren en de gegevens te analyseren en dan weer te verbeteren etc. Ik ben dan ook blij dat ik nog een jaar mag doorwerken als leraar in onderzoek op het Nikhef.*

*Ten slotte nog een woord van dank aan Bob van Eijk, Jan Willem van Holten en David Fokkema voor hun geduld en ondersteuning.'*

## **4.3 Wetenschap, docenten en studiekeuze leerlingen**

Het FOM stelt plaatsen voor docenten ter beschikking om deel te nemen aan een wetenschappelijk onderzoek. Een van de motivaties van de FOM is om leraren opnieuw te enthousiasmeren voor het vak. Al gauw bleek dat de docenten die op de LIO bijeenkomst aanwezig waren al enthousiast over het vak zijn en dat ze graag meer wilden weten over het reilen en zeilen van een instituut dat aan onderzoek doet. Met het enthousiasme zat het dus al goed. Een bijkomend voordeel van enthousiaste docenten is dat deze docenten ook hun leerlingen meer kunnen inspireren om een weloverwogen keuze te maken voor een vervolgstudie. De LiOs krijgen op deze manier meer handvatten om een antwoord te vinden op de volgende vragen:

- Hoe kun je leerlingen inspireren voor het vak natuurkunde?
- Hoe kun je ervoor zorgen dat leerlingen natuurkunde gaan studeren?
- Wat voor beeld heeft een leerling van wetenschappelijk onderzoek?
- Is er interesse vanuit scholen om rond te kijken in een onderzoeksinstituut?
- Hebben scholen, docenten en leerlingen, interesse om mee te doen aan een wetenschappelijk onderzoek?
- Welk maatschappelijk belang heeft wetenschappelijk onderzoek?
- Welke handvatten hebben de docenten om leerlingen te motiveren?

Dit zijn ook de vragen waar vele docenten en scholen voor voortgezet onderwijs antwoord op zouden willen hebben. Voordat ik (Frank Poortenga) als LIO volledig mijn tijd ben gaan besteden aan weten-

schappelijk onderzoek, heb ik een bijeenkomst belegd met docenten. Tijdens deze bijeenkomst konden de docenten kenbaar maken welke ideeën en wensen er leven op hun school. Hierbij kan worden gedacht aan:

- Rondleiden van leerlingen op een onderzoeksinstituut/universiteit.
- Presentaties over onderzoeken op scholen houden.
- Profielwerkstuk, theoretische begeleiding vanuit een onderzoeksinstelling/bedrijf.
- Profielwerkstuk, praktijk gerichte begeleiding vanuit een onderzoeksinstelling/bedrijf.
- Het meedoen met een wetenschappelijk onderzoek (HiSPARC).
- Gastcolleges volgen aan een universiteit.

In oktober 2008 zijn een aantal docenten op mijn verzoek naar het KVI gekomen om te praten over HiSPARC, PWS (profielwerkstukken) en de keuzemotivatie van de leerlingen. Hier volgt een korte samenvatting van hoe de docenten denken over motivatiebevordering bij leerlingen (gepresenteerd tijdens de LiO-bijeenkomst op het FOM bureau, 26 oktober 2008).

Wanneer men leerlingen warm wil laten lopen voor het WO, en dan voornamelijk voor de exacte studies, zal halverwege de schoolloopbaan van de leerlingen al kennis gemaakt moeten worden met het vervolgonderwijs. Veelal heerst er een drempelvrees, al dan niet terecht, voor 'het onbekende'. Nieuwe personen, 'grote' machines, ander gebouw, kortom een volstrekt andere omgeving kan deze drempelvrees veroorzaken. Voorlichting geven op een veilige plaats (school) is een pre om leerlingen op de hoogte stellen wat er allemaal speelt in de wereld buiten de school. Wanneer de interesse is gewekt bij de leerlingen, dan zijn zij eerder geneigd om het schoolgebouw te verlaten en verder te kijken. Als ze daar zien/horen wat voor projecten er zijn en welke mogelijkheden scholen kunnen bieden, wordt het concreter voor de leerlingen en zullen ze makkelijker de stap zetten om mee te doen aan een onderzoek.

Dit kan door projecten de school binnen te halen. Hierbij is het belangrijk dat de docent examen(leer)doelen kan terugvinden binnen het project. Een vervolgstap is om leerlingen mee te nemen naar exposities van projecten, dit kunnen opendagen zijn, maar ook georganiseerde leerlingendagen bij onderzoekinstellingen of andere bedrijven. Geïnteresseerde leerlingen kunnen daarna aan een 'vakoverstijgend' project werken waarbij de kennis of begeleiding van buitenaf gehaald kan worden. Dit om interactie te bevorderen tussen leerlingen (scholen) en instellingen/bedrijven. In een later stadium kan de leerling een werkstuk buiten de school gaan maken. Hierbij kan men bijvoorbeeld denken aan een profielwerkstuk.

De inzet van scholen en de lesgevende docenten is sterk bepalend voor het succes. Een doorlopende leerlijn is noodzakelijk zodat leerlingen eerder een (betere) keuze maken met betrekking tot hun vervolgstudie. Hiervoor is een stappenplan nodig waarin de mogelijkheden beschreven worden die de school kan benutten. Een voorbeeld van een stappenplan voor HAVO/VWO kan zijn:

- Verzorg laagdrempelige presentatie(s) op scholen (3<sup>e</sup> klas en/of 4<sup>e</sup> klas).
- Breng opstellingen binnen school zodat leerlingen hiermee kunnen meten/onderzoeken (3<sup>e</sup> klas en 4<sup>e</sup> klas).
- Neem leerlingen mee naar 'open dagen' waar onderzoeken uitgesteld staan of vraag excursies aan bij bedrijven/onderzoekinstellingen.
- Profielwerkstuk; integreer minimaal 1 'groot' project in de bovenbouw.
- Wanneer leerlingen keuzes moeten maken m.b.t. hun profielwerkstuk, laat leerlingen naar open dagen gaan of informeer welke mogelijkheden de instellingen/bedrijven in de directe omgeving bieden.

Overige opmerkingen die geplaatst zijn:

- Veranker HiSPARC binnen het programma □ ANW, Natuurkunde.
- Presentatie/voorlichting op school geven voor 4 VWO (ANW leerlingen) zorgt voor overlap met natuurkunde.
- Gemotiveerde leerlingen kunnen dan in het 5<sup>e</sup> jaar kiezen voor een PWS met als achtergrond HiSPARC.
- Eerst een project op school en dan misschien later buitenschoolse opdracht(en).
- Lespakket aanbieden (gesloten theorie + opdrachten/toetsen)
- Leerlingen hebben een natuurlijke vorm van angst voor het onbekende. (mensen, gebouwen).
- **Bèta steunpunt werkt vertragend, duurt lang voordat er een antwoord komt.**
- Argument *tegen* buiten de school werken; enthousiaste leerlingen werken motiverend voor andere leerlingen, deze leerlingen moeten niet buiten de school gaan werken.
- Concrete voorbeelden geven wat HiSPARC betekenen kan binnen de school.
- Concurrentie: leerlingen hebben bijbaantjes en leerlingen hebben soms het idee dat je geld moet hebben als scholier.

Verder heb ik nog een aantal leerlingendagen mede georganiseerd. Op het einde van de rondleidingen ben ik steeds een gesprek aangegaan met de leerlingen om te achterhalen of de ideeën van de docenten kloppen zoals ze hiervoor omschreven zijn. Al gauw kwam naar voren dat leerlingen een minder grote angst hebben voor 'het onbekende' en het zeer interessant vinden wat er gebeurt op onderzoekcentra. Nu is het zo dat de leerlingen die langs zijn gekomen allemaal al natuurkunde in hun profiel hebben gekozen. Hierdoor hebben ze al een 'natuurlijke' interesse in de natuurkunde.

Ik ben niet verder gegaan met het onderzoeken naar de beweegredenen die leerlingen hebben als het gaat om kiezen van vakken en hun vervolgstudie. Het enige wat ik er verder over kan zeggen is dat de meeste leerlingen (en docenten!) een foutief beeld hebben van de mogelijkheden die het WO hen kan bieden. Er valt een grote winst te behalen in verbeterde communicatie tussen WO en VO.



#### 4.4 HiSPARC leerlingensymposium 2009

Op 24 maart 2009 hebben Jan Willem van Holten en Machiel Vegting het jaarlijkse HiSPARC leerlingensymposium georganiseerd. Gastheer van het symposium was het Vechtstede College te Weesp, de thuisbasis van Machiel Vegting ('leraar in onderzoek', 2008/2009).

Het programma werd 's middags geopend met een voordracht door Prof. Dr. Gerard 't Hooft (zie Figuur 4.2 en Appendix D).



*Figuur 4.2: Prof. Dr. Gerard 't Hooft geeft uitleg over de bouwstenen van de materie.*

Vervolgens presenteerden een aantal leerlingen hun profielwerkstuk met als onderwerp 'kosmische straling' in de vorm van posters en (multimedia-) presentaties. De presentaties werden door een jury (Frits Hidde - docent VO -, Bob van Eijk en Gerard 't Hooft) op hun inhoud en uitvoering beoordeeld (Figuur 4.3).



*Figuur 4.3: De jury maakt de uitslag bekend.*

Tot uiteindelijke winnaars werden Florian van Oirschot en Kasper van Dam gekozen, beide leerlingen van het Groene Hart Lyceum in Alphen aan de Rijn (Figuur 4.4).



*Figuur 4.4: De winnende presentatie van Florian en Kasper.*

Florian en Kasper hebben inmiddels hun prijs verzilverd; een reis naar CERN in Genève met een bezoek aan de superdeeltjesversneller de ‘Large Hadron Collider’ (verzorgd door Gerjan Bobbink - Nikhef).

In een ‘hands-on’ sessie werden de leerlingen uitgedaagd met een geselecteerde set van HiSPARC data welke zij moesten bewerken en interpreteren (Figuur 4.5).



*Figuur 4.5: Leerlingen werken aan de analyse van HiSPARC metingen.*

Hiervoor was speciale software op een netwerk van PCs geïnstalleerd. Dataset en analysetechnieken waren voorbereid door David Fokkema (promovendus bij HiSPARC). Iedere leerling ontving een subset van deze selecte groep data zodat aan het einde van de middag na combinatie van alle analyse-resultaten, een deel van het energie spectrum voor (extreem) hoogenergetische kosmische deeltjes gereconstrueerd kon worden...

## Appendix A Python scripts

Voor de analyse van data in de Amsterdamse subcluster in de Watergraafsmeer, zijn diverse Python scripts ontwikkeld. Een tweetal voorbeelden m.b.t. het zoeken naar coïncidenties volgt hier.

```
from MySQLdb import connect
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import datetime
import os

COINCIDENCE_WINDOW = 2e5 # in nanoseconds
GPS_RESOLUTION = 100 # in nanoseconds

#####
# in dit programma wordt het tijdstempel van station 503
# gecorrigeerd: - 15 seconden
#
# de data worden weggeschreven naar 'ccoincidencetest.txt'
# structuur van datafile is: datum uur c501 c502 c503 etc.
# data worden weggeschreven naar ccoinc.txt
#####

# the clusters are defined here, if a detector is added
# this is the only place in the code where change is needed
# the first detector in the tuple is used as the reference detector
# to check the timestamps of the others against
amsterdam = range(1,24) + [99] + range(501, 506) + [507]
eindhoven = range(8001, 8012)
 groningen = range(4001, 4005)
leiden = range(3001, 3007) + range(3101, 3104) + [3201, 3202]
 utrecht = [1001, 1002, 1006]
clusters = (amsterdam, eindhoven, groningen, leiden, utrecht)

def get_db_cursor():
    """
    Connect to the eventwarehouse
    """
    DB_HOST = '127.0.0.1'
    DB_USER = 'analysis'
    DB_PASSW = 'Data4analysis!'
    DB_NAME = 'eventwarehouse'

    conn = connect(DB_HOST, DB_USER, DB_PASSW, DB_NAME)
    cursor = conn.cursor()
    return cursor

def get_timestamps(day, station, t1, t2):
    """
    Get the timestamps for the events occurred on date 'day'
    in detector 'station'

    return: list with the times of the events in nanoseconds
    """
    cursor = get_db_cursor()
    query = "SELECT e.event_id, e.time, e.nanoseconds " \
           "FROM event e " \
           "WHERE e.eventtype_id=1 AND e.date = '%s' AND station_id = %d " \
           "AND e.time >= '%s' AND e.time <= '%s'" \
           % (day, station, t1, t2)
    cursor.execute(query)

    timestamp = {}
    for eventID, t, n in cursor.fetchall():
        t_spl = str(t).split(':')
        timestamp[eventID] = int(t_spl[0])*3.6e12 + int(t_spl[1])*6e10 + int(t_spl[2])*1e9 + n
        """
        correct timestamp station 503
        """
        if station == 503:
            timestamp[eventID] -= 15E9

    return timestamp
```

```

search for coincidences in the data from the
detectors in the list
"""

# put the timestamps of the detectors in a dictionary
ts_dict = {} # the timestamps of all the detectors combined
ts_dict2 = {}
for det in detectors:
    timestamps = get_timestamps(day, det, start, end)
    for eventID in timestamps:
        ts_dict[ timestamps[eventID] ] = det
        ts_dict2[ timestamps[eventID] ] = eventID
        # TODO: there can be more than one event on one given timestamp
        # this implementation will NOT handle this correctly

ts_all = ts_dict.keys()
ts_all.sort()

# iterate through the list with all timestamps
# to find coincidences
# in the future, coincidences should contain a list of event_ids
coincidences = {}
for ts_ref in ts_all:
    for ts in ts_all[(ts_all.index(ts_ref) + 1):]:
        if (ts - ts_ref) < COINCIDENCE_WINDOW: # coincidence found
            if (ts_dict[ts_ref], ts_ref) in coincidences:
                coincidences[(ts_dict[ts_ref],ts_ref)].append( (ts_dict[ts],ts) )
            else:
                coincidences[(ts_dict[ts_ref],ts_ref)] = [(ts_dict[ts],ts)]
        else:
            break

# check if a coincidence has a detector more than once
for key in coincidences:
    det_in_c = [] # detectors in a coincidence
    det_in_c.append( key[0] )
    for values in coincidences[key]:
        det_in_c.append( values[0] )

    # if the coincidence has doubles, flag it
    if len( det_in_c ) != len( dict.fromkeys(det_in_c).keys() ):
        for values in coincidences[key]:
            continue

        coincidences[key].append("DOUBLE")

return coincidences

def get_hourly_coincidences(detectors, date, hour):
    """
    Get the coincidences for one hour on a given day
    """
    start = str(hour) + ':00:00'
    end = str(hour + 1) + ':00:00'

    return search_coincidences(detectors, date, start, end)

def add_coincidence_to_db(detectors, date, time):
    """
    Add the coincidence to the database, using the
    detector id in the list detectors
    """
    cursor = get_db_cursor()
    query = ""
    cursor.execute(query)

if __name__ == "__main__":
    os.remove('ccoinc.txt')
    f=open('ccoinc.txt', 'a')

```

```

date = datetime.date(2009, 2, 28)
print date
timetuple1 = date.timetuple()

difference1 = datetime.timedelta(days=1)

hour = 0
timetuple2 = timetuple1
while timetuple1[1] == timetuple2[1]:
    N = 24
    for hour in range(N):
        stationlist = [501, 502, 503, 504, 505]
        ccountlist = [0, 0, 0, 0, 0]
        coincidences = get_hourly_coincidences( stationlist, date, hour)

        for key in coincidences:
            countlist[stationlist.index(key[0])] += 1
            for val in coincidences[key]:
                if ( val[0] == "D" ): #DOUBLE
                    continue
                if ( val[0] == "T" ): #TOOLATE
                    continue
            countlist[stationlist.index(val[0])] += 1

        dag=str(date)
        hour
        var3=ccountlist[0]
        var4=ccountlist[1]
        var5=ccountlist[2]
        var6=ccountlist[3]
        var7=ccountlist[4]

        f.write('%s %d %d %d %d %d %d \n' % (dag, hour, var3 ,var4, var5, var6, var7))
        f.close

    date = date + difference1
    timetuple2 = date.timetuple()

```

```

from MySQLdb import connect
from math import sqrt, sin, cos, pi
import zlib
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

COINCIDENCE_WINDOW = 2e5 # in nanoseconds
ADCOFFSET = 114.
ADCGAIN = -0.57

def get_db_cursor():
    """
    Connect to the eventwarehouse
    """
    DB_HOST = 'peene'
    DB_USER = 'analysis'
    DB_PASSW = 'Data4analysis!'
    DB_NAME = 'eventwarehouse'

    conn = connect(DB_HOST, DB_USER, DB_PASSW, DB_NAME)
    cursor = conn.cursor()
    return cursor

def get_events(day, station, t1, t2):
    """
    Get the timestamps for the events occurred on date 'day'
    in detector 'station'

    return: dict(event_id : {details,})
    """
    cursor = get_db_cursor()
    query = "SELECT e.event_id, e.time, e.nanoseconds, cdt.uploadcode, cd.doublevalue " \
           "FROM event e " \
           "JOIN calculateddata cd USING (event_id) " \
           "JOIN calculateddatatype cdt USING (calculateddatatype_id) " \
           "WHERE e.date = '%s' AND station_id = %d " \
           "AND e.time >= '%s' AND e.time <= '%s' " \
           "AND cdt.uploadcode IN ('PH1', 'PH2', 'PH3', 'PH4', 'IN1', 'IN2', 'IN3', 'IN4') " \
           "% (day, station, t1, t2)"
    cursor.execute(query)

    events = {}
    for eventID, t, n, cdt_code, cd_double in cursor.fetchall():
        t_spl = str(t).split(':')
        timestamp = int(t_spl[0])*3.6e12 + int(t_spl[1])*6e10 + int(t_spl[2])*1e9 + n

        if not int(eventID) in events:
            events[int(eventID)] = dict([('date',day), ('time',t), ('nanoseconds',n), \
                                         ('timestamp',timestamp), ('detector',int(station)), \
                                         ('latitude',0), ('longitude',0), ('height',0), \
                                         ('PH1',0), ('PH2',0), ('PH3',0), ('PH4',0), \
                                         ('IN1',0), ('IN2',0), ('IN3',0), ('IN4',0), \
                                         ('TR1',0), ('TR2',0), ('TR3',0), ('TR4',0)])

            if int(station) == 501: #NIKHEF
                (events[int(eventID)]['latitude'] = 52.355934
                 events[int(eventID)]['longitude'] = 4.951138
                 events[int(eventID)]['height'] = 56.64
                elif int(station) == 502: #Anton Pannekoek
                (events[int(eventID)]['latitude'] = 52.355279
                 events[int(eventID)]['longitude'] = 4.950100
                 events[int(eventID)]['height'] = 58.15
                elif int(station) == 503: #SARA
                (events[int(eventID)]['latitude'] = 52.35619
                 events[int(eventID)]['longitude'] = 4.952814
                 #(events[int(eventID)]['timestamp'] -= 15
                 events[int(eventID)]['height'] = 43.0
                elif int(station) == 504: #MATRIX
                (events[int(eventID)]['latitude'] = 52.357024
                 events[int(eventID)]['longitude'] = 4.95445
                 events[int(eventID)]['height'] = 43.0
                elif int(station) == 505: #PIMU

```



```

        (events[int(eventID)]['latitude'] = 52.357223
        (events[int(eventID)]['longitude'] = 4.94841
        (events[int(eventID)]['height'] = 43.0

    if cdt_code == 'PH1':
        (events[int(eventID)]['PH1'] = float(cd_double) * ADCGAIN
    elif cdt_code == 'PH2':
        (events[int(eventID)]['PH2'] = float(cd_double) * ADCGAIN
    elif cdt_code == 'PH3':
        (events[int(eventID)]['PH3'] = float(cd_double) * ADCGAIN
    elif cdt_code == 'PH4':
        (events[int(eventID)]['PH4'] = float(cd_double) * ADCGAIN
    elif cdt_code == 'IN1':
        (events[int(eventID)]['IN1'] = float(cd_double) * ((ADCGAIN*2.5)/1000)
    elif cdt_code == 'IN2':
        (events[int(eventID)]['IN2'] = float(cd_double) * ((ADCGAIN*2.5)/1000)
    elif cdt_code == 'IN3':
        (events[int(eventID)]['IN3'] = float(cd_double) * ((ADCGAIN*2.5)/1000)
    elif cdt_code == 'IN4':
        (events[int(eventID)]['IN4'] = float(cd_double) * ((ADCGAIN*2.5)/1000)

    return events

def search_coincidences(detectors, day, start, end):
    """
    search for coincidences in the data from the
    detectors in the list
    """

    # put the timestamps of the detectors in a dictionary
    event_dict = {} # the events of all the detectors combined
    double_ts = {}
    timestamps = []
    ts_dict = {}
    for det in detectors:
        events = get_events(day, det, start, end)
        for eventID,details in events.iteritems():
            while(details['timestamp'] in timestamps): # we cannot have double timestamps
                details['timestamp'] += 1 # we set it back later
            if eventID in double_ts:
                double_ts[eventID] += 1
            else:
                double_ts[eventID] = 1

            event_dict[eventID] = details
            timestamps.append(details['timestamp'])
            ts_dict[details['timestamp']] = eventID

    timestamps.sort()

    # iterate through the list with all timestamps to find coincidences
    # in the COINCIDENCE_WINDOW
    coincidences = [(0,)]
    for ts_ref in timestamps:
        for ts in timestamps[(timestamps.index(ts_ref) +1):]:
            if (ts - ts_ref) < COINCIDENCE_WINDOW: # coincidence found
                if ts_ref == (coincidences[-1])[0]:
                    coincidences[-1].append( ts )
                else:
                    coincidences.append([ts_ref,ts])
            else:
                break
    coincidences.remove((0,))

    # convert the coincidence list of timestamps to
    # a list of event ids
    coincidences_ids = []
    for coincidence in coincidences:
        c_ids = []
        for timestamp in coincidence:
            c_ids.append(ts_dict[timestamp])
        coincidences_ids.append(c_ids)
    coincidences = coincidences_ids

```

```

# set the timestamps which were double back to their
# original value
for eventID in double_ts:
    (event_dict[eventID])['timestamp'] -= double_ts[eventID]

# remove coincidences with only two events
coincidences = filter_duos(coincidences)

# check if a coincidence is a subset of a previous coincidence
coincidences = filter_subsets(coincidences)

# check if a coincidence has a detector more than once
coincidences = filter_double_detectors(coincidences, event_dict)

# check the coincidence with a detector-specific coincidence window
coincidences = filter_timediff_distance(coincidences, event_dict)

# add the traces of the events that have a coincidence
add_traces(event_dict, coincidences)

# print '\n'.join( str(coincidences).split(', ') )
# print event_dict[(coincidences[0])[0]]

return event_dict, coincidences

def filter_duos(coincidences):
    """
    Remove the coincidences with only
    two events
    """
    to_be_removed = []
    for coincidence in coincidences:
        if len(coincidence) == 2:
            to_be_removed.append(coincidence)

    for coincidence in to_be_removed:
        coincidences.remove(coincidence)

    return coincidences

def filter_subsets(coincidences):
    """
    Check if the set of coincidences
    contain a coincidence which is a subset
    of another coincidence
    require: the list of coincidences is ordered
    """
    to_be_removed = []
    rem = False
    prev = []
    for coincidence in coincidences:
        if len(coincidence) == (len(prev) - 1):
            for i in range(len(coincidence)):
                if coincidence[i] == prev[i+1]:
                    rem = True
            else:
                rem = False
        if rem:
            to_be_removed.append(coincidence)
            rem = False
        prev = coincidence

    for coincidence in to_be_removed:
        coincidences.remove(coincidence)

    return coincidences

def filter_double_detectors(coincidences, event_dict):
    """

```



```

Check if the coincidences have one or more
detectors more than once
If so, flag it with "DOUBLE"
"""
for coincidence in coincidences:
    det_in_c = [] # detectors in a coincidence
    for eventID in coincidence:
        if type(eventID) == type('string'): # coincidence is already flagged
            break
        det_in_c.append( (event_dict[eventID])['detector'] )

    # if the coincidence has doubles, flag it
    if len( det_in_c ) != len( dict.fromkeys(det_in_c).keys() ):
        coincidence.append("DOUBLE")

return coincidences

def filter_timediff_distance(coincidences, event_dict):
    """
    Filter the coincidences with detector specific
    coincidence window
    If time difference is too big, flag it with "TOOLATE"
    """
    c = 299792458
    toolate = False
    for coincidence in coincidences:
        details = event_dict[coincidence[0]]
        first_detector = [details['timestamp'],]
        first_detector.extend( WGS84_xyz(details['latitude'], details['longitude'], details
['height']) )
        for eventID in coincidence[1:]:
            if type(eventID) != type('string'):
                details = event_dict[eventID]
                detector = [details['timestamp'],]
                detector.extend( WGS84_xyz(details['latitude'], details['longitude'], details
['height']) )

                timediff = (detector[0] - first_detector[0]) / 1e9
                distance = sqrt( (first_detector[1] - detector[1])**2 + \
                    (first_detector[2] - detector[2])**2 + \
                    (first_detector[3] - detector[3])**2 )

                if distance < (timediff*c):
                    toolate = True
                    break
        if toolate:
            coincidence.append('TOOLATE')
            toolate = False

    return coincidences

def WGS84_xyz(lat, lon, h):
    """
    convert the lat long h from WGS84 to cartesian coordinates
    """
    lat = lat * (pi/180)
    lon = lon * (pi/180)

    a = 6378137.0 # major semi-axis of reference ellipsoid
    b = 6356752.3142 # minor semi-axis of reference ellipsoid

    ecc_sq = 0.00669437999014 # first eccentricity squared of the reference ellipsoid
    N = a / sqrt( 1 - (ecc_sq * sin(lat)**2) ) # prime vertical radius of curvature

    X = (N+h) * cos(lat) * cos(lon)
    Y = (N+h) * cos(lat) * sin(lon)
    Z = ((N*(1-ecc_sq))+h) * sin(lat)

    return [X,Y,Z]

def add_traces(event_dict, coincidences):

```

```

"""
Add the traces to the events that have are part of a coincidence
"""
cursor = get_db_cursor()

for coincidence in coincidences:
    for eventID in coincidence:
        if type(eventID) == type(123):
            query = "SELECT edt.uploadcode, ed.blobvalue " \
                "FROM event e " \
                "JOIN eventdata ed USING (event_id) " \
                "JOIN eventdatatype edt USING (eventdatatype_id) " \
                "WHERE e.event_id = %d " \
                "AND edt.uploadcode IN ('TR1', 'TR2', 'TR3', 'TR4') " \
                "% (eventID)"
            cursor.execute(query)

            for edt_code, ed_blob in cursor.fetchall():
                trace = zlib.decompress( ed_blob )
                trace = trace.split(',')
                del(trace[-1])
                trace = map(lambda x: ((int(x)*ADCGAIN) + ADCOFFSET), trace)
                (event_dict[eventID])[edt_code] = trace

def get_hourly_coincidences(detectors, date, hour):
    """
    Get the coincidences for one hour on a given day
    """
    start = str(hour) + ':00:00'
    end = str(hour + 1) + ':00:00'

    return search_coincidences(detectors, date, start, end)

def get_coincidences_per_day(detectors, date):
    """
    Get the coincidences for one hour on a given day
    """
    start = '00:00:00'
    end = '23:59:59'

    return search_coincidences(detectors, date, start, end)

if __name__ == "__main__":

    # stations
    #501 NIKHEF
    #502 Anton Pannekoek
    #503 SARA
    #504 MATRIX
    #505 PIMU

    stationlist = [501,502,503,504,505]
    x_coordinaat = [0, 0, 0, 0, 0]
    y_coordinaat = [0, 0, 0, 0, 0]
    z_coordinaat = [0, 0, 0, 0, 0]
    latitude = [52.355905, 52.355294, 52.35619, 52.357024, 52.357223]
    longitude = [4.951221, 4.950215, 4.952814, 4.95445,4.94841]
    height = [43.0, 43.0, 43.0, 43.0, 43.0]

    f = open('locatie_data.txt', 'w')

    # bepaald x en y coördinaat van de 5 stations
    # schrijft station, x-coördinaat, y-coördinaat weg naar file
    # plot x,y grafiek

    for station in stationlist:
        lat, lon, h = latitude[stationlist.index(station)], longitude[stationlist.index(station)],
        height[stationlist.index(station)]
        x, y, z = WGS84_xyz(lat, lon, h)

```

```

        x_coordinaat[stationlist.index(station)], y_coordinaat[stationlist.index(station)],
z_coordinaat[stationlist.index(station)]= x , y, z
        print station, x_coordinaat[stationlist.index(station)], y_coordinaat[stationlist.index
(station)], z_coordinaat[stationlist.index(station)]
        f.write('%d, %f, %f, %f \n' % (station, x_coordinaat[stationlist.index(station)], y_coordinaat
[stationlist.index(station)], z_coordinaat[stationlist.index(station)]))

    print f
    f.close()

plt.plot(x_coordinaat, y_coordinaat, '^')

#plt.show()
#from pylab import *
N = 5
#y = rand(N)
#t = arange(N)
label = ['50%d' % (i+1) for i in range(N)]
for i in range(N):

    plt.plot([x_coordinaat[i]], [y_coordinaat[i]], marker='o', markersize=10, label=label[i])
    plt.text(x_coordinaat[i], y_coordinaat[i], label[i], fontsize=16)
    plt.grid()
#legend()
plt.title('locatie stations')
plt.show()

# berekent afstanden tussen stations
stations_combined = []
distance_data = {}

for i in stationlist:

    for j in stationlist:

        p,q = int(stationlist.index(i)), int(stationlist.index(j))

        #if stationlist.index(i) >= stationlist.index(j):
        if p >= q:
            continue
        name = str(i) + '_' + str(j)

        s,t = x_coordinaat[p], x_coordinaat[q]
        u,v = y_coordinaat[p], y_coordinaat[q]
        a,b = z_coordinaat[p], z_coordinaat[q]
        value = round(sqrt((s - t)*(s - t) + (u-v)*(u-v) + (a-b) * (a-b) ),1)

        distance_data[name] = value
        print name, value

#print distance_data

```

## Appendix B FLUKA model

De meetopstelling, bestaande uit vier scintillatieplaten die met gedeeltelijke overlap boven elkaar zijn gepositioneerd, is gesimuleerd m.b.v. FLUKA. Hiervoor is de volgende code ontwikkeld:

```
TITLE.
simulatie hisparc werkplaats
GLOBAL                      1.    1.
DEFAULTS                     NEW-DEFA
BEAM   -10000.0  -0.0  -1    30.0  30.0  1.0MUON+
BEAMPOS    0.0   0.0  -100.0  0.0   0.0
GEOBEGIN                                COMBNAME
    0 0    simulatie hisparc werkplaats
* Black body
SPH blkbody  0.0 0.0 0.0 10000000.0
* Void sphere
SPH void    0.0 0.0 0.0 1000000.0
* Top of roof
RPP roof1   -1000. 1000. -1000. 1000. 3. 6.
RPP roof2   -1000. 1000. -1000. 1000. 6. 18.
* Concrete roof
RPP roof3   -1000. 1000. -1000. 1000. 18. 30.
* AirBelowRoof
RPP AirBlwRf -1000. 1000. -1000. 1000. 30. 1000.
* Aluminium Foil around detector 1
RPP AluFoil1 -50.05 50.05 -25.05 25.05 827.95 830.05
* Detector 1 Geometry
RPP detect1  -50. 50. -25. 25. 828. 830.
* Lead Shielding above detector 2
RPP Shld2    -75. 75. -40. 40. 849.8 850.
* Aluminium Foil around detector 2
RPP AluFoil2 -50.05 50.05 -25.05 25.05 867.95 870.05
* Detector 2 geometry
RPP detect2  -50. 50. -25. 25. 868. 870.
* Lead Shielding above detector 3
RPP Shld3    -75. 75. -40. 40. 889.8 890.
* Aluminium Foil around detector 3
RPP AluFoil3 -50.05 50.05 -25.05 25.05 907.95 910.05
* Detector 3 geometry
RPP detect3  -50. 50. -25. 25. 908. 910.
* Lead Shielding above detector 4
RPP Shld4    -75. 75. -40. 40. 929.8 930.
* Aluminium Foil around detector 4
RPP AluFoil4 -50.05 50.05 -25.05 25.05 947.95 950.05
* Detector 4 geometry
RPP detect4  -50. 50. -25. 25. 948. 950.
END
* Black hole
BLKBODY    5 +blkbody -void
* Void around
VOID      5 +void -roof3 -AirBlwRf -roof1 -roof2
* Roof cement top
roof1     5 +roof1
* Isolation below cement top (polystyreen)
roof2     5 +roof2
* roof cellenbeton
roof3     5 +roof3
```

```

* Air
air      5 +AirBlwRf -roof3 -detect1 -Shld2 -detect2 -Shld3 -detect3 -Shld4
        -detect4 -AluFoil1 -AluFoil2 -AluFoil3 -AluFoil4
* aluminiumFoil Detector 1
Alufoil1 5 +AluFoil1 -detect1
* detector 1
detect1   5 +detect1
* lead shielding above detector 2
shield2   5 +Shld2
* aluminiumFoil around detector 2
Alufoil2 5 +AluFoil2 -detect2
* detector 2
detect2   5 +detect2
* lead shielding above detector 3
shield3   5 +Shld3
* aluminium foil around detector 3
Alufoil3 5 +AluFoil3 -detect3
* detector 3
detect3   5 +detect3
* lead shielding above detector 4
shield4   5 +Shld4
* aluminium foil around detector 4
Alufoil4 5 +AluFoil4 -detect4
* detector 4
detect4   5 +detect4
END
GEOEND
* 104 Air dry (near sea level)
MATERIAL          .00120484          AIR
COMPOUND -1.248D-4 CARBON -.755267 NITROGEN -.231781 OXYGENAIR
COMPOUND -0.012827 ARGON          AIR
* 570 Polyvinyltoluene
MATERIAL          1.03          Polyviny
COMPOUND  10.0 HYDROGEN  9.0 CARBON          Polyviny
* cellenbeton
MATERIAL          .6          CELLENBE
COMPOUND  -0.01 HYDROGEN -0.001 CARBON -.529107 OXYGENCELLENBE
COMPOUND  -0.016 SODIUM  -0.002 MAGNESIU -.033872 ALUMINUMCELLENBE
COMPOUND  -0.337021 SILICON -.013 POTASSIU -.044 CALCIUMCELLENBE
COMPOUND  -0.014 IRON          CELLENBE
MATERIAL  19. 39.0983 .862          POTASSIU
* Concrete Portland
MATERIAL          2.3          PORTLAND
COMPOUND  -0.01 HYDROGEN -0.001 CARBON -.529107 OXYGENPORTLAND
COMPOUND  -0.016 SODIUM  -0.002 MAGNESIU -.033872 ALUMINUMPORTLAND
COMPOUND  -0.337021 SILICON -.013 POTASSIU -.044 CALCIUMPORTLAND
COMPOUND  -0.014 IRON          PORTLAND
* Polystyrene (C8_H8)n
MATERIAL          1.06          POLYSTYR
COMPOUND  -.077418 HYDROGEN -.922582 CARBON          POLYSTYR
MAT-PROP          68.7 POLYSTYR
STERNHEI  3.2999 .1647 2.5031 .16454 3.2224          POLYSTYR
MAT-PROP          135.2 PORTLAND
STERNHEI  3.9464 .1301 3.0466 .07515 3.5467          PORTLAND
MAT-PROP          135.2 CELLENBE
STERNHEI  3.9464 .1301 3.0466 .07515 3.5467          CELLENBE
MAT-PROP          85.7 AIR
STERNHEI  10.5961 1.7418 4.2759 0.10914 3.3994          AIR
* ..+...1....+...2....+...3....+...4....+...5....+...6....+...7..

```

ASSIGNMA	BLCKHOLE	BLKBODY				
ASSIGNMA	VACUUM	VOID				
ASSIGNMA	PORTLAND	roof1				
ASSIGNMA	POLYSTYR	roof2				
ASSIGNMA	CELLENBE	roof3				
ASSIGNMA	AIR	air				
ASSIGNMA	ALUMINUM	Alufoil1				
ASSIGNMA	Polyviny	detect1				
ASSIGNMA	LEAD	shield2				
ASSIGNMA	ALUMINUM	Alufoil2				
ASSIGNMA	Polyviny	detect2				
ASSIGNMA	LEAD	shield3				
ASSIGNMA	ALUMINUM	Alufoil3				
ASSIGNMA	Polyviny	detect3				
ASSIGNMA	LEAD	shield4				
ASSIGNMA	ALUMINUM	Alufoil4				
ASSIGNMA	Polyviny	detect4				
USRBIN	10. ENERGY	-50. 60. 35.	830.EneDep1			
USRBIN	-60. -35. 828.	100. 100.	100.&			
USRBIN	10. ENERGY	-50. 60. 35.	870.EneDep2			
USRBIN	-60. -35. 868.	100. 100.	100.&			
USRBIN	10. ENERGY	-50. 60. 35.	910.EneDep3			
USRBIN	-60. -35. 908.	100. 100.	100.&			
USRBIN	10. ENERGY	-50. 60. 35.	950.EneDep4			
USRBIN	-60. -35. 948.	100. 100.	100.&			
USRTRACK	-1. ALL-PART	-52. roof3	1. 100.all			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ELECTRON	-52. roof3	1. 100.elektron			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. MUON+	-52. roof3	1. 100.muon			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ALL-PART	-53. detect1	1. 100.all			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ELECTRON	-53. detect1	1. 100.elektron			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. MUON+	-53. detect1	1. 100.muon			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ALL-PART	-54. detect2	1. 100.all			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ELECTRON	-54. detect2	1. 100.elektron			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. MUON+	-54. detect2	1. 100.muon			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ALL-PART	-55. detect3	1. 100.all			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ELECTRON	-55. detect3	1. 100.elektron			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. MUON+	-55. detect3	1. 100.muon			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ALL-PART	-56. detect4	1. 100.all			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. ELECTRON	-56. detect4	1. 100.elektron			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
USRTRACK	-1. MUON+	-56. detect4	1. 100.muon			
USRTRACK	5D4 1D-10		&			
RANDOMIZ	1.0					
START	500.	0.0				
STOP						

## Appendix C Kosmische deeltjesversnellers in de pers

wetenschap kort nieuws

### Supernova uit het jaar 185 is nu een super-deeltjesversneller

NRC 27 11-07-09

De energierijke deeltjes waarmee de aarde dag in dag uit wordt bestookt, krijgen hun hoge energie in schokgolven van geëxplodeerde oude sterren. Zo'n schokgolf werkt als een deeltjesversneller die veel krachtiger is dan de nieuwe Large Hadron Collider van CERN in Genève, als die eindelijk is opgestart. Het bestaan van die astronomische deeltjesversneller verklaart waarom het gas in die schokgolf veel kouder is dan op theoretische gronden was te verwachten. Dat hebben onder andere Utrechtse astronomen nu laten zien (*Science Express*, 25 juni).

Die op aarde inslaande deeltjes, de 'kosmische straling', bestaat vooral uit protonen (waterstofkernen) die met bijna de lichtsnelheid op ons afkomen. Naar de oorsprong van deze supersnelle deeltjes wordt al lange tijd gezocht.

Eveline Helder en haar collega's bestudeerden het gasvormige overblijfsel van een ster die in het jaar 185 in het zuidelijke sterrenbeeld Circinus (Kompas) explodeerde. Chinese astronomen zagen toen een 'nieuwe' ster die acht maanden later weer was verdwenen.



Röntgenopname van de nevel RCW 86, die in het jaar 185 door de explosie van een ster is ontstaan.

De door deze supernova uitgestoten gasmassa's zijn sindsdien als een bolvormige schokgolf voortgesnelld door het ijle gas van de interstellaire ruimte,

waarin ze uiteindelijk zullen oplossen. De nevel, RCW 86 geheten, is nu aan de hemel ongeveer anderhalf maal zo groot als de volle maan. Hij staat op een

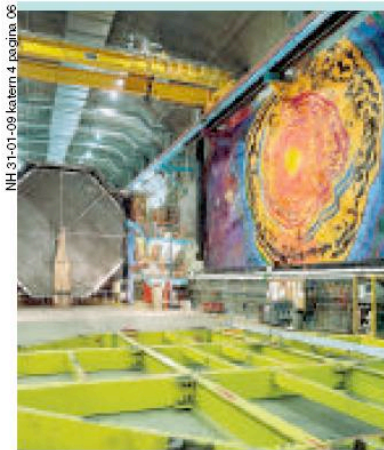
afstand van 8000 lichtjaar.

Uit een vergelijking van opnamen die in 2004 en 2007 met de röntgentelescoop Chandra werden gemaakt, hebben de astronomen afgeleid dat de schokgolf zich met een snelheid van circa 6000 kilometer per seconde uitbreidt. Bij deze snelheid zou het omringende gas (of beter gezegd: plasma) volgens de gangbare theorie tot een temperatuur van minstens 500 miljoen graden moeten worden verhit. Uit metingen met de Europese Very Large Telescope in Chili blijkt echter dat dit gas een temperatuur van 'slechts' 30 miljoen graden heeft.

Een groot deel van de energie 'verdwijnt' in het versnellen van de deeltjes. De deeltjes doorlopen, vanwege heersende magneetvelden, grillige banen en doorkruisen keer op keer de chaotisch turbulente fronten van de schokgolf. Ze worden hierdoor net zo lang worden versneld tot ze voorgoed kunnen ontsnappen en in alle richtingen het heelal in vliegen.

George Beekman

Figuur C.1: Super-deeltjesversneller in de NRC van zaterdag 11 juli j.l.



De MINOS-detector. FOTO FERMI LAB

### Fysici stellen temperatuur van de stratosfeer vast met ondergrondse metingen

Het is mogelijk om diep in de aarde te meten wat de temperatuur is hoog in de dampkring, in de stratosfeer. En wel met een nauwkeurigheid van ongeveer één graad, vergelijkbaar met wat via weerballonnen en met satellieten mogelijk is. De 'thermometer' is in dit geval een instrument op een diepte van 700 meter in een voormalige ijzermijn te Soudan, in de Amerikaanse staat Minnesota, dat daar deeltjes van de kosmische straling detecteert. Dat

schrijven Amerikaanse en Britse onderzoekers (*Geophysical Research Letters*, binnenkort te verschijnen).

De aardatmosfeer wordt voortdurend gebombardeerd door deeltjes van de kosmische straling. Hierbij ontstaan andere deeltjes, mesonen genoemd, die snel tot muonen (zware elektronen) vervallen. Doordat die muonen iets langer blijven bestaan, kunnen sommige van hen de aarde bereiken en er ook in doordringen.

Al meer dan tien jaar geleden werd ontdekt dat deze voortdurende 'muonenregen' in de loop van het jaar varieert. Dat komt vooral doordat in een warmere en daardoor ijlere atmosfeer iets



---

minder mesonen door botsingen verloren gaan. Zo blijven meer mesonen over die tot muonen kunnen vervallen – en omgekeerd.

Scott Osprey en zijn collega's hebben nu vastgesteld dat die muonenregen nauwkeurig de vijfdaagse variatie van de temperatuur in de stratosfeer volgt. Dat deden zij met de ondergrondse detector MINOS die ook wordt gebruikt voor het onderzoek aan neutrino's en die gevoelig is voor muonen. Het verband bleek toen zij de metingen van deze detector – verricht tussen 2003 en 2007 – vergeleken met temperatuurdata van het Europees Centrum voor Weersverwachtingen op de Middellan-

ge Termijn. De onderzoekers ontdekten dat zelfs de 'sudden stratospheric warming' in de muonmetingen is terug te vinden. Dat is een sterke, snelle stijging van de temperatuur van de stratosfeer die samenhangt met de verplaatsing of opsplitsing van een groot lagedrukgebied boven het noordpoolgebied. Zo'n ssw heeft een grote invloed op de strengheid van de eerstvolgende winter en de hoeveelheid ozon boven het noordpoolgebied. De onderzoekers suggereren dat ook in oudere metingen aan de kosmische straling nog een schat aan 'temperatuurdata' verborgen ligt.

George Beekman

*Figuur C.2: Temperatuurmetingen m.b.v. kosmische straling – NRC van 31/01/2009.*



# 'Als je denkt dat je het wel begrijpt, dan heb je er niet goed over nagedacht'

NOBELPRIJSWINNAAR BEZOECT VECHTSTEDEN COLLEGE

door Jessica de Jong - Visser

WEESP - Atomen, moleculen, quarks en neutronen. Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft weet als geen ander wat er leeft in de wereld van de natuurkunde. Dinsdag gaf hij een lezing op het Vechtsteden College, waarbij hij dieper inging op de allerkleinste deeltjes die er te vinden zijn. De lezing maakte onderdeel uit van een symposium over het Hisparc Project waar de bovenbouw van het VWO aan werkt.

Rector Verhulst was dinsdag erg in zijn nopjes dat juist op zijn school de Nobelprijswinnaar een verhaal kwam vertellen. Ook leerlingen van andere scholen kwamen naar de aula om de presentaties bij te wonen. Volgens de rector was de zaal gevuld met 'intellectueel kapitaal'. De Nobelprijswinnaar begon zijn verhaal met een eenvoudig voorbeeld waarmee hij zo duidelijk mogelijk probeerde uit te leggen wat voor onderzoek hij doet naar de allerkleinste deeltjes. Wat weten we? En wat weten we vooral niet van deze deeltjes? In het voorbeeld liet 't Hooft een suikerklontje zien en brak dat telkens in tweeën.

"Suikerkorreltjes bestaan uit suikerkristallen. Die kristallen bestaan weer uit suikermoleculen. Dat is het kleinste deeltje dat nog de specifieke eigenschappen, zoals kleur en smaak, van suiker heeft. Suikermoleculen zijn opgebouwd uit atomen, die in de natuurkunde worden getekend als gekleurde bolletjes. De atomen hebben een harde kern waar omheen diverse elektronen draaien. De krachten waarmee de elektronen vast zitten aan de kern, zijn vergelijkbaar met die in ons heet." Het uitleggen van deze materie is niet iets wat je in een uurtje uit kunt diepen. 't Hooft formuleert het als volgt. "Als je denkt dat je het wel begrijpt, dan heb je er niet goed over nagedacht. Het gaat over een rare, wonderlijke wereld waar we nog lang niet alles van weten."

## Kosmische straling

Kosmische straling kent nog steeds veel geheimen. Waarom hebben deze deeltjes zoveel snelheid en

dus zoveel energie? Waar komen ze vandaan? Uit een zwart gat? Om antwoord op die vragen te krijgen wordt er onderzoek verricht, ook

op het Vechtsteden College. Daar staat op het dak van de school een plaat die een melding maakt zodra er een kosmisch deeltje met

extrem hoge energie wordt waargenomen. Ook op andere scholen staat deze meetapparatuur, waardoor er een netwerk ontstaat. Dit



Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft vertelt over de allerkleinste deeltjes

project, met de naam Hisparc, draait nu twee jaar op het Vechtsteden College. De resultaten worden daadwerkelijk gebruikt om meer over de mysterieuze en zeldzame kosmische deeltjes te weten te komen. Het project wordt gecoördineerd door het Nationaal Instituut voor Subatomaire Fysica (Nikhef).

Docent Machiel Vegting legt uit wat er precies op school gebeurt. "Op het dak ligt een plastic plaat van een halve vierkante meter groot. Zodra er een deeltje vanuit de atmosfeer bij ons op de plaat komt, geeft de plaat een flitsje. Dat flitsje wordt omgezet in een stroompje en dat kan je meten. Die gegevens worden vervolgens via internet doorgegeven aan de centrale computer." De eindexamenleerlingen hebben het meetapparaat zelf gemaakt in het kader van hun profielwerkstuk. Hebben ze al iets gemeten? "Als je op een plaat iets meet, dan wil dat nog niet zoveel zeggen. Pas als je meerdere metingen hebt, kun je iets zeggen over de oorsprong van het deeltje en daar zijn wij in geïnteresseerd. We hebben tot nu toe een aantal pieken waargenomen. Die pieken kun je vergelijken met andere pieken en dan berekenen waar ze oorspronkelijk vandaan komen. Het gaat om restanten van de oerknal, dus dat is wel interessant. Het punt is dat je met dit soort onderzoeken altijd lange tijd moet meten. We gaan nu met de leerlingen aan de slag om te kijken hoeveel energie deze deeltjes hebben. Dat is ontzettend veel, dat kan wel een miljoen keer zoveel energie zijn als nu met de deeltjesversneller gemaakt kan worden."

## Deeltjesversneller

Na de lezing van 't Hooft konden de leerlingen hun eigen bijdrage aan het onderzoek presenteren. Daarbij werden ze nauwlettend in de gaten gehouden door diverse wetenschappers. De winnaar mag namelijk een bezoekje brengen aan de deeltjesversneller in Genève waar men test wat er gebeurt als kleine deeltjes met elkaar in botsing komen. Ook 't Hooft sprak in zijn presentatie over dit geavanceerde apparaat waarmee natuurkundige theorieën worden getest. "In Genève wordt onderzocht wat er gebeurt als de allerkleinste deeltjes met elkaar in botsing komen. Zoals het er nu naar uitziet, ontstaat er op een gegeven moment nog onbekende natuurkunde. We vermoeden zelfs dat als we op een bepaald niveau zijn, dat we dan de krachten die actief zijn geweest bij het ontstaan van het heelal zullen ontdekken." Wellicht dat er tegen die tijd wel voormalige leerlingen van het Vechtsteden College betrokken zullen zijn bij deze nieuwe vorm van natuurkunde.



Docent Machiel Vegting praat de middag aan elkaar



Leerlingen van diverse scholen luisteren naar de presentaties

## Trefwoordenlijst

### A

Antimaterie: de negatieve energie oplossingen van de Dirac vergelijking worden gerepresenteerd door antideeltjes zoals het positron - 'elektron met positieve eenheidslading' -. Met andere woorden: ieder deeltje bezit een antideeltje dat een groot aantal eigenschappen gemeen kan hebben. Wanneer een deeltje op zijn antideeltje botst, kan annihilatie optreden.

Atomen: de oude Grieken poneerden dat de materie samengesteld is van elementaire bouwstenen 'atomen'. Een atoom bezit een kern opgebouwd uit positief geladen protonen en elektrisch neutrale neutronen. De kern wordt omgeven door elektronen zodat de netto lading van het atoom 0 is.

### D

Diffunderen: in dit verband wordt bedoeld dat kosmische deeltjes voldoende energie bezitten om te ontsnappen aan de elektromagnetische velden (en gravitatie) die binnen een melkwegstelsel heersen

Donkere energie: de snelheid waarmee het heelal uitdijt, is in tegenspraak met de aanname dat alleen gravitatie hiervoor verantwoordelijk is. De oorsprong van de extra 'donkere' energie die nodig is om experimentele observaties te verklaren is onduidelijk.

Donkere materie: o.a. uit de omlooptijd van sterren in melkwegstelsels, kan afgeleid worden hoeveel materie een melkwegstelsel bevat. De gemeten snelheden komen echter niet overeen met de zichtbare hoeveelheid materie. Er lijkt zich 'onzichtbare materie' binnen melkwegstelsels te bevinden: de donkere materie.

### E

Elektronen: ondeelbare – elementaire - deeltjes met negatieve elektrische eenheidslading.

Elektroscoop: relatief eenvoudig apparaat om de aanwezigheid van elektrische lading aan te tonen.

### F

Fotoversterkerbuizen: de werking van de fotoversterkerbuis is gebaseerd op het principe van het foto-elektrische effect, het vrijmaken van een of meer elektronen uit het rooster van (metaal)atomen. Vervolgens worden deze elektronen versneld m.b.v. een elektrische potentiaal en botsen op hun beurt weer op een metalen vlak waarbij per elektron meerdere elektronen vrijkomen. Herhaalde versnelling levert zo een goed meetbaar elektrisch signaal.

### G

Gluonen: krachtdeeltjes die ervoor zorgen dat quarks, en dus protonen en neutronen, binnen de kern gebonden worden. De kernkracht is vele malen groter dan de elektromagnetische kracht.

### H

Hadronische deeltjes: in tegenstelling tot het elektron, dat behoort tot de groep 'leptonen' en een elementair deeltje is, zijn alle hadronische deeltjes samengesteld uit (anti)quarks. Het proton en neutron zijn voorbeelden van hadronen; beide zijn een gebonden toestand van 3 quarks.

### I

Ionisatie: beschrijft het verschijnsel dat bijvoorbeeld een atoom kan ondergaan na interactie of voldoende energietoevoer zodat een elektron zich uit het atoom vrij kan maken. Het atoom 'mist' vervol-

gens een elektron en wordt dan 'ion' genoemd. Anderzijds kunnen atomen ook extra elektronen opnemen.

## **N**

Neutronen: hadron opgebouwd uit twee 'down'-quarks en een 'up'-quark. Neutronen zijn elektrisch neutraal. Bouwsteen van de kern van een atoom.

## **O**

Oscilloscoop: m.b.v. een oscilloscoop (kathodestraalbuis) kunnen elektrische signaalveranderingen in de tijd zichtbaar gemaakt worden.

## **P**

Protonen: hadron opgebouwd uit twee 'up'-quarks en een 'down'-quark. Protonen zijn elektrisch positief geladen (eenheidslading). Bouwsteen van de kern van een atoom.

## **Q**

Quarks: elementaire bouwstenen van protonen en neutronen. Er bestaan 6 verschillende 'smaken' quarks georganiseerd in 3 families: 'up' en 'down', 'charm' en 'strange', en 'top' en 'bottom'.

## **S**

Scintillator: (an)organisch materiaal waarin, door interactie met geladen deeltjes, atomen in aangeslagen toestand gecreëerd kunnen worden. Na interactie, keren de atomen weer in de grondtoestand terug onder emissie van fotonen.

Spallatie: opdelen van de kern van een atoom in 2 of meer delen.

## **T**

Tijdscoïncidentie: door vast te stellen dat op exact hetzelfde tijdstip op verschillende plekken geladen deeltjes detectoren passeren, kan vastgesteld worden dat deze deeltjes bij een en dezelfde deeltjeslawine behoren en niet het gevolg zijn van 'toevallige coïncidenties'.

## Literatuur

- [1] <http://www.fom.nl/>
- [2] <http://www.nikhef.nl/>
- [3] <http://www.ru.nl/>
- [4] <http://www.rug.nl/kvi/>
- [5] <http://www.rug.nl/>
- [6] <http://www.hisparc.nl/>
- [7] <http://www.desy.de/>
- [8] <http://public.web.cern.ch/public/>
- [9] <http://www.fnal.gov/>
- [10] <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>
- [11] Pierre Auger Observatorium: <http://www.auger.org/>
- [12] [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1936/hess-lecture.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1936/hess-lecture.html)
- [13] J. Horändel, Radboud Universiteit Nijmegen, interacademiaal college 2008.
- [14] J. Blümer et al., Prog. in Particle and Nuclear Physics (2009, in print).
- [15] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (17) (1966) 748–750,  
G.T. Zatsepin en V. A. Kuz'min, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters 4  
(1966) 78–80.
- [16] P. Auger and R. Maze, Comptes rendus, Acad. Sci. 207 (1938) 228.
- [17] C. Timmermans et. al., Nederlands tijdschrift voor Natuurkunde, december 2004.
- [18] Bonhoeffer College, Castricum: <http://www.bonhoeffer.nl/>
- [19] Python Versie 2.1.14: <http://www.pythonxy.com/>
- [20] Nagoya Multi-Directional Muon Telescope: <http://stelab.nagoya-u.ac.jp/>
- [21] Oostvaarders College, Almere: <http://www.ovc.nl/>
- [22] Zie: <http://www.fluka.org/fluka.php>
- [23] Zie: <http://www.fluka.org/flair/index.html>
- [24] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [25] Koning Willem II College, Tilburg: <http://www.willem2.nl/>
- [26] Dr. Moller College, Waalwijk: <http://www.drmollercollege.nl/>
- [27] Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde.
- [28] Herman Awater, 'Bepaling van de energie van kosmische deeltjes uit deeltjeslawines in de  
atmosfeer', Radboud Universiteit Nijmegen, 15 april 2005.
- [29] <http://root.cern.ch/>
- [30] Harm Schoorlemmer, Radboud Universiteit Nijmegen.
- [31] Dokkinga College, Dokkum: <http://www.dokkinga.nl/>
- [32] M. Nagano and A.A. Watson, Rev. Mod. Phys. 72 (2000), 689 – 732.
- [33] COACH Stichting CMA, <http://www.cma.science.uva.nl/>

- [34] Excel, <http://www.microsoft.com/office/>
- [35] Cdas, intern document van het Pierre Auger observatorium.
- [36] David Fokkema, private communication.
- [37] Ad van den Berg en Sybren Harsma, private communication.
- [38] Vechtstede College, Weesp: <http://www.vechtstedecollege.nl/>