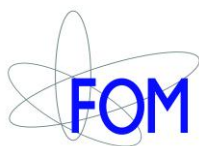


‘Leraar in Onderzoek’

Hoogenergetische Kosmische Straling

20 oktober 2010



Op de voorpagina; de deelnemende docenten in een van de vergaderzalen van het FOM bureau. Op de voorste rij (v.l.n.r.): Niek Schultheiss, Wim Meeuwsen en Machiel Vegting. Op de achterste rij (v.l.n.r.): Hans Montanus, Frans Marcelis, Dorrith Pennink en Willem Remmers.

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

Coördinatie: Surya Bonam.

Eindredactie: Bob van Eijk

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.

Het onderzoek van twee docenten is met externe middelen gefinancierd.

Inhoud

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Introductie: Leraar in Onderzoek | 1 |
| 2. | Deeltjes fysica en astrodeeltjes fysica | 3 |
| 2.1 | Deeltjes fysica | 3 |
| 2.2 | Astrodeeltjes fysica | 4 |
| 2.3 | Docenten en (astro)deeltjes fysica | 5 |
| 2.4 | Kosmische straling | 6 |
| 2.4.1 | Deeltjeslawine | 6 |
| 2.4.2 | Energie spectrum | 7 |
| 2.4.3 | De 'knie' | 8 |
| 2.4.4 | De 'enkel' en hoger | 9 |
| 2.4.5 | Detectie van kosmische straling | 9 |
| 2.5 | Docenten en HiSPARC | 11 |
| 2.6 | Deelprojecten | 12 |
| 3. | Rapportage Leraren in Onderzoek | 15 |
| 3.1 | Analyse van het pulshoogte histogram | 15 |
| 3.1.1 | Introductie | 15 |
| 3.1.2 | Doelstelling en onderzoeksvragen | 17 |
| 3.1.3 | Energieverlies van geladen deeltjes | 17 |
| 3.1.4 | Experimentele bevindingen | 21 |
| 3.1.5 | Energieverlies van gamma's | 24 |
| 3.1.6 | Simulatieonderzoek | 27 |
| 3.1.7 | Experimentele bevindingen | 28 |
| 3.1.8 | Verhouding van aantal gamma's en het aantal geladen deeltjes | 29 |
| 3.1.9 | Tijdrelaties tussen de scintillatieplaten van station 501 | 32 |
| 3.1.10 | Conclusie | 35 |
| 3.1.11 | Woord van dank | 36 |
| 3.2 | Een RouteNet door kennisland | 37 |
| 3.2.1 | Onderzoeksopdracht | 37 |
| 3.2.2 | Introductie: het idee | 37 |
| 3.2.3 | Kruispunten maken | 38 |
| 3.2.4 | Doelen | 39 |
| 3.2.5 | Motivatie | 40 |
| 3.2.6 | De gebieden | 40 |
| 3.2.7 | Interactie met materie | 40 |
| 3.2.8 | Relativiteitstheorie | 41 |
| 3.2.9 | Microscopische opbouw van materie | 41 |
| 3.2.10 | Macroscopische opbouw materie | 41 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.2.11 | Onderzoekers | 41 |
| 3.2.12 | De uitvoering | 42 |
| 3.2.13 | Status | 43 |
| 3.2.14 | Conclusie | 44 |
| 3.3 | De detectie van kosmische straling | 45 |
| 3.3.1 | Onderzoeksopdracht | 45 |
| 3.3.2 | Introductie | 45 |
| 3.3.3 | Deeltjesdetectie | 46 |
| 3.3.4 | Een directe formule | 48 |
| 3.3.5 | De deeltjesdichtheid | 51 |
| 3.3.6 | De richting van de shower | 53 |
| 3.3.7 | De energie van het primaire deeltje | 55 |
| 3.3.8 | Een alternatieve distributie | 56 |
| 3.3.9 | Conclusie | 57 |
| 3.4 | Data analyse cluster Nijmegen | 59 |
| 3.4.1 | Onderzoeksopdracht | 59 |
| 3.4.2 | Introductie | 59 |
| 3.4.3 | Wat wordt er gemeten en hoe? | 60 |
| 3.4.4 | Energieverdeling | 63 |
| 3.4.5 | Histogrammen maken | 65 |
| 3.4.6 | Fitten | 66 |
| 3.4.7 | Histogrammen maken met verbeterde MPV-waarde | 67 |
| 3.4.8 | Fitten met verbeterde MPV-waarde | 67 |
| 3.4.9 | Fitten met convolutie | 71 |
| 3.4.10 | Conclusie | 74 |
| 3.5 | MPV-waarde en telsnelheid als functie van omgevingstemperatuur | 75 |
| 3.5.1 | Onderzoeksopdracht | 76 |
| 3.5.2 | Introductie | 76 |
| 3.5.3 | Temperatuurgevoelige elementen van de HiSPARC opstelling | 78 |
| 3.5.4 | Opzet van het experiment | 78 |
| 3.5.5 | Uitvoering van de metingen | 80 |
| 3.5.6 | Calibratie experimenten | 82 |
| 3.5.7 | Referentiesituatie bij $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 83 |
| 3.5.8 | Eerste verkennende metingen: MPV-waarden | 86 |
| 3.5.9 | Eerste verkennende metingen: event-rate en signaal-ruisverhouding | 89 |
| 3.5.10 | Verslag van alle metingen: MPV-waarden | 89 |
| 3.5.11 | Verslag van alle metingen: event-rate en signaal-ruisverhouding | 92 |
| 3.5.12 | Conclusie | 94 |

| | | |
|-------------------|---|------------|
| 3.5.13 | Aanbevelingen | 95 |
| 3.6 | MPPC versus PMT | 97 |
| 3.6.1 | Onderzoeksopdracht | 97 |
| 3.6.2 | Introductie | 98 |
| 3.6.3 | Theorie | 98 |
| 3.6.4 | Uitgevoerde experimenten | 100 |
| 3.6.5 | Aanpassing van de schakeling | 102 |
| 3.6.6 | Metingen aan MPPC S10362-33-100C | 104 |
| 3.6.7 | Temperatuur invloed | 106 |
| 3.6.8 | Coïncidenties | 109 |
| 3.6.9 | Metingen aan opstelling met coïncidentie | 111 |
| 3.6.10 | Afsluitende metingen | 114 |
| 3.6.11 | Conclusie | 117 |
| 3.6.12 | Suggesties voor het vervolg | 118 |
| 3.6.13 | Dankwoord | 119 |
| 3.7 | Signaalanalyse scintillator/lichtgeleider/fotobuis combinatie | 121 |
| 3.7.1 | Onderzoeksopdracht | 121 |
| 3.7.2 | Introductie | 121 |
| 3.7.3 | Signalen | 123 |
| 3.7.4 | De metingen | 124 |
| 3.7.5 | Conclusie | 127 |
| 4. | Conclusie | 129 |
| 4.1 | Evaluatie en vooruitblik | 129 |
| 4.2 | HiSPARC leerlingensymposium 2010 | 129 |
| Appendix A | RouteNet software | 133 |
| Appendix B | Script <langaufun> | 141 |
| Appendix C | Convolutiefit MPV-waarden detector 7 (2004) | 142 |
| Appendix D | HiSPARC leerlingensymposium in de pers | 143 |
| | Trefwoordenlijst | 145 |
| | Literatuur | 147 |

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 (te) laag.

Het probleem van de beperkte 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 (fundamenteel) onderzoek.

Het FOM¹ [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 academies, nemen nader kennis van de huidige wetenschappelijke wijze van werken, ontwikkelen hun eigen onderzoeks vaardigheden 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 2009/2010 hebben wederom docenten onderzoek uitgevoerd op het gebied van de subatomaire natuurkunde. Niek Schultheiss, Wim Meeuwsen, Machiel Vegting, Hans Montanus, Guus Mulder en Dorrieth Pennink zijn werkzaam geweest bij Nikhef [2] in Amsterdam. Frans Marcelis heeft een jaar lang de HEF groep bij de Radboud Universiteit [3] in Nijmegen bezocht. Willem Remmers 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. Het hoofdstuk kent twee thema's; het fysisch wetenschappelijk onderzoek en de ontwikkeling van lesmateriaal voor het voortgezet onderwijs. Tenslotte wordt in hoofdstuk 4 een impressie gegeven van het HiSPARC Symposium 2010 [6] bij het University College Utrecht (gastheer: Dr. Filipe Freire)...

Dit document (en rapport uit 2008/2009) is ook elektronisch beschikbaar [7]).

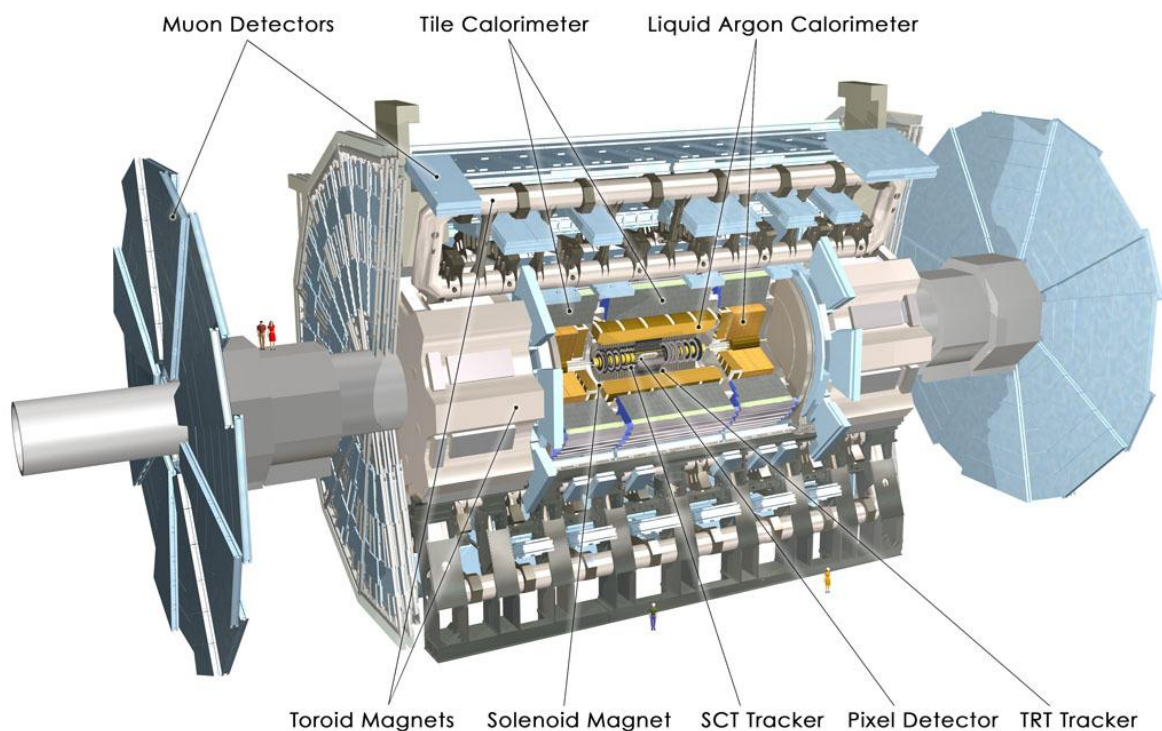
¹ Het project 'Leraar in Onderzoek' wordt financieel mogelijk gemaakt door de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM). Twee docenten zijn afgelopen jaar extern gefinancierd.

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, bijvoorbeeld in Hamburg bij DESY [8], in Genève bij CERN [9] en in Chicago bij Fermilab [10]. In het heelal zijn 'kosmische' versnellers en deze worden steeds vaker gebruikt als welkome aanvulling op wat op aarde in het laboratorium mogelijk is. Kortom, astrodeeltjes fysica brengt natuur- en sterrenkunde samen.



Figuur 2.1: De ATLAS deeltjes detector [11] aan de 'Large Hadron Collider' bij het CERN in Genève, Zwitserland, is op jacht naar het Higgs deeltje.

Nikhef, RUN en RUG hebben onderzoeksgroepen die zich bezig houden met experimenten in de (astro)deeltjes fysica. De theoriegroepen rekenen mee met de experimentele natuurkundigen. Technische afdelingen ondersteunen de implementatie van detectietechnieken, bouw van detectoren en ontwikkeling van data-analyse technieken.

Vandaag weten we dat moleculen uit atomen bestaan die op hun beurt weer deelbaar zijn (ondanks het feit dat het Griekse woord 'atomos' ondeelbaar betekent). Protonen, neutronen en elektronen vormen atomen. Elektronen lijken vooralsnog niet meer deelbaar, protonen en neutronen wel; deze bestaan uit een combinatie van verschillende soorten quarks en gluonen. Naast deze bouwstenen van materie bezitten deeltjes ook antideeltjes, die antimaterie vormen. Positronen zijn 'anti-elektronen' ter-

wijl alle quarks eveneens hun antideeltje hebben.

Hoe onderzoeken we deze minuscule deeltjes? Om op aarde onderzoek te doen zijn gigantische deeltjesversnellers nodig. Eigenlijk is een versneller een soort super microscoop; hoe kleiner de deeltjes zijn die we willen bestuderen, des te krachtiger de microscoop moet zijn. In de kosmos vormen bijzondere fenomenen en zeer grote magnetische velden als het ware 'natuurlijke' versnellers. Voor het astrofysische onderzoek hoeven we daarom '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 en veroorzaakt een zogenaamde deeltjes regen. Deze deeltjes regen bevat miljoenen deeltjes waarvan slechts een deel het aardoppervlak bereikt. Het zijn deze deeltjes die uiteindelijk kunnen worden waargenomen (Figuur 2.2).



Figuur 2.2: Het Auger experiment. Op de voorgrond een van de ruim 1600 deeltjesdetectoren. In het gebouw op de achtergrond bevindt zich een fluorescentiedetector waarmee het lichtspoor van een deeltjeslawine gemeten wordt. Bron: de Auger collaboratie [12].

Voor de detectie van de geladen deeltjes in een deeltjeslawine gebruiken we o.a. scintillatoren. Het materiaal waarvan deze detectoren gemaakt zijn, heeft als eigenschap een lichtflits te genereren als er een geladen deeltje passeert. De intensiteit van de lichtflits is afhankelijk van de hoeveelheid energie die door het inkomende geladen deeltje in het materiaal wordt afgegeven. De lichtpulsen worden door fotoversterkerbuizen omgezet in elektrische signalen. Deze worden met behulp van een digitale oscilloscoop 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 stammen). Daarom wordt gebruik gemaakt van minstens twee scintillatorplaten (ieder 0.5 m^2) met een onderling afstand (gemeten in het platte vlak) van 5 of meer meter. Alleen als door beide platen tegelijkertijd deeltjes gaan worden ze geregistreerd. We spreken dan van een coïncidentie; de kans is dan groot dat ze afkomstig zijn van hetzelfde kosmisch deeltje.

Door nu de gegevens van de verschillende meetstations te correleren, kunnen deeltjeslawines onderzocht worden, die zich over een oppervlak van honderden vierkante kilometers uitstrekken!

Met behulp van de deeltjesdichtheid en hoek van inval kan uiteindelijk de energie en de richting van het kosmische deeltje bepaald worden dat 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 astrodeeltjes fysica 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 astrodeeltjes fysica. 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?'*²

Kosmische straling is de deeltjes- en fotonenregen uit het heelal die onophoudelijk de aardse atmosfeer binnendringt. 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 mogelijk 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 die van boven afkomstig was. Vijfentwintig jaar later kreeg Hess de Nobelprijs voor zijn bevindingen [13].

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 Deeltjeslawine

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 multiplicitéit 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.

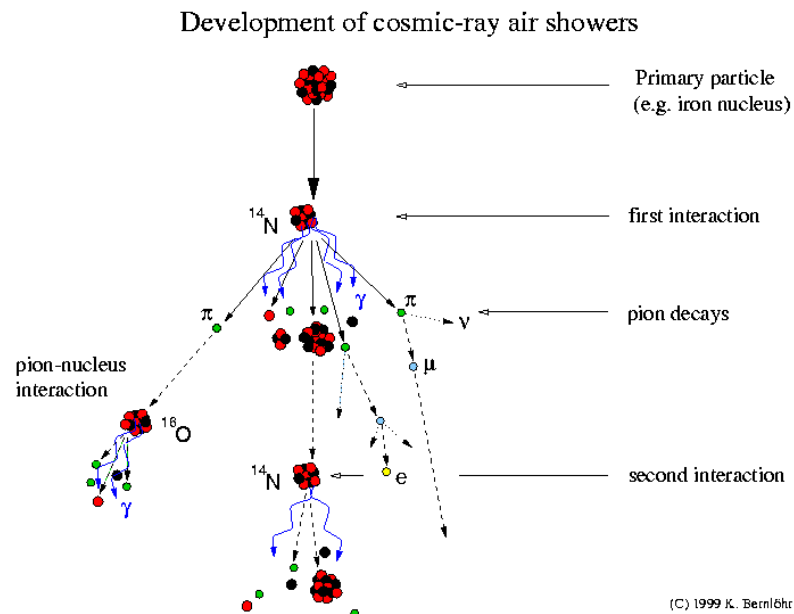
Figuur 2.3 illustreert het ontstaan van zo'n shower. Hadronische deeltjes (zoals o.a. protonen en neutronen) wisselwerken en produceren nieuwe hadronische deeltjes, waaronder pionen. Sommige van de nieuw gevormde deeltjes zijn instabiel en vallen na enige tijd spontaan uiteen in lichtere deeltjes. Zo 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 door absorptie af.

Het grootste deel van de energie van het primaire deeltje wordt zo geabsorbeerd in de atmosfeer. Een

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

beperkt deel bereikt het aardoppervlak. We zijn vooral geïnteresseerd in de muonen die het aardoppervlak bereiken!

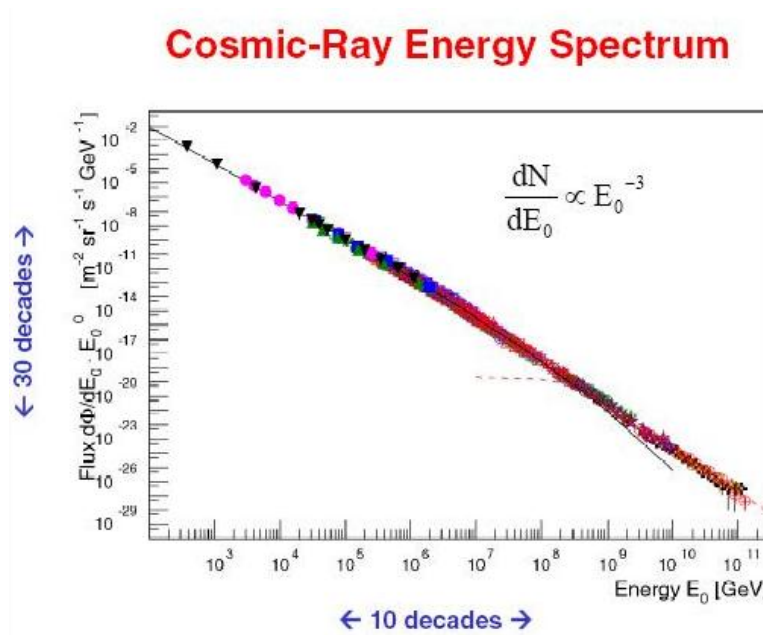


Figuur 2.3: Schematische weergave van de ontwikkeling van een deeltjeslawine ('cosmic ray air shower'). Het kosmische deeltje is hier een ijzerkern.

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:

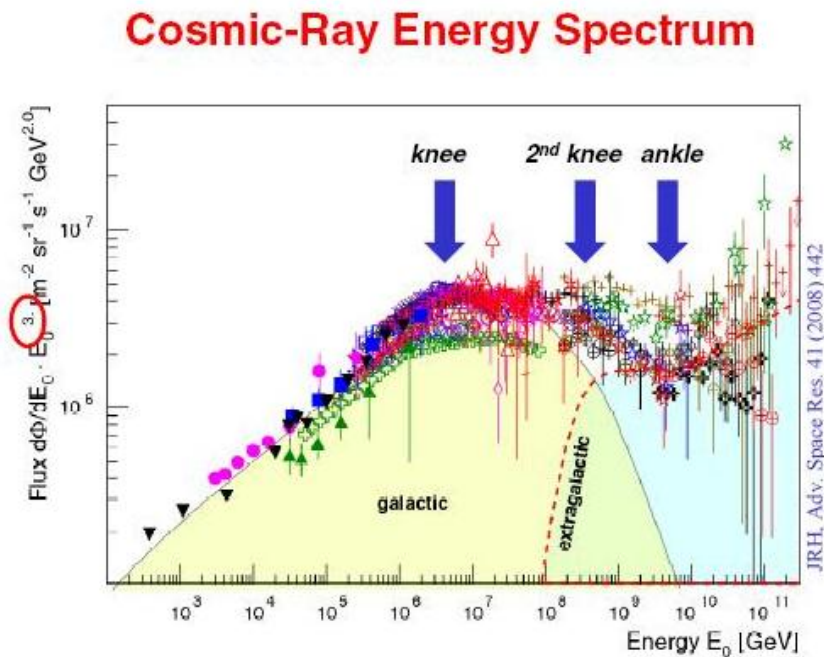
$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (2.1)$$



Figuur 2.4: Energiespectrum van primaire kosmische deeltjes [14].

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 [14].

2.4.3 De 'knie'

De knie is het gebied dat ligt net boven een energie van 4×10^{15} eV met een spectrale index $y : -3.1$. Voor energieën boven de 4×10^{17} eV, wordt het spectrum nog steiler: $y : -3.3$. 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 in te vangen. 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 [15].

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: γ neemt weer een waarde aan van ~ -2.7 . Men spreekt hier van de 'enkel'. In dit gebied zou het aandeel van extragalactische straling domineren.

Boven de 4×10^{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 [16]. Zij berekenden dat kosmische deeltjes met een energie groter dan 5×10^{19} eV door wisselwerking met de microgolf achtergrondstraling in het heelal 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 groter 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

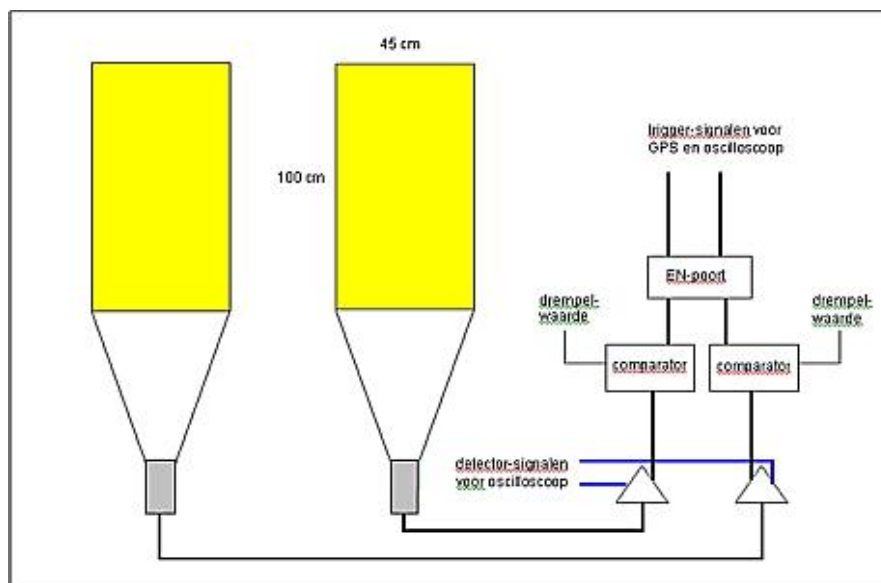
Uit het energiespectrum in Figuur 2.4 blijkt dat het aantal kosmische deeltjes dat de aardatmosfeer binnenkomt (de flux) met toenemende energie extreem sterk afneemt. Van de meest energierijke deeltjes is de flux beperkt tot één deeltje per vierkante kilometer per eeuw. Vanwege deze schaarste is het direct meten (d.w.z. buiten de atmosfeer) van hoogenergetische (≥ 1 PeV) kosmische deeltjes ondoenlijk: meettijd en detectieoppervlak zouden buitensporig lang c.q. groot moeten zijn. Eind jaren dertig in de vorige eeuw wisten Auger e.a. [17] 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 en fotonen, 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 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 lawinedeeltjes 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 tijdstip een signaal gemeten wordt!

Door nu de gegevens van de verschillende meetstations via de gebeurtenissen met hun individuele tijdstempels te correleren, kunnen deeltjeslawines 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 o.a. publicatie in het Nederlands tijdschrift voor Natuurkunde [18] 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 meettijd 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 achtergrond.

Binnen het HiSPARC project komen naast fundamentele natuurkundige vraagstukken, vele aspecten van (astro)deeltjes fysica aan bod. Bovendien is (astro)deeltjes fysica 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 [19] 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, is recentelijk, na een periode van praktijk testen, gecertificeerd. Deze module sluit uitste-

kend 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 data-opslag bij een wetenschappelijke instelling (Figuur 2.8). Zo vormen zij lokale netwerken. 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 detector opstellingen, 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.

5. Een HiSPARC opstelling met vier scintillatieplaten is geïntegreerd in het KASCADE experiment in Karlsruhe. Doel van deze opstelling is om, in combinatie met de metingen van de KASCADE detectoren, een nauwkeurig inzicht te krijgen in gevoeligheid en bedrijfszekerheid van de HiSPARC detector.
6. Een belangrijk aspect bij de analyse van deeltjeslawines en het correleren van verschillende detectiepunten is hoe precies het centrum ('core') van een lawine gereconstrueerd kan worden. Hiervoor zijn een aantal mathematische vraagstukken nader beschouwd.

Deelvraagstukken zijn ook uitermate 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 natuurkundig onderzoek.

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

3. Rapportage Leraren in Onderzoek

3.1 Analyse van het pulshoogte histogram



Figuur 3.1: Dorrieth Pennink – Bonhoeffer College Castricum [19] -.

Dorrieth 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. Dit is haar tweede jaar als onderzoeker.

3.1.1 Introductie

HiSPARC is een project waarbij middelbare scholen met wetenschappelijke instellingen samenwerken om kosmische straling met extreem hoge energie te kunnen meten. Het gaat hierbij om zeldzame, extreem energierijke deeltjes uit de kosmos. Zo'n deeltje bereikt het aardoppervlak niet, maar botst op een luchtmolecuul hoog in de atmosfeer. Bij de botsing ontstaan nieuwe deeltjes die in dezelfde richting bewegen als het primaire. Ook deze exemplaren botsen waardoor er weer meer ontstaan. Deze kettingreactie leidt tot een lawine van deeltjes die met een snelheid van bijna 300.000 km/s naar het aardoppervlak razen. Door deze lawines te analyseren, wordt getracht duidelijkheid te krijgen over aard en herkomst van de mysterieuze primaire deeltjes.

Het HiSPARC project maakt het voor middelbare scholieren mogelijk om een bijdrage te leveren aan dit astrofysisch onderzoek. Onder toezien oog van fysici hebben leerlingen detectoren gebouwd om op het dak van hun school te plaatsen. Deze maken deel uit van een netwerk van detectoren op scholen, universiteiten en andere gebouwen. Analyse van de meetgegevens van dit netwerk moet licht werpen op de raadselen rond deze onbegrepen, hoogenergetische primaire deeltjes.

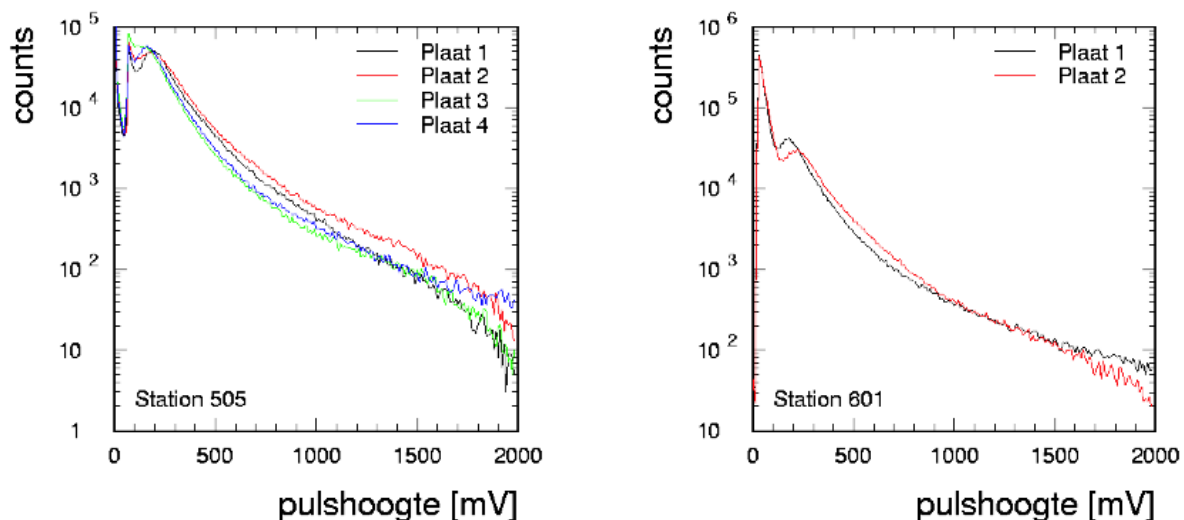
Een HiSPARC station bestaat uit twee of vier detectorplaten. Detectorplaten zijn als volgt opgebouwd: een scintillatieplaat met een oppervlak van $0.5 \times 1 \text{ m}^2$ en een dikte van 2 cm; een wigvormige lichtge-

leider en een fotomultiplier. Een GPS voorziet in een nauwkeurige tijdregistratie. Als binnen een klein tijdsinterval ($1.5 \mu\text{s}$) een puls wordt geregistreerd in twee of meer platen (afhankelijk van opstelling en triggervoorwaarden), dan wordt deze gebeurtenis (event) vastgelegd: pulsen van alle platen worden geregistreerd met bijbehorend tijdstempel van de GPS.

Een puls ontstaat als een energetisch deeltje bij passage door de plaat wisselwerkt met de scintillator. Excitatie, c.q. ionisatie van moleculen in de scintillator leidt tot emissie van licht. Dit fenomeen staat bekend als luminescentie. Via de lichtgeleider belandt (een deel van) het licht bij de fotoversterker waar het wordt omgezet in een zwakke stroom foto-elektronen. Verdere versterking resulteert in het uiteindelijke signaal: een negatieve spanningspuls.

Kenmerkend voor scintillatoren is een grote energiegevoeligheid. Bovendien vertonen de meeste scintillatoren lineair gedrag boven een bepaald minimum: de lichtoutput van een scintillator is recht evenredig met de geabsorbeerde energie. Als de verdere verwerking van het signaal eveneens lineair is zal het uiteindelijke signaal evenredig zijn met de afgezette energie. Een ander kenmerk is de snelheid: respons- en hersteltijden van scintillatoren zijn doorgaans kort in vergelijking met andere detectoren. Hierdoor kan het tijdsinterval tussen gebeurtenissen met grotere precisie worden bepaald. In de plastic HiSPARC detectoren wordt polyvinyltolueen als basis gebruikt met hierin verwerkt de fluorescerende moleculen. Dit materiaal wordt gekenmerkt door een zeer snel signaal van enkele nanoseconden en een grote lichtoutput.

De pulshoogtespectra verschillen per scintillatorplaat. Desondanks vertonen ze duidelijke overeenkomsten. De histogrammen in Figuur 3.2 laten typische pulshoogtespectra zien van station 505 en station 601.



Figuur 3.2: Pulshoogtespectra uit april 2010 met horizontaal de pulshoogte (mV) en verticaal $\log(n)$. Links: station 505 met 4 platen. Triggervoorwaarden minimaal 3 lage (> 30 mV) of twee hoge (> 70 mV) pulsen. Rechts station 601 met twee platen. Triggervoorwaarde: 2 laag.

Kleine verschillen tussen de spectra kunnen deels toegeschreven worden aan configuratie en instelling van de detector. De stap bij 70 mV in de linker figuur hangt samen met de triggering: bij station

505 met vier platen heb je twee triggerinstellingen. Verschillen binnen een station hebben te maken met de hoogspanningsinstellingen van de PMTs van de platen.

3.1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

In het navolgende wordt gekeken hoe het spectrum fysisch geïnterpreteerd kan worden. Een station wordt bestookt door geladen deeltjes en energierijke fotonen. Fotonen en geladen deeltjes verschillen wezenlijk wat betreft hun interactie met de scintillator. Allereerst wordt ingegaan op de fysische processen die aan deze interactie ten grondslag liggen. Vervolgens wordt gekeken naar mogelijke consequenties hiervan voor het spectrum. De volgende vragen komen aan bod:

- Kan er onderscheid gemaakt worden tussen energieafgifte door geladen deeltjes en door gamma's?
- Wat is de energieafgifte in het exponentieel dalende deel van het pulshoogte histogram in het vigerende meetbereik (tussen ~ 30 en 2000 mV) uitgedrukt als fractie van de meest waarschijnlijke energieafgifte van een geladen deeltje (de MIP-waarde)?
- Kan op basis van het spectrum een schatting gemaakt worden van de verhouding tussen aantallen gamma's en geladen deeltjes?
- Heeft het spectrum bij deze pulshoogten een instrumentele of een fysische oorsprong? In het eerste geval zullen de stations sterker verschillen. In het tweede geval zal er sprake moeten zijn van een duidelijk afwijkende opstelling als de spectra van stations verschillen.

3.1.3 Energieverlies van geladen deeltjes

Muonen (gemeten op zeeniveau) zijn veel voorkomende deeltjes in kosmische straling. Voor horizontale detectoren op zeeniveau gebruikt men ' ~ 1 per vierkante centimeter per minuut' als vuistregel voor de muonflux [20]. De meeste muonen worden hoog in de atmosfeer geproduceerd (15 km). Ionisatieverliezen bedragen rond de 2 GeV voordat het aardoppervlak wordt bereikt. De gemiddelde muonenergie op zeeniveau is circa 4 GeV [20].

In geval van een shower op de grond zijn muonaantallen niet langer dominant. Het aantal elektronen kan een factor 1 tot 1000 maal hoger zijn afhankelijk van de afstand tot de shower kern. Alleen op grote afstand van de kern overheerst het aantal muonen.

Passage door materie van zware geladen deeltjes (massa groter dan de elektronmassa) wordt gekarakteriseerd door energieverlies en afbuiging van de oorspronkelijke bewegingsrichting. Deze effecten worden hoofdzakelijk veroorzaakt door twee processen: inelastische botsingen met atomaire elektronen en elastische verstrooiing aan atoomkernen. Het eerste proces is van belang: analyse van de energieafgifte zou idealiter moeten leiden tot identificatie van de veroorzaker. Drie andere processen: het uitzenden van Cherenkov straling, kernreacties en Bremsstrahlung spelen in het energiebereik tot 1 GeV een zeer ondergeschikte rol.

De correcte quantum-mechanische formule voor energieverlies is de Bethe-Bloch formule met dichtheid- en shellcorrectie [21]:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z z^2}{A \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2\gamma^2 m_e c^2 \beta^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (3.1)$$

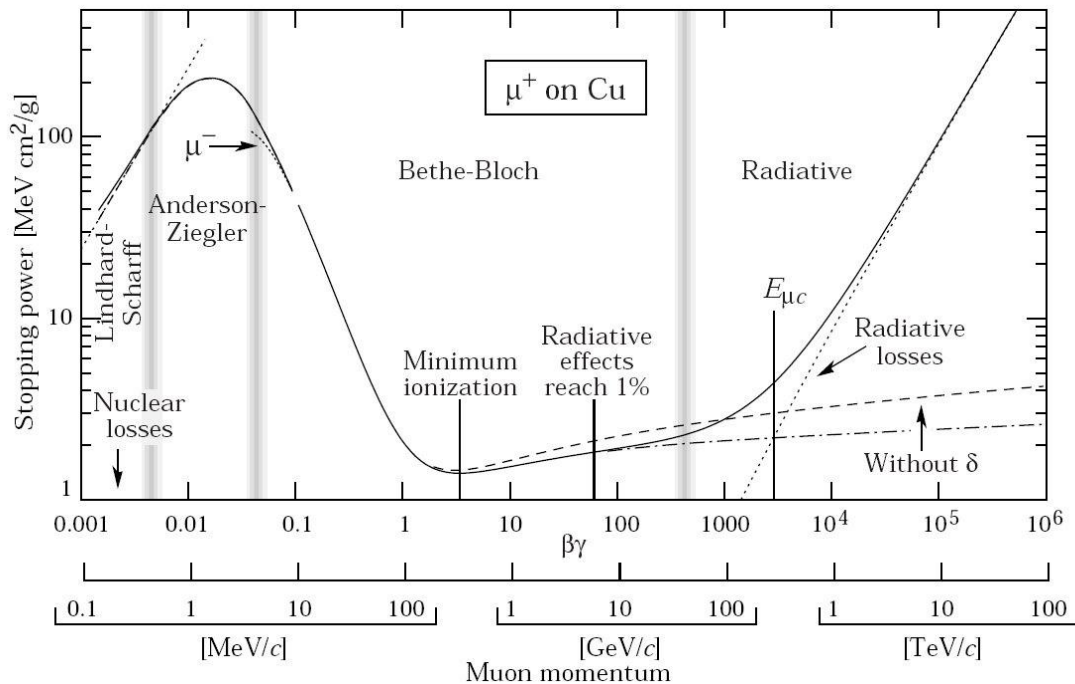
met $2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$. De parameters zijn gedefinieerd in Tabel 3.1.

| | | | |
|-------|--|------------|--|
| r_e | klassieke elektronstraal $2.817 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ | ρ | dichtheid |
| m_e | elektronmassa | z | lading inkomend deeltje in e |
| N_A | getal van Avogadro $6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ | β | v/c van inkomend deeltje |
| I | gemiddelde excitatie potentiaal | γ | $1/\sqrt{1-\beta^2}$ |
| Z | atoomnummer absorberend materiaal | δ | dichtheidscorrectie |
| A | Atoommassa absorberend materiaal | C | shellcorrectie |
| | | W_{\max} | max. energieoverdracht in enkele botsing |

Tabel 3.1: Parameters in de Bethe-Bloch formule.

Tussen 100 MeV en 100 GeV is het gemiddelde energieverlies bij benadering recht evenredig met het product van dichtheid en weglengte. Er geldt: $\overline{\Delta E} = S \cdot \rho \cdot l$. Voor evenredigheidsconstante S (stopping power) geldt:

$$S = \frac{\overline{\Delta E}}{\rho \cdot l} \quad [\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2] \quad (3.2)$$



Figuur 3.3: Stopping power $= -dE/dx$ voor positieve muonen in koper als functie van $\beta\gamma = p/Mc$ over negen grootte ordes in impuls (12 grootte-orde in kinetische energie). De doorgetrokken lijn geeft de totale stopping power weer [22].

Deze blijkt voor alle materialen ongeveer dezelfde waarde te hebben. Figuur 3.3 laat de stopping power van muonen in koper zien als functie van de muonenergie. Uit de Bethe-Bloch formule volgt dat het ioniserend energieverlies voor alle deeltjes met dezelfde $\beta\gamma$ gelijk is. Voor elektronen is er sprake van een lichte afwijking. Dit komt door de geringe massa, waardoor extra energie kan worden overgedragen door de terugstoot en door het feit dat het projectiel elektron niet te onderscheiden is van het atomaire elektron. Een vergelijking tussen het ioniserend energieverlies van elektronen en muonen in een plastic scintillator leert dat de verschillen gering zijn. In het min of meer horizontale deel van de Bethe-Bloch grafiek (daar waar de deeltjes minimum ionizing zijn) geldt voor elektronen dat de stopping power

$$S = \frac{\overline{\Delta E}}{\rho \cdot l} = 1.78 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \quad (3.3)$$

is [23]. Voor muonen is dit $1.75 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ [24].

Met de Bethe-Bloch formule wordt het gemiddelde energieverlies van geladen deeltjes bepaald als deze een materiaal laag van een bepaalde dikte passeren. Voor een specifiek deeltje zal de energieafgifte doorgaans afwijken van dit gemiddelde door variatie van energieoverdracht bij botsingen. Deze fluctuatie volgt een specifieke spectrale verdeling, afhankelijk van de dikte van de absorptielaag. Is deze laag dik dan heeft de verdeling een Gaussische vorm, voor dunne lagen, zoals de HiSPARC scintillatoren, geldt de Landau-verdeling. Onderscheidend criterium is de verhouding tussen gemiddeld energieverlies en maximale energieoverdracht in één enkele botsing $\kappa = \overline{\Delta E} / W_{\max}$. Landau statistiek is van toepassing als deze verhouding kleiner is dan 0.01.

Het gemiddelde energieverlies wordt doorgaans benaderd met alleen de eerste term van de Bethe-Bloch formule, de logaritmische term wordt achterwege gelaten. Deze benadering geldt bij lagere energieën (dalende flank van het Bethe-Bloch diagram) en niet voor het HiSPARC experiment, waar gekeken wordt naar $\sim 2 \text{ GeV}$ muonen die door een twee centimeter dikke laag scintillatiemateriaal gaan. In het laatste geval is ξ een factor 20 kleiner dan het gemiddelde energieverlies:

$$\xi = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{Z^2}{\beta^2} x \quad \left(; \overline{\Delta E} \text{ bij lage } E \right) \quad (3.4)$$

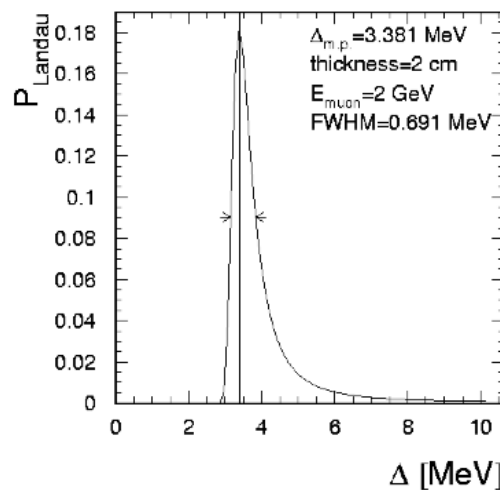
De Landau verdeling $f(x, \Delta E) = \phi(\lambda) / \xi$ is als volgt gedefinieerd [21]:

$$\begin{aligned} \phi(\lambda) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-u \ln u - u\lambda} \sin \pi u \, du \\ \lambda &= \frac{1}{\xi} \left[\Delta E - \xi (\ln \xi - \ln \varepsilon + 1 - C) \right] \\ C &= 0.577 \text{ (Euler's const)} \text{ en } \ln \varepsilon = \ln \frac{(1 - \beta^2) \cdot I^2}{2mc^2 \beta^2} + \beta^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Hierbij geldt een aantal aannames:

- De maximale energie die overgedragen kan worden is oneindig, waarmee de verhouding in (3.3) naar nul gaat.
- Individuele energietransfers zijn zo groot dat elektronen beschouwd kunnen worden als vrije deeltjes. Kleine energietransfers veroorzaakt door zogenaamde 'distant collisions' worden verwaarloosd.
- De snelheidsafname van het muon is verwaarloosbaar: er wordt uitgegaan van een constante snelheid.

De grootheid ε is in essentie een maat voor de minimale energieoverdracht toegestaan volgens de 2^e aanname. De functie $\phi(\lambda)$ is een universele functie zonder vrije parameters die uitsluitend afhangt van λ . Uit $\phi(\lambda)$ volgt het meest waarschijnlijke energieverlies: $\Delta E_{mp} = \xi [\ln(\xi/\varepsilon) + 0.198 - \delta]$. Figuur 3.4 en Tabel 3.2 laten de vorm en de waardes van de relevante grootheden zien.



Figuur 3.4: Landauverdeling van 2 GeV muonen in 2 cm scintillatiemateriaal. De vorm van de verdeling wordt bepaald door de energie en lading van de inkomende deeltjes en eigenschappen van het medium waarin de energie wordt afgezet. Voor 2 GeV muonen die een 2 cm dikke laag scintillatormateriaal passeren geldt de bovenstaande grafiek.

| | | | |
|------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| thickness | 2.0 cm | ε | $3.10756 \cdot 10^{-11}$ |
| muon energy | 2 GeV | $X ({}^{10}\log(\eta))$ | 1.27651 |
| γ | 18.9286 | X_0, X_1 | 0.1464, 2.4855 |
| β | 0.998604 | Delta | 2.97663 |
| $\eta (= \beta\gamma)$ | 18.9022 | most probable | 3.38115 MeV |
| Z/A | 0.541299 g^{-1} | W_{\max} | 308.637 MeV |
| Z | 3.37713 | κ | 0.000557347 |
| ξ | 0.172018 MeV | shell correction | $2.9949 \cdot 10^{-5}$ |
| β^2 | 0.997209 | FWHM | 0.69128 MeV |

Tabel 3.2: Relevante grootheden bij berekening Landau verdeling.

Berekening van κ geeft:

$$\kappa = \frac{\overline{\Delta E(\xi)}}{W_{\max}} = \frac{0.172 \text{ MeV}}{308 \text{ MeV}} = 5.57 \cdot 10^{-4} \quad (3.6)$$

κ is dus kleiner dan 0.01, hetgeen betekent dat Landaustatistiek van toepassing is. Dit levert twee belangrijke waarden. De eerste is de MIP-waarde van 3.38 MeV:

$$\Delta E_{MIP} = \xi \left[\ln(\xi/\varepsilon) + 0.198 - \delta \right] = 0.172018 \cdot \left[\ln \frac{0.172018}{3.1076 \cdot 10^{-11}} + 0.198 - 2.9766 \right] = 3.38 \text{ MeV} \quad (3.7)$$

De waarde van 2 GeV voor de muonenergie is tamelijk willekeurig. Omdat dit in het 'minimum ionizing' deel van de Bethe-Bloch functie valt, is de precieze waarde niet relevant. Tabel 3.3 laat zien dat de meest waarschijnlijke energieafgifte in dit energiebereik [1-5 GeV] nauwelijks varieert.

| muon energie [GeV] | ΔE_{MIP} [MeV] |
|--------------------|------------------------|
| 1 | 3.36 |
| 2 | 3.38 |
| 3 | 3.40 |
| 4 | 3.40 |
| 5 | 3.41 |

Tabel 3.3: Relatie muonenergie en energieverlies muonen.

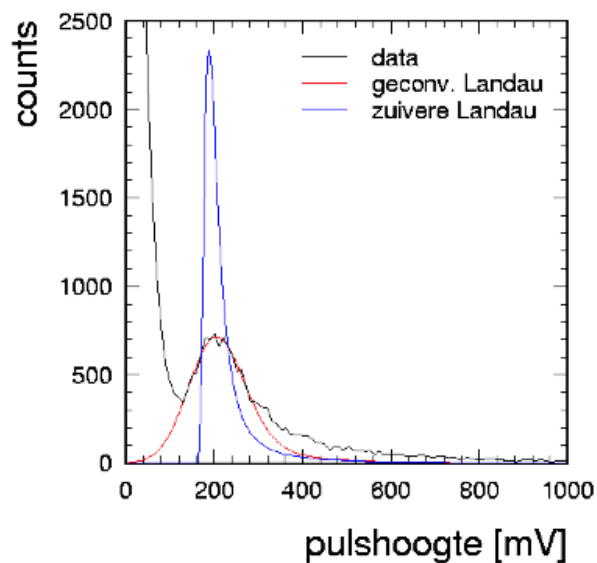
Door de asymmetrie van de Landau verdeling is de waarde 3.38 MeV geen maat voor het gemiddelde energieverlies, maar voor het meest waarschijnlijke energieverlies. Het gemiddelde energieverlies zal iets groter zijn. De tweede, spreidingsmaat FWHM (full width half maximum), is 0.691 MeV. In de statistiek is standaarddeviatie σ een gebruikelijker spreidingsmaat. Omdat een Landaucurve geen σ kent (de theoretisch maximaal overdraagbare energie is immers oneindig), wordt de spreiding uitgedrukt in FWHM. De relatieve spreiding is dus $0.691/3.38$; 0.20.

3.1.4 Experimentele bevindingen

In het reële experiment wordt de lichtopbrengst gemeten met niet-ideale meetapparatuur. Het gevolg is dat als N_0 fotonen worden gegenereerd in een gebeurtenis, daarvan een signaal s wordt gemeten: $s = g \cdot N_0 + B$. Hierin is g de versterking van de individuele gebeurtenis en B een achtergrondsignaal. De factor g beschrijft de resolutie van het meetsysteem. We gebruiken hiervoor een normale verdeling. Als het fysische signaal een verdeling $\phi(N_0)$ volgt, zal het resultaat van de meting met dit systeem een verdeling $f(s)$ zijn die beschreven wordt door: $f(s) = \phi(N_0) \otimes g + B$ waarbij \otimes de convolutie-operator is gedefinieerd als:

$$(f \otimes g) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x') \cdot g(x - x') dx' \quad (3.8)$$

Deze formule beschrijft hoe een gemeten signaal $f(s)$ een bijdrage krijgt uit een gebied van een echt aanwezig signaal N_0 met een breedte die bepaald wordt door de resolutie. Deze operatie heeft het effect dat de gemeten verdeling breder (en dus ook lager) is dan de onderliggende verdeling ϕ . Figuur 3.5 representeert de spectrale verdeling van een plaat. De zwarte lijn is het pulshoogte histogram van een plaat met data van één dag. De rode curve is de geconvolueerde Landau, gefit aan de experimentele curve. Blauw is de zuivere Landau van 2 GeV muonen. Het oppervlak onder de blauwe en de rode curve is gelijk. Conform verwachting is de geconvolueerde Landau breder dan de zuivere. Deze verbreding, waarin de experimentele resolutie tot uitdrukking komt, kan onder meer worden verklaard door foto-elektron statistiek en de transmissie van licht in scintillator en lichtgeleider naar de PMT.



Figuur 3.5: Pulshoogte histogram (zwart) met zuivere Landau-curve (blauw) en geconvolueerde Landau fit (rood).

De productie van één scintillatie foton kost ongeveer 100 eV. Het ioniserend gedeelte van het energieverlies van een MIP is ongeveer $1.7 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Loodrechte inval van één muon resulteert dus in een lichtopbrengst van ongeveer 34000 fotonen. Hiervan wordt ongeveer 28% doorgelaten naar de uitgelezen zijde van de scintillator. Met een oppervlak van $50 \times 2 \text{ cm}^2$ geeft dit 95 fotonen $\cdot \text{cm}^2$ [25]. Het oppervlak van het venster van de PMT is 4.4 cm^2 , zodat 419 fotonen de fotokathode bereiken. Dit betekent dat per MIP 117 foto-elektronen worden vrijgemaakt (quantum efficiency, $QE = 28\%$ [26]). Poissonstatistiek voor grotere N voorspelt een spreiding van $\sigma = \sqrt{N}/N \approx 0.1$.

Voor een Gausskromme geldt: $FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \cdot \sigma = 2.35 \cdot \sigma$. Spreiding uitgedrukt in FWHM geeft dus $FWHM = 2.35 \cdot 0.1 = 0.24$. Het aantal van 117 foto-elektronen per MIP sluit aan bij experimentele bevindingen. Er wordt een signaal van 2300 mV \cdot ns (= 2300 pV \cdot s) gemeld als pulsintegraal van een MIP [25]. De PMT-buis die in de HiSPARC-opstellingen wordt gebruikt, heeft een gain van $10^6 - 5 \cdot 10^6$. Elk foto-elektron veroorzaakt dus een ladingspuls van 160 - 800 fC. De ladingspuls veroorzaakt een stroom door de anode belastingsweerstand (50Ω), waardoor met $\int I \cdot R dt$ een over de tijd geïntegreerde spanningspuls ontstaat van 8 - 40 pV \cdot s [25]. Een MIP-pulsintegraal correspondeert dus met

58 - 288 foto-elektronen. Het aantal van 117 past in dit gebied. De kans dat een foton het einde van de plaat haalt en dus de PMT bereikt is afhankelijk van de positie in de plaat waar het gegenereerd wordt. Alle posities meewegend laat dit een spreiding zien met een σ van 0.22 en een FWHM van $2.35 \cdot 0.22 = 0.52$ [25].

Als bovenstaande in ogenschouw wordt genomen kan een verwachte spreiding (in FWHM) worden berekend $FWHM = \sqrt{0.20^2 + 0.24^2 + 0.52^2} = 0.61$, met 0.20 de spreiding van de zuivere Landau (sectie 3.1.3). Andere factoren zullen nog een rol spelen, zoals:

- Hoogspanningsinstabiliteiten.
- Gainstatistiek PMT.
- Ruis en overspraak in elektronica.
- Imperfecte lijmnaden.
- Hoek van inval van muonen

We kunnen concluderen dat een FWHM van 0.61 dus een ondergrens is. Bij de convolutie zijn drie parameters van belang. Parameter 1 (P1) bewerkstelligt de conversie van het signaal in mV naar MeV. Met behulp van deze parameter kan de MIP-waarde bepaald worden in mV. De MIP-energie van 2 GeV muonen door scintillatiemateriaal is bepaald op 3.38 MeV: $E_{mip}(2\text{GeV})/P1 = MIP_{ph} (mV)$. Parameter 2 (P2, vermenigvuldigd met 10) is het oppervlak onder de Landaucurve, terwijl parameter 3 (P3) de experimentele verbreding representeert: $P3 \cdot P1 / (3.38 \text{ MeV}) = \sigma$, $\sigma \cdot 2.35 = \text{rel. spreiding in FWHM}$. Met behulp van deze geconvolueerde Landau kan de experimentele resolutie van meetopstellingen worden bepaald en vergeleken.

In Tabel 3.4 wordt een aantal HiSPARC stations vergeleken met station 99. De FWHM van station 99 ligt in de buurt van de veronderstelde ondergrens van 0.61. De andere stations liggen hier boven. Station 99 is de experimentele opstelling van collega Vegting. In deze opstelling liggen vier platen boven elkaar en er wordt getriggerd op alle vier de platen. De vier platen zijn zo boven elkaar geplaatst, dat de overlap zich beperkt tot een strook van 14 cm aan het uiteinde van de platen. Door de overlap te beperken wordt het aantal coïncidenties en dus de datastroom gereduceerd.

| station | datum | plaat | P1 ($\cdot 10^{-2} \text{ MeV} \cdot \text{mV}^{-1}$) | MIP (mV) | P3 | FWHM |
|---------|-----------|-------|---|----------|------|------|
| 501 | 2010-2-26 | S1 | 1.923 | 176 | 53.8 | 0.72 |
| | 2010-4 | S1 | 1.191 | 177 | 55.1 | 0.73 |
| | | S2 | 2.108 | 160 | 49.2 | 0.72 |
| 503 | 2010-2-26 | S1 | 1.62 | 164 | 70.0 | 0.76 |
| | 2010-5 | S1 | 1.91 | 167 | 55.1 | 0.73 |
| | | S2 | 2.11 | 161 | 48.9 | 0.77 |
| 8001 | 2010-2-26 | S1 | 3.08 | 110 | 34.2 | 0.71 |
| | | S2 | 3.16 | 107 | 35.5 | 0.78 |
| 8101 | 2010-2-26 | S1 | 1.80 | 188 | 57.7 | 0.72 |
| | | S2 | 1.82 | 186 | 52.9 | 0.67 |
| 99 | 2010-2-9 | S1 | 2.20 | 170 | 41.6 | 0.60 |
| | 2010-2-10 | S1 | 1.99 | 170 | 42.7 | 0.59 |
| | 2010-4-13 | S1 | 2.00 | 169 | 40.0 | 0.57 |

Tabel 3.4: FWHM bepaling voor verschillende stations.

De interacties in de vier platen die als coïncidentie worden vastgelegd, vinden plaats in de smalle overlap en dus op min of meer dezelfde plek in de platen, ver van de lichtgeleider. Interactie op ongeveer dezelfde plek betekent een vergelijkbare transmissie. Omdat de spreiding in de transmissie gereduceerd wordt, zal ook de totale spreiding afnemen.

Een Monte Carlo studie laat zien dat in dit geval gemiddeld 445 fotonen gezien worden met een spreiding van $\sigma = 70$ [25]. De FWHM positieresolutie is dus $2.35 \cdot 70 / 445 = 0.37$. De breedte van de Landau piek is 0.20 en de bijdrage van de foto-elektronenstatistiek is $2.35 / \sqrt{0.28 \cdot 445} = 0.21$ met 0.28 de quantum efficiency van de PMT. De totale resolutie komt hiermee op $\sqrt{0.20^2 + 0.21^2 + 0.37^2} = 0.47$ FWHM. De gemiddelde spreiding van station 99 is 0.59. De verwachte spreiding was 0.47. Het effect van de andere factoren is dus een bijdrage van FWHM $\sqrt{0.59^2 - 0.47^2} = 0.36$. Voor de HiSPARC-stations geldt een gemiddelde spreiding van 0.73. Nu is een waarde van 0.40 nodig ($= \sqrt{0.73^2 - 0.61^2}$) om de gemeten breedte te verklaren. Dit laat zien dat het verschil tussen station 99 en de HiSPARC-stations kwantitatief wordt begrepen.

3.1.5 Energieverlies van gamma's

Er zijn drie mechanismen die de wisselwerking van röntgen- en gammastraling met materie domineren. Dit zijn het foto-elektrisch effect, Compton verstrooiing en paarvorming. Bij deze wisselwerking valt op dat het doordringend vermogen van de straling groot is. Ongeveer 96% van de hoge-energie fotonen gaat dwars door de scintillatorplaat heen zonder energie af te geven. Dit hangt samen met de kleine werkzame doorsnede van de drie processen; veel kleiner dan de crossectie van inelastische botsingen van geladen deeltjes. Deze laatste hebben heel veel, heel kleine interacties. De energieafname per centimeter wordt de stopping power genoemd. Het grote aantal interacties is de reden dat bij het bepalen van de stopping power van materialen in geval van geladen deeltjes de 'continuous slowing down approach' (CSDA) gerechtvaardigd is om de indringdiepte (range) te bepalen. Dit staat in schril contrast met gamma's waarbij het aantal interacties laag is. Zo klein dat de kans op meerdere interacties in de scintillator te verwaarlozen is. De impact van zo'n interactie is echter enorm. Hierdoor is de energieafgifte van een gamma in één interactie niet veel lager dan de totale energieafgifte van een geladen deeltje via talloze interacties.

Bij lage fotonenergie (bij plastic scintillatoren tot circa 20 keV) domineert het foto-elektrisch effect (FEE). In dit proces wordt een atoom geïoniseerd door absorptie van het foton. Omdat de fotonenergie veel groter is dan de uittree-energie van het elektron, wordt het grootste deel van de energie overgedragen aan het elektron. Dit elektron geeft zijn energie zeer lokaal af in de scintillator.

Boven de K-schil energie (ca. 0.28 keV voor koolstof) neemt de werkzame doorsnede voor deze wisselwerking af met $10^{-3.2}$. De vrije weglengte neemt met dezelfde factor toe. De energieafgifte door het FEE zal niet uitkomen boven de 20 keV. In vergelijking met de energieafgifte van geladen deeltjes in de scintillator is dit weinig. Hoogenergetische geladen deeltjes dragen gemiddeld 3.38 MeV af. Dit resulteert in een spanningspuls van ongeveer 200 mV, de MIP-puls. FEE-interactie, met de schamele 20 keV als maximum, leidt tot pulsen van maximaal 1 mV (0.6% van de MIP-puls), en kunnen we dus

verder buiten beschouwing laten.

Het tweede mechanisme, de Comptonverstrooiing, kan beschreven worden als een twee deeltjes botsing tussen een foton en een elektron. Dit werkt onder de aanname dat het elektron als vrij beschouwd mag worden. In materie zijn elektronen uiteraard gebonden, maar als de fotonenergie veel groter is dan de bindingsenergie, kan deze laatste verwaarloosd worden. De totale energie en de totale impuls zijn voor en na de botsing gelijk. Compton verstrooiing domineert in het energiegebied $0.05 \leq E_\gamma \leq 10 \text{ MeV}$.

Als de energie veel groter is dan de rustmassa van het elektron wordt bij een centrale botsing de volledige impuls van het foton overgedragen aan het elektron. Bij een perifere botsing verandert de richting en energie van het foton nauwelijks en zal het elektron met zeer geringe energie het interactiegebied verlaten onder een hoek van 90° .

Als de energie van het foton juist veel kleiner is dan de rustmassa van het elektron, kaatst het foton bij een centrale botsing terug van het elektron. Het verstrooide foton heeft dan een energie van $E_\gamma - T$. T hangt af van het massaverschil. Als dit verschil groter wordt, wordt T kleiner. In alle gevallen is de energieoverdracht van het foton naar het elektron maximaal als het foton terug verstrooid wordt. Voor alle foton energieën kan in dat geval de energieoverdracht berekend worden met behulp van de kinematische behoudswetten. Uit energiebehoud volgt:

$$\begin{aligned} E_{\text{voor}} &= E_{\text{na}} \\ E_\gamma + m_e c^2 &= (E_\gamma - T) + \sqrt{(p_e c)^2 + (m_e c^2)^2} \\ (p_e c)^2 &= T^2 + 2Tm_e c^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

en uit impulsbehoud:

$$\begin{aligned} p_{\text{voor}} &= p_{\text{na}} \\ E_\gamma &= p_e c - (E_\gamma - T) \\ p_e c &= E_\gamma + (E_\gamma - T) \\ (p_e c)^2 &= 4E_\gamma^2 - 4E_\gamma T + T^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Met deze twee vergelijkingen kan de maximale energie-overdracht van het foton naar het elektron worden bepaald:

$$T = E_\gamma \frac{2E_\gamma}{m_e c^2 + 2E_\gamma} \quad (3.11)$$

Tabel 3.5 laat zien hoe groot deze energieoverdracht is in het energiegebied waar Compton verstrooiing domineert. Met deze data kan een schatting gemaakt worden van de (maximale) energieafgifte in de scintillator en de hieraan gekoppelde pulshoogte (ph).

Elektronen met energieafgifte van ongeveer 0.15 tot 1 MIP - de lage drempel van 30 mV tot een piekwaarde van 200 mV - worden geproduceerd door fotonen met een energie van ongeveer 1 - 10 MeV.

| ESTAR: Stopping Powers and Range Tables for Electrons PLASTIC SCINTILLATOR (VINYLTOLOUENE BASED) | | | | | | |
|---|----------------------|--------------------------------------|---|----------|-----------------------------------|---------|
| E _{MIP} 3.38 MeV ph _{MIP} 200 mV | | | Dikte scint. 2.0 cm Dichtheid scint. 1.032 g/cm ³ | | | |
| T [MeV] | E _γ [MeV] | Col. Stp.Pow [MeVcm ² /g] | CSDA Range [g/cm ²] | ΔE [MeV] | $\frac{\Delta E}{\Delta E_{MIP}}$ | ph [mV] |
| 0.01 | 0.06 | 22.65 | 2.50·10 ⁻⁴ | 0.01 | 0.00 | 0 |
| 0.10 | 0.22 | 4.10 | 1.44·10 ⁻² | 0.10 | 0.03 | 3 |
| 1.00 | 1.2 | 1.81 | 4.43·10 ⁻¹ | 1.00 | 0.29 | 59 |
| 10 | 10.2 | 1.93 | 5.11 | 3.99 | 1.18 | 240 |
| 100 | 100 | 2.15 | 35 | 4.43 | 1.31 | 260 |

Tabel 3.5: Maximale energieafgifte Compton elektronen, bijbehorende γ energie - berekend met (3.11) -, stopping power en CSDA-range in een 2 cm dikke vinylpolytolueen scintillator en bijbehorende (maximale) pulshoogte [24].

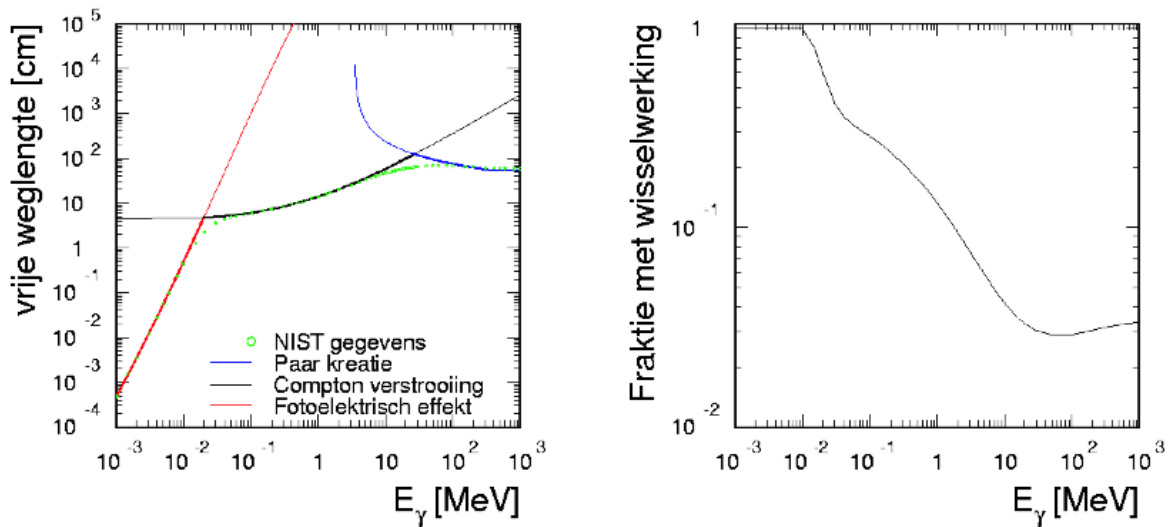
Bij paarvorming wordt de energie van het foton gebruikt om een elektron-positron paar te maken. Dit proces vindt plaats in de nabijheid van een kern of elektron om te voldoen aan impulsbehoud. Bij paarvorming in de buurt van een kern wordt geen energie overgedragen vanwege het grote massaverschil. De energie van het foton moet dan minstens twee maal de rustmassa van het elektron zijn. In de buurt van het elektron wordt juist wel energie overgedragen. In dit geval is meer energie nodig: vier maal de rustmassa van het elektron.

In het energiegebied waar paarcreatie Compton verstrooiing domineert ($E_\gamma > 100$ MeV) gedragen het gecreëerde elektron en positron zich als MIPs. Omdat ze in de scintillator ontstaan en deze dus niet geheel doorkruisen, passeren ze slechts een deel van de scintillator. De energieafgifte per deeltje is dan: $(2-x)/2 \cdot E_{MIP}$ met x de afgelegde afstand in de scintillator. Paarvorming bij een kern leidt zo tot een signaal van maximaal twee MIPs; paarvorming in de buurt van een elektron levert maximaal drie MIPs omdat het initieel aanwezige elektron voldoende energie opneemt om zich als derde MIP door de scintillator te verplaatsen.

Figuur 3.6 laat de vrije weglengte zien van gamma's in scintillatormateriaal en de daaruit berekende interactiekans voor fotonen in het energiegebied van 1 keV tot 1 GeV. De figuur illustreert wat in het voorgaande is besproken; dominantie van achtereenvolgens foto-elektrisch effect, Compton verstrooiing en tot slot paarcreatie bij toenemende gamma energie.

Samenvattend, energieabsorptie vindt plaats als gamma's energie afdragen aan elektronen van scintillatormateriaal of, in geval van paarcreatie, direct worden gecreëerd. Elektronen met lage energie geven al hun energie lokaal af aan de scintillator. Elektronen met een energie groter dan 4 MeV hebben een range van meer dan 2 cm. Voor deze elektronen geldt dat de pulshoogte bepaald wordt door de diepte in de scintillator waar de interactie plaats heeft gevonden met $ph = (2-x)/2 \cdot ph_{MIP}$. Voor gamma-energieën tussen de 1 en 10 MeV neemt de kans op interactie af van 10% naar 4%. Voor

gamma's met een energie groter dan 10 MeV is deze kans min of meer constant (4%).



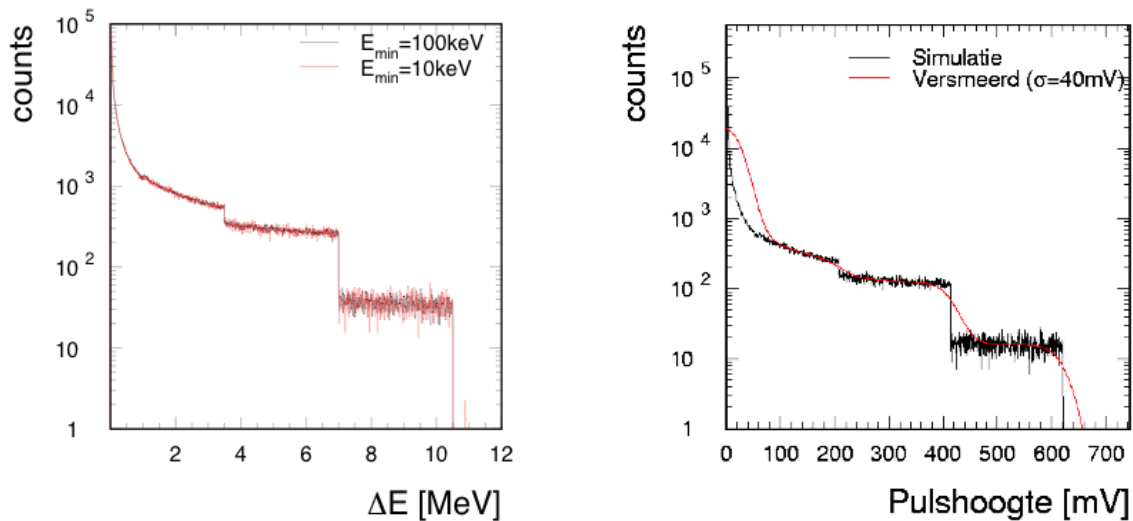
Figuur 3.6: Vrije weglengte voor passage van een foton door scintillator materiaal (links). De bijdrage van de drie mechanismen wordt door middel van kleur onderscheiden. Het dominante mechanisme wordt door een dikke lijn aangegeven. De markers zijn de NIST-data [24]. Rechts: de kans dat een foton een interactie in de 2 cm dikke scintillator ondergaat.

3.1.6 Simulatieonderzoek

De wisselwerking van gamma's met scintillatormateriaal is onderzocht met behulp van een Monte Carlo simulatie. De werkwijze in deze simulatie is als volgt. Het energiespectrum van gamma's is benaderd met een $1/E_\gamma$ afhankelijkheid, begrensd door een minimum (0.1 MeV) en een maximum energie (1 GeV). Voor elk foton in een $1/E_\gamma$ spectrum behorend bij een vooraf gekozen, vast aantal fotonen, is de vrije weglengte berekend voor de drie bovengenoemde mechanismen. Met deze berekende waarden wordt de afstand bepaald tot de volgende interactie door een willekeurig getal te trekken uit een exponentiële verdeling $P_i(x) \propto e^{-x/\lambda_i}$ waarin λ_i de vrije weglengte is voor het mechanisme i , uit het foto-elektrisch effect, Compton verstrooiing en paarcreatie. Het mechanisme dat resulteert in de kleinste waarde van x bepaalt de plaats en de soort van de volgende interactie. De energieafgifte die hoort bij deze interactie wordt in rekening gebracht en de procedure wordt zo nodig herhaald totdat het foton geheel geabsorbeerd is of ontsnapt aan de scintillator. De verdeling van de in de scintillator geabsorbeerde energie per foton is tenslotte versmeerd met de experimentele resolutie, bepaald door een fit van een Landau verdeling versmeerd met dezelfde experimentele resolutie [25]. Het resultaat van deze simulatie wordt weergegeven in Figuur 3.7.

De vorm van het pulshoogtespectrum (rechts in Figuur 3.7) wordt voor een belangrijk deel bepaald door de convolutie met de experimentele resolutie. In de figuur is gekozen voor een resolutie van ongeveer 40 mV overal in het spectrum. Deze waarde is bepaald door een fit van een Landau verdeling, geconvolueerd met een (normaal verdeelde) experimentele resolutie aan de gemeten MIP-piek. Bij

kleine waarden van de pulshoogte is de vorm van het spectrum dan ongeveer Gaussisch. Dit wordt veroorzaakt door de hoge piek bij kleine pulshoogte. Een deel van de resolutie (bijvoorbeeld veroorzaakt door de transmissie van scintillatielicht in de scintillator en de lichtgeleider) is echter niet constant, maar een constant deel van de lichtintensiteit. De rechter grafiek in Figuur 3.7 laat zien dat de vorm in dat deel niet wordt bepaald door absorptieprocessen van de gamma-energie maar door de convolutie.



Figuur 3.7: Resultaten van de in de tekst beschreven mini Monte Carlo simulatie. Links: $E_{max} = 1 \text{ GeV}$, E_{min} zoals in de legenda is aangegeven. De curves zijn berekend met hetzelfde aantal primaire fotonen met een spectrum dat afvalt als E^{-1} . Rechts: het pulshoogtespectrum van de simulatie voor en na de versmering.

3.1.7 Experimentele bevindingen

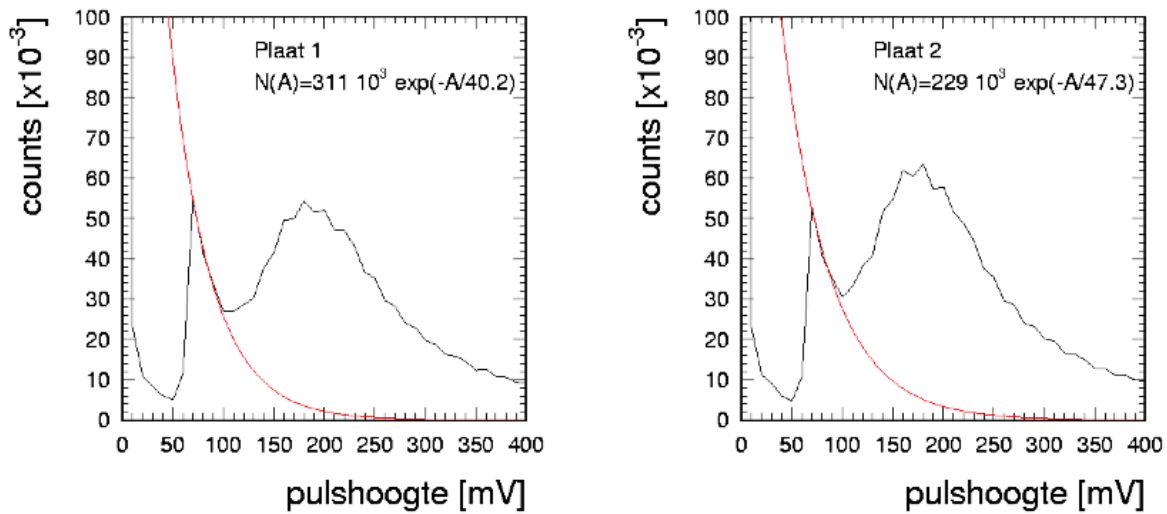
In Figuur 3.8 worden de pulshoogtespectra van twee platen van een willekeurig station (station 504, data van mei 2010) weergegeven. De piek die wordt geïnterpreteerd als MIP piek, toont dat de meest waarschijnlijke pulshoogte van een minimum ionizing particle, voor beide platen rond 180 mV ligt.

De gemiddelde energieafgifte van fotonen kan uitgedrukt worden in MIPs. Aan deze bepaling liggen twee aannames ten grondslag. De eerste is dat pulshoogte en energieafgifte evenredig zijn. Verder wordt verondersteld dat het gammasignaal is terug te vinden in het exponentiële deel van het spectrum tussen een pulshoogte van 0.2 MIP en 2.0 Volt. Met de volgende formule kan dan de gemiddelde energieafgifte worden bepaald:

$$\bar{A} = \frac{\int_0^\infty A \cdot C_0 \cdot e^{-A/A_0} dA}{\int_0^\infty C_0 \cdot e^{-A/A_0} dA} = A_0 \quad (3.12)$$

Hierin is A = pulshoogte in mV, en A_0 de (extra) pulshoogte waarbij het aantal gebeurtenissen in een bin met een factor e afneemt; A_0 is dus gelijk aan de gemiddelde pulshoogte. Het energieverlies wordt dan $\Delta E = c \cdot \bar{A}$. Uit het pulshoogte histogram kan de MIP-waarde worden afgelezen. Dit betekent een

relatieve energieafgifte van $\Delta E_\nu / \Delta E_{MIP} = \overline{ph_\nu} / ph_{MIP}$ (resultaten worden samengevat in Tabel 3.7).



Figuur 3.8: Pulshoogtespectra van station 504 in mei 2010. Links: plaat 1, rechts: plaat 2. De dalende flank is gefit met exponentiële functie.

3.1.8 Verhouding van aantal gamma's en het aantal geladen deeltjes

Haverhoek heeft met behulp van CORSIKA-simulaties [27] de verhouding bepaald van het aantal γ 's en het aantal geladen deeltjes dat de grond bereikt [28]. De verhouding hangt zwak af van de energie van het primaire deeltje (Tabel 3.6).

| primaire energie [eV] | $\frac{N_\gamma}{N_{\mu^- + \mu^+}}$ | $\frac{N_{e^- + e^+}}{N_{\mu^- + \mu^+}}$ | $\frac{N_\gamma}{N_{cp}}$ |
|--------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------|
| 10^{17} | 124 | 25 | 4.5 |
| 10^{18} | 180 | 41 | 4.5 |
| 10^{19} | 247 | 57 | 4.7 |
| 10^{20} | 327 | 75 | 4.1 |

Tabel 3.6: Verhouding van het aantal fotonen en deeltjes die het aardoppervlak bereiken, afgelezen uit figuren 26 - 28 in [28]. N_{cp} is het totale aantal geladen deeltjes.

Om deze getallen te kunnen vergelijken met de verhoudingen in Tabel 3.4 moet rekening worden gehouden met de detectiekans. Voor geladen deeltjes, met de 'continuous slowing down' wisselwerking, is de kans op interactie 1. De detectiekans van gamma's is tussen de 4% en 10% (Figuur 3.6). De geschatte verhouding van gedetecteerde γ 's en geladen deeltjes komt hiermee op 0.2 - 0.5. Voor γ 's en muonen geldt een verhouding van 9.

De rode lijn in de grafieken van Figuur 3.8 kan beschreven worden door een exponentiële functie $N(A) = N(0) \cdot e^{-A/A_0}$ met $N(A)$ het aantal gebeurtenissen bij pulshoogte A en A_0 de constante die de steilheid beschrijft. Het aantal geladen deeltjes wordt geschat door het totale aantal gebeurtenissen boven de 40 mV te bepalen en hier het aantal dat valt onder de exponentiële grafiek in hetzelfde func-

tie bereik (een indicatie voor het aantal fotonen) van af te trekken:

$$N_{cp} = \sum_{A=40mV}^{A=2V} N_{obs}(A) - \frac{\int_{40mV}^{2V} N(A) dA}{\Delta A} \quad (3.13)$$

met $N_{obs}(A)$ het gemeten pulshoogtespectrum en ΔA de bingrootte.

Het aantal fotonen is heel gevoelig voor de minimum pulshoogte van waar begonnen wordt met tellen.

| station | periode | MIP | $\langle ph_{\gamma} \rangle$ | $\Delta E_{\gamma} / \Delta E_{MIP}$ | N_{γ} / N_{cp} |
|---------|--------------|-----|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| 501 | 2010-4 s1 | 190 | 38 | 0.20 | 0.82 |
| | 2010-4 s2 | 180 | 47 | 0.26 | 0.66 |
| 502 | 2010-5 s1 | 155 | 32 | 0.20 | 1.14 |
| | 2010-5 s2 | 150 | 45 | 0.30 | 1.33 |
| 503 | 2010-5 s1 | 180 | 65 | 0.36 | 0.88 |
| | 2010-5 s2 | 160 | 134 | 0.84 | 1.70 |
| | 2010-5 s3 | 180 | 60 | 0.30 | 0.87 |
| 504 | 2010-5 s1 | 180 | 41 | 0.23 | 0.72 |
| | 2010-5 s2 | 180 | 49 | 0.27 | 0.63 |
| 505 | 2010-4 s1 | 190 | 42 | 0.22 | 0.71 |
| | 2010-4 s2 | 180 | 58 | 0.32 | 0.97 |
| 99 – Pb | 2010-4-13 s1 | 181 | 81 | 0.45 | 0.026 |
| | 2010-4-13 s4 | 181 | 83 | 0.46 | 0.025 |
| 99 + Pb | 2010-2-10 s1 | 181 | 57 | 0.32 | 0.026 |
| | 2010-2-10 s4 | 191 | 83 | 0.44 | 0.044 |
| 601 | 2010-4 s1 | 180 | 27 | 0.15 | 1.39 |
| | 2010-4 s2 | 220 | 30 | 0.14 | 1.27 |
| 1001 | 2010-4 s1 | 190 | 33 | 0.17 | 0.82 |
| | 2010-4 s2 | 190 | 32 | 0.17 | 0.93 |
| 7401 | 2010-4 s1 | 200 | 28 | 0.14 | 0.67 |
| | 2010-4 s2 | 200 | 29 | 0.14 | 0.69 |
| 8001 | 2010-4 s1 | 180 | 27 | 0.15 | 1.23 |
| | 2010-4 s2 | 170 | 23 | 0.14 | 1.08 |
| 8101 | 2010-4 s1 | 175 | 38 | 0.22 | 0.82 |
| | 2010-4 s2 | 200 | 50 | 0.25 | 0.63 |

Tabel 3.7: MIP-piek, gemiddelde γ -pulshoogte, verhouding energieafgifte γ 's en MIP-deeltje, verhouding aantal γ 's en aantal geladen deeltjes voor meerdere scintillatorplaten van verschillende stations. Data zijn maanddata met uitzondering van de gegevens van station 99, waar het gaat om dagdata (met grote statistiek).

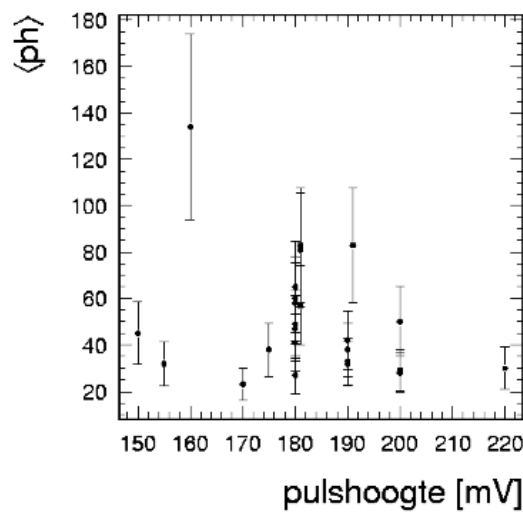
Om te recht te doen aan instrumentele verschillen tussen scintillatieplaten wordt de minimum pulshoogte gerelateerd aan de MIP-pulshoogte van die plaat. ($V_{min} = 0.2 V_{MIP}$). Dit geeft de volgende uit-

drukking voor het aantal γ 's :

$$N_{\gamma} = \frac{\int_{V_{0.2MIP}}^{2V} N(A) dA}{\Delta A} \quad (3.14)$$

De resultaten zijn in Tabel 3.7 opgenomen.

Met deze data kan geen significant verband worden aangetoond tussen de hoogte van de MIP-piek en de gemiddelde pulshoogte van γ 's (Figuur 3.9). Het punt met de coördinaten (160,134) behoort bij een spectrum dat anders oogt dan andere. De MIP-piek is veel breder, waardoor de daling van de gammaflank sterk wordt afgezwakt. De geschatte onnauwkeurigheid van alle punten is ongeveer 30%.



Figuur 3.9: Het verband tussen de pulshoogte van de MIP-piek en de gemiddelde pulshoogte van γ 's.

In de laatste kolom van Tabel 3.7 staat de verhouding van het aantal γ 's en het aantal geladen deeltjes voor diverse stations.

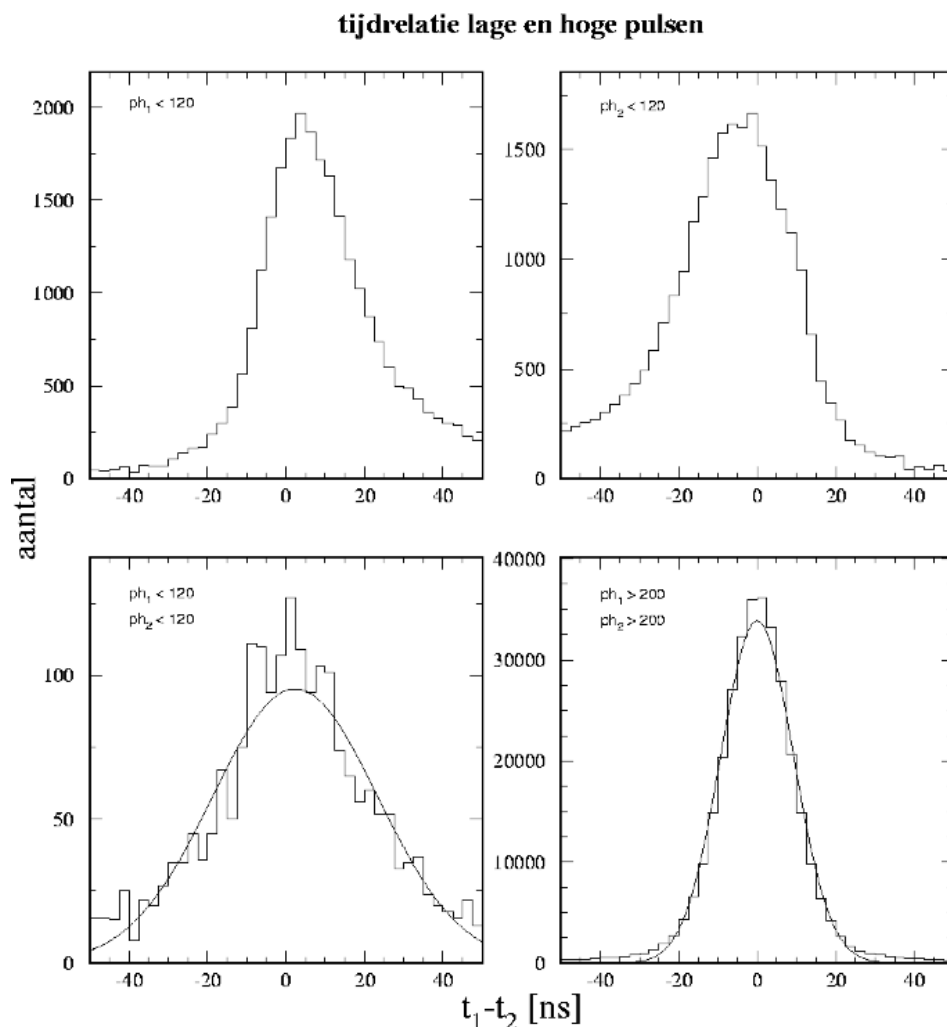
Station 99 wijkt sterk af van de andere stations. De verhouding is een factor 38 kleiner. Het betreft de opstelling van collega Vegting, waarin de vier platen boven elkaar liggen. Feitelijk is station 99 niet te vergelijken met HiSPARC stations omdat er niet geselecteerd wordt op showers. Doordat de platen boven en niet naast elkaar liggen wordt op afzonderlijke deeltjes getriggerd. Deze single cosmics zijn afkomstig van kleine showers veroorzaakt door primaire deeltjes met lagere energie en zijn dus veel talrijker. De elektromagnetische component van deze showers bereikt de grond niet. Dit is de reden dat deze single cosmics hoofdzakelijk uit muonen bestaan. Het aantal gedetecteerde γ 's neemt af door de kleine detectiekans van hooguit 10%. Triggering op vier platen zorgt voor een sterke reductie (minimaal een factor 10 als we vergelijken met een 4-plaats station waarin getriggerd is op 3 lagen).

Als de resultaten van station 99 niet worden meegenomen, de verhouding van het aantal γ 's en het aantal geladen deeltjes gemiddeld 0.95 met een σ van 0.28. Dit ligt hoger dan de verwachte 0.5-0.2 en bevestigt de resultaten van de mini Monte Carlo. Het laat zien dat de vorm in dat deel van het

spectrum (lage pulshoogten) slechts ten dele wordt bepaald door absorptieprocessen van de γ -energie. De convolutie speelt een zeker zo grote rol. Uit de rechter grafiek in Figuur 3.7 wordt ook duidelijk dat het aantal γ 's door de convolutie wordt overschat.

3.1.9 Tijdsrelaties tussen de scintillatieplaten van station 501

Voor station 501 (Science Park) is een analyse gemaakt van tijdsrelaties tussen de verschillende platen. Alle vastgelegde gebeurtenissen in de maand april zijn in de analyse meegenomen. Dit betekent dat de traces van de vier platen zijn vastgelegd in die gevallen dat minimaal drie platen een pulshoogte groter dan 53 ADC-counts (≈ 30 mV) hebben en/of minstens twee platen een pulshoogte groter dan 123 ADC-counts (≈ 70 mV).

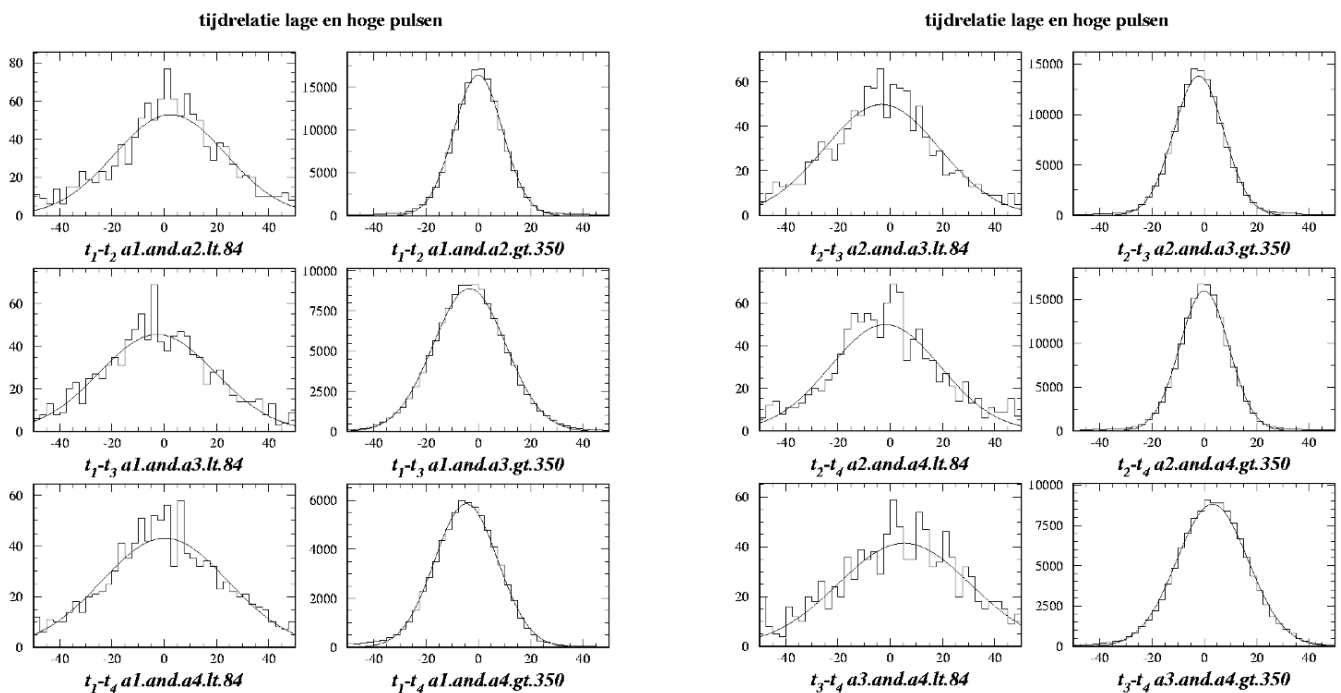


Figuur 3.10: Tijdeigenschappen scintillatorplaten van station 501 gemeten in april 2010. Horizontaal: tijdsverschillen ($t_1 - t_2$) in ns tussen plaat 1 en plaat 2 van pulsen die bij dezelfde gebeurtenis horen. Verticaal: aantal pulsen per bin (bingrootte = 2.5 ns). Linksboven: plaat 1 laag signaal (ADC-counts < 120); rechtsboven: plaat 2 laag signaal. Linksonder: beide platen laag signaal, $\sigma = 21$ ns; rechtsonder: beide platen hoog signaal (ADC-counts > 200), $\sigma = 9.3$ ns.

Figuur 3.10 laat histogrammen zien van tijdsrelaties tussen pulsen in plaat 1 en 2 van station 501. Ge-

keken is naar het tijdsinterval $t_1 - t_2$ van pulsen die behoren bij dezelfde gebeurtenis. Er vallen twee zaken op. Het merendeel van de tijdverschillen is kleiner dan 50 ns. Hieruit kan worden afgeleid dat de pulsen worden veroorzaakt door één enkele shower. In de bovenste histogrammen is een laag signaal van plaat 1 (ADC-counts < 120) vergeleken met een willekeurig signaal in plaat 2 (links) en een laag signaal in plaat 2 met een willekeurig signaal in plaat 1 (rechts). Geconstateerd kan worden dat kleine pulsen gemiddeld genomen later komen dan grote pulsen. De onderste histogrammen laten tijdsintervallen zien tussen twee lage (links) en twee hoge pulsen (rechts) in plaat 1 en plaat 2. Duide-lijk wordt dat de spreiding in de tijd bij lage pulsen aanmerkelijk groter is dan bij hoge. De reden van dit verschil wordt onderzocht met behulp van simulaties.

Voor de zes mogelijke combinaties in een opstelling met 4 platen, i.e. 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4 en 3-4, is gekeken naar tijdrelaties. De resultaten worden gepresenteerd in Figuur 3.11 en Tabel 3.8. Hierin worden tijdverschillen tussen twee lage (ph < 84 ADC-counts - kolom 1 en 3) of twee hoge (ph > 350 ADC-counts - kolom 2 en 4) pulsen weergegeven.



Figuur 3.11: Vergelijking tijdeigenschappen scintillatorplaten station 501 april 2010. Horizontaal: tijdverschillen in ns tussen de verschillende platen van pulsen die bij dezelfde gebeurtenis horen. Verticaal: aantal pulsen per bin (bingrootte = 2.5 ns). Eerste en derde kolom: beide platen laag signaal (ADC-counts < 84); tweede en vierde kolom: beide platen hoog signaal (ADC-counts > 350). In rij 1 links en rechts en rij 2 rechts wordt de vergelijking gemaakt met plaat 2.

De spreiding in tijdverschillen varieert: voor de lage pulsen is deze gemiddeld 23 ns, voor hoge pulsen gemiddeld 12 ns. Dit is conform onze eerdere bevindingen.

| tijdverschil | σ -lage puls [ns] | σ -hoge puls [ns] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| t_1-t_2 | 21.4 | 9.30 |
| t_1-t_3 | 22.2 | 13.90 |
| t_1-t_4 | 24.2 | 13.50 |
| t_2-t_3 | 21.9 | 9.52 |
| t_2-t_4 | 21.1 | 9.35 |
| t_3-t_4 | 25.3 | 13.70 |

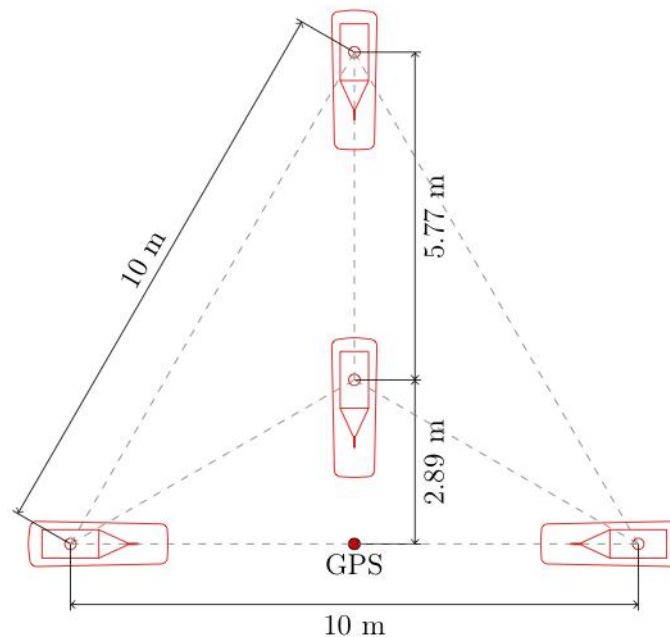
Tabel 3.8: Spreiding tijdverschillen.

Er valt echter iets anders op. Daar waar plaat 2 wordt meegenomen in de vergelijking is de spreiding kleiner: 22.7 tegenover 23.9 ns voor lage, 9.4 versus 13.7 ns voor hoge pulsen (zie Tabel 3.9).

| lage pulsen | | | hoge pulsen | | |
|----------------|--------------|-----------|----------------|--------------|-----------|
| $\bar{\sigma}$ | zonder t_2 | met t_2 | $\bar{\sigma}$ | zonder t_2 | met t_2 |
| 22.7 | 23.9 | 21.5 | 11.5 | 13.7 | 9.39 |

Tabel 3.9: Samenvatting van de tijdverschillen in Tabel 3.8 met en zonder plaat 2.

De gemeten tijdverschillen hebben diverse oorzaken: experimentele fouten waaronder de digitalisatiefout (we meten in eenheden van 2.5 ns), de dikte van het showerfront, de hoek van de shower, de showerenergie etc. Eén opvallend aspect is terug te voeren op de configuratie (Figuur 3.12).



Figuur 3.12: HiSPARC detectiestation met vier scintillatieplaten. De buitenste drie platen vormen een gelijkzijdige driehoek. De vierde plaat - #2 - bevindt zich in het zwaartepunt.

Plaat 1, 3 en 4 vormen een gelijkzijdige driehoek met een onderlinge afstand van 10 m. Plaat 2 is de middelste plaat en ligt op het snijpunt van de zwaartelijnen. De afstand van plaat 2 tot de andere stations is dus $\frac{1}{3}\sqrt{3} \cdot 10 = 5.78 \text{ m}$. De zenithhoek van showers vertoont een voorkeursrichting bij 22° . Bij

een shower met een vlak front zou dit moeten resulteren in een tijdsverschil van $(10 \cdot \sin 22^\circ)/c = 12.5 \text{ ns}$ tussen plaat 1, 3 en 4 en een tijdsverschil een factor $\frac{1}{3}\sqrt{3}$ kleiner i.e. 7.21 ns tussen plaat 2 en een van de andere platen. Dit kleinere tijdsverschil met de centrale plaat komt duidelijk naar voren in de spreidingswaarden, met name bij hogere pulsen!

3.1.10 Conclusie

In de HiSPARC stations worden signalen vastgelegd per plaat in de vorm van een pulshoogte-tijd grafiek (een trace). Een gebeurtenis legt gelijktijdig de verschillende traces vast van platen van één station. In dit onderzoek is gekeken naar pulshoogtemaxima van deze traces. Per station zijn voor iedere plaat spectra bepaald van de pulshoogtemaxima. De spectra hebben een karakteristieke vorm. In dit onderzoek is getracht verschillen en overeenkomsten van de spectra te duiden in termen van wisselwerking van het showerdeeltje met de scintillator en instrumentele kenmerken van de plaat of het station. Dit heeft geleid tot de volgende conclusies:

- Het pulshoogte histogram bestaat uit bijdragen van γ 's en geladen deeltjes. Alleen individuele γ 's, die niet vergezeld gaan van geladen deeltjes, zijn te identificeren in het spectrum. Daar waar geladen deeltjes meedoen, vanaf ongeveer één MIP, is specificatie van afzonderlijke bijdragen van verschillende deeltjes niet langer mogelijk. Door het gecombineerde effect van de resolutie van de energiebepaling en de mogelijke aanwezigheid van gamma's zijn afzonderlijke bijdragen niet te onderscheiden.
- Lage pulsen (0.2-0.8 MIP) zijn geen pedestal. Analyse van tijdeigenschappen van spectra laat zien dat lage pulsen in tijd correleren met hoge pulsen van dezelfde gebeurtenis en dus shower gerelateerd zijn. Deze pulsen zijn niet toe te schrijven aan geladen deeltjes. De steil stijgende flank van de Landau-verdeling illustreert dat de puls veroorzaakt door wisselwerking met geladen deeltjes altijd een waarde heeft rond de MIP-piek of groter. Hieruit kan geconcludeerd worden dat lage pulsen worden veroorzaakt door γ 's.
- De dalende flank, kenmerkend voor de lage pulsen, volgt een macht- of een exponentiële functie (het aantal meetpunten is te gering om te differentiëren tussen deze twee). De daling is toe te schrijven aan drie mechanismen: γ -flux én detectiekans nemen af bij toenemende energie. Verder geldt voor harde γ 's dat de energieafgifte in de scintillator een breed bereik bestrijkt. Het verband tussen energie van het γ en de pulshoogte van het signaal is dus niet lineair.
- Het gesommeerde aantal onder de fit van de dalende flank van het pulshoogtespectrum geeft een schatting van het aantal zuivere γ -signalen. Met een zuiver γ -signaal wordt een pulshoogte bedoeld die door één afzonderlijk γ is veroorzaakt. Bij pulsen rond de MIP of groter zijn er meerdere interpretatiemogelijkheden. De puls kan veroorzaakt zijn door:
 - één geladen deeltje,
 - één geladen deeltje en een γ .

Bij signalen vanaf ongeveer twee MIPs geldt dat ze veroorzaakt kunnen zijn door:

- één geladen deeltje (staart van de Landauverdeling),
- één geladen deeltje en een γ ,
- meerdere geladen deeltjes (mogelijk vergezeld door een of meer γ 's).

Voor hoge pulsen (vanaf twee MIPs) geldt dat uit de shower samenstelling op zeeniveau en de kleine detectiekans van γ 's kan worden afgeleid dat het in meer dan 80% van de gevallen zal gaan om meerdere geladen deeltjes.

- Geladen deeltjes en γ 's zijn niet alleen te onderscheiden in energie-afgifte, maar ook in tijdeigenschappen. γ 's komen gemiddeld later dan geladen deeltjes. De breedte van het histogram met tijdelaties tussen pulsen van de verschillende platen van een station neemt toe met de afstand tussen de platen.
- Het fitten van een geconvolueerde Landau aan een deel van het spectrum (rond de MIP-piek) verschaft inzicht in de experimentele resolutie van de opstelling. Als Landau spreiding, Poissonstatistiek en lichttransmissie worden meegewogen, kan een minimale resolutie gesteld worden op 0.60 (FWHM). Verschillen tussen opstellingen zijn terug te vinden in de experimentele resolutie en worden kwantitatief begrepen. Ongeveer 40% van de spreiding is toe te schrijven aan factoren anders dan de drie bovengenoemde.

3.1.11 Woord van dank

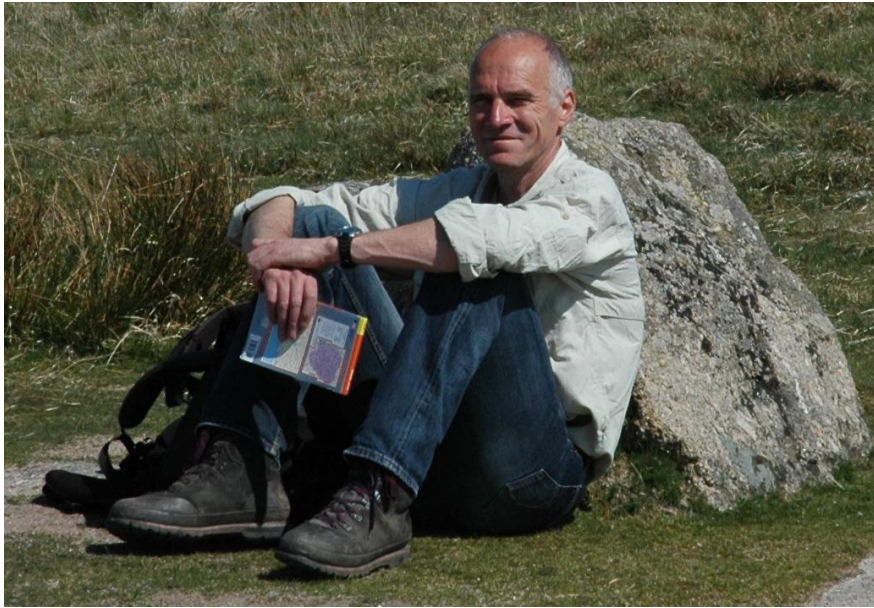
Ik ben meerdere mensen dank verschuldigd voor de rol die zij hebben gespeeld bij de totstandkoming van dit onderzoek. Drie van hen wil ik met name noemen.

Prof. Dr. Ing. Bob van Eijk wil ik danken voor het geschonken vertrouwen. Dankzij jou, Bob, is er een tweede jaar vastgeknoopt aan het LIO-schap. Was het eerste jaar een periode van zaaien, dit tweede jaar is er daadwerkelijk geoogst, onderzoeksresultaten getuigen hiervan. Ik ben je hier zeer erkentelijk voor.

Drs. David Fokkema wil ik danken voor het altijd aanspreekbaar zijn. Beste David, ik heb je nooit kunnen betrappen op het geringste teken van ongeduld bij de zoveelste terloopse vraag over python, de configuratie, de database of een van al die andere onderwerpen. Ik had me geen sympathiekere kamergenoot kunnen wensen.

Heel veel dank ben ik verschuldigd aan Dr. J. Steijger voor de wijze waarop hij mij gedurende dit onderzoek begeleidde. Jos, er zijn tal van redenen om je dankbaar te zijn. In jou heb ik een begeleider getroffen die een scherp verstand en een kritische geest paart aan geduld, mildheid en humor. Het afgelopen jaar was je te allen tijde bereid om met mij van gedachten te wisselen. Je bood me een mix van structuur en ruimte, onderwijl hamerend op zorgvuldig fysisch redeneren. Ik heb veel van je geleerd.

3.2 Een RouteNet door kennisland



Figuur 3.13: Niek Schultheiss – Zaanlands Lyceum Zaandam [29] -

Niek Schultheiss heeft een klein decennium gewerkt als onderzoeker op het gebied van glasvezelcommunicatie. In het schooljaar 1990/1991 heeft hij zich omgeschoold tot docent natuurkunde. Hij werkzaam aan het Zaanlands Lyceum. Daarnaast heeft hij zich bijgeschoold als docent informatica en ANW. In het jaar 2008/2009 heeft hij 4 leerlingen begeleid bij de bouw van een HiSPARC-station in het kader van hun profielwerkstuk.

3.2.1 Onderzoeksopdracht

In het jaar 2008/2009 ontstond de behoefte aan lesmateriaal ter voorbereiding op een HiSPARC- profielwerkstuk. Er is onderzocht welk materiaal er nodig is en hoe dit voor de gemotiveerde leerling openbaar te maken is. Er is in dit project dus niet gestreefd naar materiaal voor klassikaal gebruik.

3.2.2 Introductie: het idee

Leerlingen willen graag zelf hun leerdoelen bepalen. Dit stelt nieuwe eisen aan de didactische presentatie van de leerstof. Helaas is het zo dat een leerling niet alleen de 'leuke' dingen kan doen om zijn of haar leerdoel te realiseren. Soms is het verwerven van 'vervelende' kennis ook noodzakelijk om daarna weer 'leuke' kennis te verwerven. Meestal blijkt overigens dat, nadat de drempel van de 'vervelende' kennis geslecht is, deze kennis door de leerling als zinvol en soms 'leuk' of zelfs 'interessant' wordt gezien. Ook hier geldt het gezegde dat onbekend onbemind maakt.

Het is dus noodzakelijk om leerlingen een duidelijk pad te geven waarlangs ze zich kennis kunnen verwerven. Als de leerling zelf leerdoelen kan stellen, hebben we het echter niet meer over een pad maar een ruimte met leerwegen en kruispunten. Aan de horizon van deze ruimte zijn allerlei leerdoelen te zien die de leerling kan bereiken. Omdat leerlingen nu door de kruispunten op de leerwegen zelf hun weg kunnen kiezen, is het belangrijk om de leerling een kaart van deze ruimte te geven.

Een probleem voor de ontwikkelaar van lesmateriaal is het in kaart brengen van deze ruimte. Als voorbeeld ga ik uit van de een 'wiskundige' ruggengraat van de natuurkunde. Vanuit definities kunnen we grootheden vastleggen. Zo is de snelheid de afstand per tijdseenheid. De bijbehorende eenheden liggen nu ook vast omdat een lengte door een tijd gedeeld wordt, zal de eenheid van de snelheid altijd een lengte-eenheid per tijdseenheid zijn. Wiskundig is dit kort op te schrijven: $v = s/t$. Deze formule is op te vatten als een eerste kruispunt waaruit we via leerwegen meer kennis kunnen laten ontstaan. Als een leerling zich als doel heeft gesteld om uit te rekenen wanneer je iemand onderweg kunt ontmoeten, moet de leerling het 'passeren' kunnen uitrekenen. Er moet dan eerst een weg naar een volgend kruispunt worden gelegd. Het kruispunt is 'de plaats als functie van de tijd'. Dit is af te leiden uit ons eerste kruispunt. Daarna moet de leerling deze kennis tweemaal gebruiken om het passeren uit te rekenen. Dit vergt een nieuw kruispunt: substitutie van een formule in een andere. Het kunnen substitueren is dus ook een weg in de kennisruimte naar het uiteindelijke berekenen van het passeermoment. Het uitwerken van de kennispaden tot kenniswegen en kruispunten is een hele puzzel. Deze puzzel is op te vatten als een didactisch systeem.

3.2.3 Kruispunten maken

Een eerste aanzet voor een leerweg naar kosmische straling is als volgt vorm te geven:

- Kruispunt: wetten van Newton.
- Weg: rechte botsing.
- Kruispunt: wet van behoud van impuls en wet van behoud van energie.
- Weg: schuine botsing.
- Kruispunt: twee- of driedimensionale botsingen. Transformatie (Galileï) van assenstelsels.

Een tweede weg:

- Doel: klopt de Galileï-transformatie?
- Weg: experiment van Michelson en Morley.
- Kruispunt: De lichtsnelheid is constant. De Galileï-transformatie is dus niet volledig.

Een derde weg:

- Kruispunt/doel: hoe ziet een transformatie er uit als de lichtsnelheid constant is?
- Etc.

Nog een weg:

- Kruispunt/doel: waar komen kosmische deeltjes vandaan?
- Etc.

Ook belangrijk:

- Kruispunt/doel: hoe ontstaat een 'shower'? / wat is een shower?

- Etc.

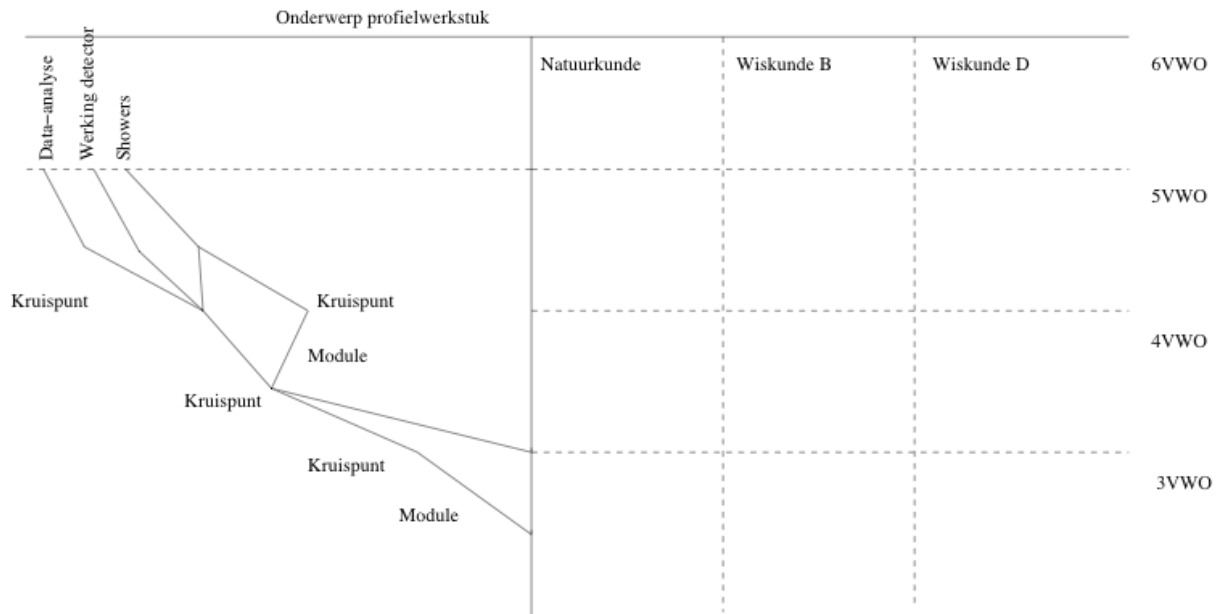
Een kruispunt levert de startkennis voor een weg naar een volgend kruispunt. Uiteindelijk levert deze nieuwe weg natuurlijk de kennis die bij het volgend kruispunt bekend wordt geacht. In het VWO natuurkunde curriculum kunnen we natuurlijk al een aantal kruispunten vinden:

- Een eerste kruispunt is de start van het vak natuurkunde. Leerlingen hebben een basiskennis wiskunde en enige natuurkundige voorkennis opgedaan bij het vak techniek. Op het Zaanlands Lyceum wordt in de brugklas ook 'science' onderwezen.
- Na deze start worden diverse onderdelen aangeboden, in grote lijnen kunnen leerlingen grootheden, eenheden en formules met 2 en 3 variabelen gebruiken. Eventueel is dit vanuit definities aan te brengen. Verder kunnen leerlingen tabellen en grafieken maken. Krachten als vector zijn bekend. Twee krachten in evenwicht ook. Dit is door een leerling tevens in de praktijk te brengen.
- In de derde klas wordt de kennis verdiept. Oppervlak onder een grafiek en de raaklijn in een grafiek krijgen een betekenis. Krachten kunnen versnellingen veroorzaken. Formules kunnen meerdere variabelen krijgen. Soms heb je twee formules nodig om een probleem op te lossen. Eind derde klas leid ik ook de lenzenwet af uit de bijzondere lichtstralen, dit staat niet expliciet in het curriculum. Ik moet echter bij de rapportvergadering uit kunnen leggen of een leerling in de vierde klas een NG/NT profiel kan kiezen. Bij het Zaanlands Lyceum wordt in de tweede helft van de derde ook het 'profielvak' aangeboden. Hier wordt ook gekeken naar de vaardigheden van de leerling.
- In de bovenbouw zijn de vaardigheden te vinden in het PTA.

Aan deze kruispunten die de leerling al op school aangereikt krijgt, kunnen we nieuwe leerwegen knopen voor de in wis- en natuurkunde geïnteresseerde leerlingen. Uiteindelijk kunnen deze leerwegen uitmonden in een HiSPARC profielwerkstuk. Een klus die zeker gedaan moet worden, is het inventariseren van de kruispunten die de leerling op een gemiddelde school doorloopt.

3.2.4 Doelen

Voor leerlingen moeten er duidelijke doelen geformuleerd worden. Een lijst met doelen is dus het eerste deel van de weg naar een 'RouteNet' door kennisland. Als deze lijst met doelen in eerste aanleg geformuleerd is, kunnen we naar de wegen naar deze doelen kijken. Met wat geluk zijn deze in delen te knippen die worden verbonden via kruispunten. Zo'n deel van een weg kan naar meerdere doelen leiden en loopt van kruispunt naar kruispunt. Iedere deel of module kan geschreven worden als we de vaardigheden bij het beginkruispunt en bij het eindkruispunt kennen. Als we de inhoud van de kruispunten kennen en ons hier aan houden, is het netwerk dus door een groep personen uit te werken. Als een module niet bevalt, kan deze herschreven worden zonder dat het RouteNet door kennisland hieronder leidt. Het RouteNet (Figuur 3.14) is vervolgens dus zelf ook goed te onderhouden.



Figuur 3.14: RouteNet verbindt via kruispunten diverse leerwegen en onderwerpen.

3.2.5 Motivatie

Een leerling wil gemotiveerd worden om een doel te halen. Dit kan bijvoorbeeld door het RouteNet als spel te zien. Het halen van een certificaat is ook te zien als een prijs die je krijgt als je het spel hebt uitgespeeld. De kruispunten zijn dus ook als een soort 'game-levels' te zien. Als je een kruispunt hebt gehaald, heb je een beloning verdiend: een deelcertificaat. Het deelcertificaat kun je halen door een toets te doen. Dit kan bijvoorbeeld interactief. Leerlingen moeten dan natuurlijk wel met naam en wachtwoord op een site inloggen. Op deze site kunnen ze een 'spel' spelen (toets maken); is het spel gelukt dan geeft dit toegang tot een hoger niveau. Heb je einddoel gehaald, dan krijg je een certificaat.

3.2.6 De gebieden

Om de klus zeker af te ronden, wordt de plattegrond verdeeld in gebieden. Deze worden deel voor deel uitgewerkt zodat er altijd doorgaande wegen ontstaan.

3.2.7 Interactie met materie

- Kruispunt/doel: hoe ontstaat een 'shower'? / wat is een shower?
- Etc.
-

Bij het HiSPARC project vindt er op verschillende manieren interactie met materie plaats. Boven in de atmosfeer botsen bijvoorbeeld deeltjes (veelal hoogenergetische protonen) op atomen. Via deze interactie met materie ontstaat er een lawine aan nieuwe deeltjes, een zogenaamde 'shower'.

In de HiSPARC detector vindt weer interactie plaats, zonder interactie wordt niets gedetecteerd. Deze interactie verklaart de werking van detectoren.

De krachten in het universum zijn eveneens op te vatten als interacties tussen materie. Omdat we altijd iets moeten weten over de interactie van materie, wordt dit een 'basismodule'.

3.2.8 Relativiteitstheorie

De relativiteitstheorie hebben we ook in verschillende situaties nodig aangezien de deeltjes vaak in de buurt van de lichtsnelheid bewegen. Dit is dus eigenlijk ook een 'basismodule'.

3.2.9 Microscopische opbouw van materie

- Kernfysica.
- Quantummechanica.
- Quarks en gluonen.

De deeltjes die boven in de atmosfeer gevormd aankomen, ontstaan voor een deel door kernreacties. Kernreacties horen bij de reguliere VWO-natuurkunde stof. Dit geeft dus een punt waar we een leerweg aan kunnen relateren.

Het onderzoek naar de wijze waarop bijvoorbeeld hoogenergetische protonen ontstaan is dus redelijk aan reguliere lesstof te koppelen.

Op het moment dat we naar botsingen met extreem hoogenergetische protonen gaan, vinden de botsingen plaats op quark niveau. Het is dus ook noodzakelijk om iets vertellen over extra behoudswetten (zoals spin) bij de botsing van quarks. Misschien moet er daarom ook iets aan het begrip 'faseruimte' gedaan worden.

3.2.10 Macroscopische opbouw materie

- Statistische bestudering van sterrenstelsels.
- Big Bang.

De hoogenergetische kosmische deeltjes komen ergens vandaan. We willen natuurlijk ook werken aan een verklaring van de HiSPARC metingen. Vroeg of laat komen we dan bij de opbouw en daarmee het ontstaan van het universum.

3.2.11 Onderzoekers

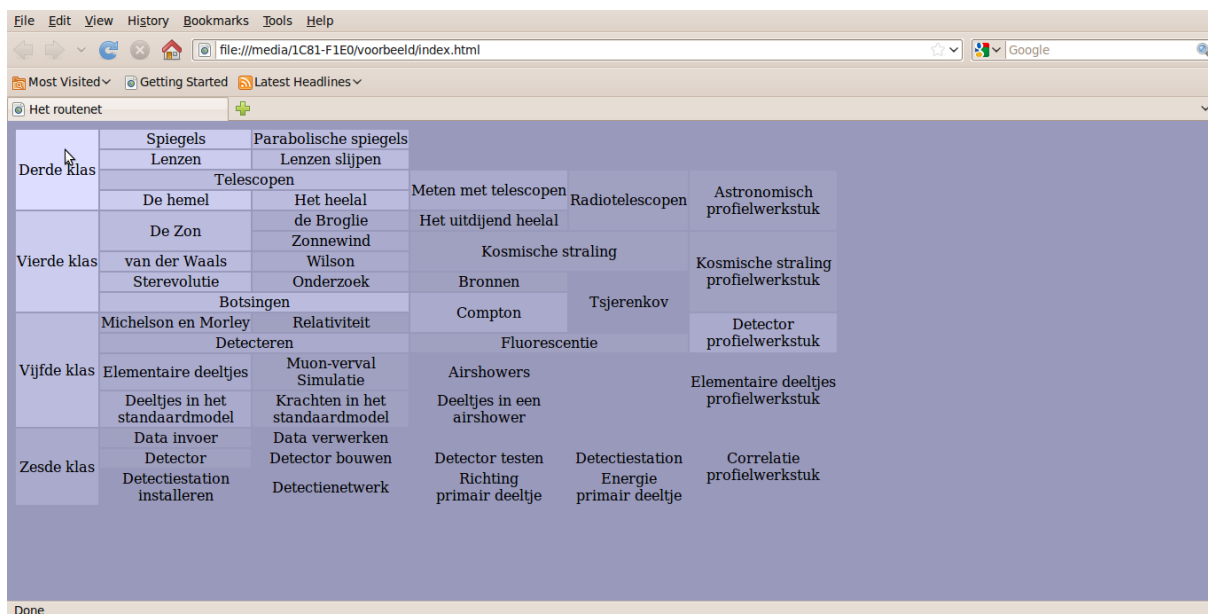
Op deze gebieden is door meerdere mensen onderzoek verricht. Als start heb ik een eerste opzet voor een chronologisch overzicht gemaakt en geef ik iedere onderzoeker een volgnummer. Achter de naam van de onderzoeker staan de volgnummers van de onderzoekers op wier werk wordt voortgebouwd:

1. Friedrich Wilhelm (Sir Frederick William) Herschel 1738-1822: (2).
2. Caroline Lucretia Herschel 1750-1848: 1.
3. (Sir) John Frederick William Herschel, (1st Baronet) 1792-1871: 1,2
4. James Clerk Maxwell 1831-1879.
5. Johannes Diderik van der Waals 1837-1923.
6. Edward Williams Morley 1838-1923: 12.
7. Ludwig Boltzman 1844-1906: 6.
8. Wilhelm Conrad Röntgen 1845-1923: (9).
9. Eugen Goldstein 1850-1930: (8).
10. Jacobus Cornelius Kapteyn 1851-1922: 1.

11. Antoine Henri Becquerel 1852-1908: 8.
12. Albert Abraham Michelson 1852-1931: 6.
13. Hendrik Antoon Lorentz 1853-1928: 6, 12, 14.
14. Jules Henri Poincaré 1854-1912: 13.
15. (Sir) Joseph John Thomson 1856-1940: 9.
16. Max Karl Ernst Ludwig Planck 1858-1947.
17. David Hilbert 1862-1943.
18. Hermann Minkowski 1864-1909: 13, 30.
19. Maria Salomea (Marie) Skłodowska-Curie 1867-1934: 11.
20. Henrietta Swan Leavitt 1868-1921: (10).
21. Robert Andrews Millikan 1868-1953: (9).
22. Charles Thomson Rees Wilson 1869-1959: (5).
23. Ernest (baron) Rutherford 1871-1937: 15.
24. Willem de Sitter 1872-1934: 10.
25. Heber Doust Curtis 1872-1942: 36, (10).
26. Ejnar Hertzsprung 1873-1967: 10, (28).
27. Vesto Melvin Slipher 1875-1969: 10.
28. Henry Norris Russel 1877-1937: 10, (26).
29. Lise Meitner 1878-1968: 23, 31.
30. Albert Einstein 1879-1955: 4, 13, 18, 16.
31. Otto Hahn 1879-1968: 23, 29.
32. Amalie Emmy Noether 1882-1935: 30, 17.
33. Arthur Stanley Eddington 1882-1944: 30.
34. Johannes Wilhelm Geiger 1882-1945: 23.
35. Niels Henrik David Bohr 1885-1962: 23, 16.
36. Harlow Shapley 1885-1972: 25, (10).
37. Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger 1887-1961: 42.
38. Aleksandr Aleksandrovitsj Friedmann 1888-1925: 30.
39. Edwin Powell Hubble 1889-1953: 27.
40. (Sir) James Chadwick 1891-1974: 23
41. Arthur Holly Compton 1892-1962: 30.
42. Louis Victor Pierre Raymond (prince / duc) de Broglie (spreek uit "de Breuil") 1892-1987: 16.
43. Georges Henri Joseph Edouard (monsignor) Lemaître 1894-1966: 23, 24, 27, 30, 33, 38, 39.
44. Satyendra Nath Bose 1894-1974: (37).
45. Pierre Victor Auger 1899-1993: 29.
46. Wolfgang Ernst Pauli 1900-1958: (37).
47. Jan Hendrik Oort 1900-1992: 10.
48. Enrico Fermi 1901-1954: (37).
49. Pavel Aleksejevitsj Tsjerenkov 1904-1990: 30.
50. Subramanyan Chandrasekhar 1910-1995: 16, 26-28.
51. Richard (Phillips) Feynman 1918-1988: (37).
52. Hendrik Christoffel van de Hulst 1918-2000: (43).
53. (Dame) Susan Jocelyn Bell Burnell 1943: (50).

3.2.12 De uitvoering

Het RouteNet is de sleutel waarmee de routes gevonden kunnen worden. In Figuur 3.15 is het RouteNet afgebeeld zoals dit op <http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/routenetpad/> te vinden is. Als de muis boven een hokje komt, wordt dit lichter. Aansluitende hokjes worden steeds donkerder. Zoals in de figuur te zien is kun je vanaf de derde klas een aantal leerwegen inslaan. Komt de muis boven het volgende hokje dan wordt dit lichter. Is er een document aan het hokje gekoppeld, dan wordt de tekst blauw. In dit RouteNet is het werk van J. Kortland [30 en mij te vinden. In de toekomst kan hier ook werk van anderen in ondergebracht worden.



Figuur 3.15: RouteNet op de HiSPARC website.

3.2.13 Status

De website werkt op dit moment via drie software bestanden (voor de code zie Appendix A):

- Het bestand 'index.html', hierin wordt de inhoud van de site vastgelegd. Deze inhoud is bij te werken door tabel-items toe te voegen of weg te halen. Ieder item heeft een identiteit en een titel. Het attribuut 'id' legt de identiteit van het item vast, bijvoorbeeld 'k13' voor de derde klas. Het attribuut 'title' geeft een door komma's gescheiden opsomming van de identiteiten van de volgende items, bijvoorbeeld 'spg, lzn, hml, k14'.
- Het bestand 'routenet.css'; hierin wordt de vormgeving van de diverse klassen voor het bestand index.html vastgelegd.
- Het bestand 'highlight.js'; hierin wordt de verandering van vormgeving van het bestand index.html vastgelegd.

De bestanden routenet.css en highlight.js halen hun informatie uit index.html. Deze bestanden blijven dus werken, zolang in het bestand index.html de juiste attributen id en title worden gegeven. Een voordeel van deze benadering is dat alleen het bestand index.html onderhouden hoeft te worden. Verder kan er van een item naar een item op een niet aansluitende plaats gesprongen worden.

Vanaf de website kunnen er modules als *.pdf (portable data file) bestanden worden opgehaald. Deze zijn in Lyx (een latex front-end) geschreven. Om vectorafbeeldingen in plaats van pixel afbeeldingen te krijgen, zijn de afbeeldingen gemaakt in xfig. De site is platformonafhankelijk volgens de w3c-norm en werkt zelfs op de iPod/iPhone.

Zoals te zien is, worden de onderzoekers uit sectie 3.2.11 niet expliciet genoemd. In sommige modules wordt er wel aan diverse onderzoekers gerefereerd. De chronologische opzet wordt over het algemeen wel gevolgd.

3.2.14 Conclusie

RouteNet is operationeel en kan bekeken worden via de HiSPARC website:

<http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/routenetpad/>

Bij diverse presentaties aan docenten heb ik reacties op de site gepeild. De reactie liepen uiteen; een aantal docenten ziet hier een middel in om leerlingen te inspireren. Andere docenten zijn meer op zoek naar klassikaal georiënteerd lesmateriaal. Hopelijk is dit meer klassikale materiaal te vinden als NLT-module of binnen de NiNa. Eventueel zijn de links naar dit materiaal ook in een RouteNet onder te brengen. Vooral nog zijn de relevante NLT en NiNa modules o.a. op de HiSPARC website te vinden onder 'docent-student'.

Omdat het RouteNet een voortschrijdend project is, zijn er altijd verbeteringen mogelijk. Naast de nu beschikbare informatie zijn er voor het volgend jaar voor mij twee doelen. Twee leerlingen gaan een toets-spel ontwerpen als onderdeel van hun profielwerkstuk. Daarnaast ligt er bij de schoolleiding een voorstel van een collega en mij om in de vijfde klas een buitenschoolse pilot op te zetten voor 5-VWO leerlingen die een HiSPARC-profielwerkstuk willen gaan maken. Tot slot zou een set uitwerkingen bij de opdrachten ook een aanvulling zijn.

3.3 De detectie van kosmische straling



Figuur 3.16: Hans Montanus - Oostvaarders College Almere [31] -

Hans Montanus is na zijn afstuderen in de natuurkunde (UvA, 1987) al snel in het onderwijs terecht gekomen. Eerst als docent Natuurkunde, later als docent Wiskunde. Momenteel is hij werkzaam op het Oostvaarders College te Almere. Daar geeft hij momenteel wiskunde B en wiskunde D in de bovenbouw van het VWO. Hij grijpt het project 'Leraar in Onderzoek' (LiO) graag aan om onderzoek te kunnen verrichten.

3.3.1 Onderzoeksopdracht

Wanneer een kosmische inslag wordt gedetecteerd door drie nabij gelegen meetstations, dan leidt de interpretatie van de drie meetwaarden in het algemeen tot twee mogelijke inslagpunten. Hoe verhouden de posities van deze twee mogelijke inslagpunten zich tot elkaar en hoe verhouden ze zich tot de posities van de meetstations? Die vraag kun je beantwoorden door middel van een wiskundige analyse. In dit onderzoeksverslag wordt dit beschreven.

3.3.2 Introductie

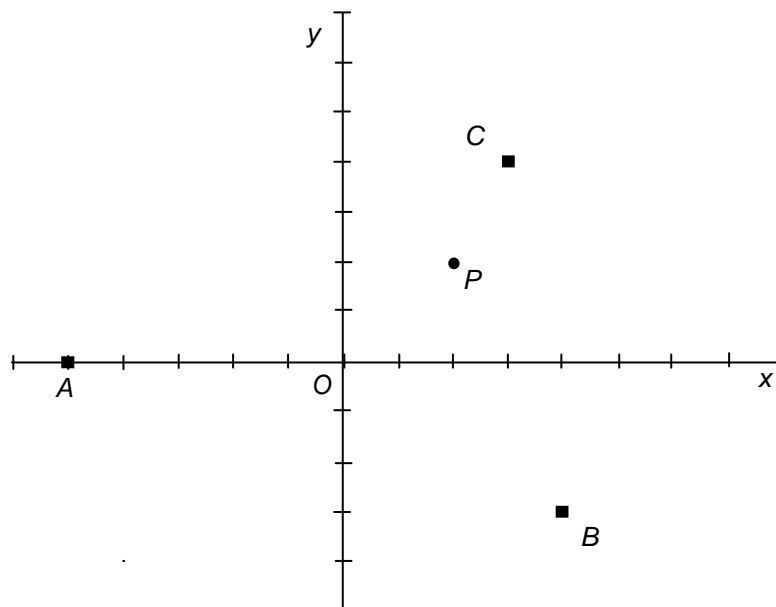
Wanneer een kosmisch deeltje met zeer hoge energie in onze dampkring komt, ontstaat een shower met deeltjes, waaronder muonen. De muonen uit de shower kunnen we waarnemen met behulp van muondetectoren. Een aantal muondetectoren die vlak naast elkaar staan, vormen een meetstation. De shower ligt rondom het verlengde van de baan van het primaire deeltje. Het punt waar dit verlengde, de core van de shower, denkbeeldig de aarde raakt, is het inslagpunt. Daar zal de uitslag van de detectoren het grootst zijn. Naarmate de energie van de shower groter en de afstand van het inslagpunt tot het meetstation kleiner is, registreert het meetstation een grotere uitslag. Aan de hand van de grootte van de uitslag bij de drie meetstations wordt het inslagpunt bepaald. Ook het tijdstip van de detectie wordt geregistreerd. Die is nodig voor de bepaling van de richting van de shower.

3.3.3 Deeltjesdetectie

Hoe verder weg een detector van het inslagpunt staat, des te kleiner zal de deeltjesdichtheid en dus de uitslag van de detector zijn. Omwille van de eenvoud gaan we er eerst even vanuit dat voor de deeltjesdichtheid ρ geldt:

$$\rho \propto r^{-3,5} \quad (3.15)$$

Hierin is r de horizontale afstand ten opzichte van het inslagpunt. Uitgangspunt is drie meetstations A , B en C . Deze zijn gepositioneerd in een driehoek. We kiezen ons assenstelsel in het middelpunt van de omgeschreven cirkel van driehoek ABC . De meetstations A en B en C bevinden zich bijvoorbeeld in het punt $A(-500, 0)$, $B(400, -300)$ en $C(300, 400)$. De eenheden zijn in meters. Laat $P(200, 200)$ het inslagpunt zijn. Zie Figuur 3.17.



Figuur 3.17: Bovenaanzicht van een denkbeeldige situatie met drie meetstations.

De afstand van A tot P is $AP = \sqrt{700^2 + 200^2} \approx 728$ m, de afstand van B tot P is $BP = \sqrt{200^2 + 500^2} \approx 539$ m en de afstand van C tot P is $CP = \sqrt{100^2 + 200^2} \approx 224$ m. Voor de verhoudingen van de deeltjesdichtheid bij de meetstations geldt dan:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_A}{\rho_B} &= \left(\frac{BP}{AP}\right)^{3,5} = \left(\frac{539}{728}\right)^{3,5} = 0,349 \\ \frac{\rho_A}{\rho_C} &= \left(\frac{CP}{AP}\right)^{3,5} = \left(\frac{224}{728}\right)^{3,5} = 0,0162 \\ \frac{\rho_B}{\rho_C} &= \frac{0,0162}{0,349} = 0,0463 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Hierin zijn ρ_A , ρ_B en ρ_C de deeltjesdichtheden bij de meetstations A , B respectievelijk C .

Stel dat het inslagpunt de coördinaten (625,625) zou hebben gehad. Dan kan worden nagegaan dat we dan dezelfde verhoudingen van de deeltjesdichtheid krijgen als voor het inslagpunt $P(200,200)$. Voor een mogelijk inslagpunt Q dat dezelfde verhoudingen van de detectoruitslagen oplevert als het punt $P(200,200)$ moeten dezelfde verhoudingen gelden als in (3.16). Voor de eerste verhouding betekent dat:

$$\left(\frac{BQ}{AQ}\right)^{3,5} = 0,34 \rightarrow \left(\frac{BQ}{AQ}\right)^2 = 0,349^{2/3,5} = 0,548 \quad (3.17)$$

We noteren het mogelijke inslagpunt als $Q(x, y)$. Dan is:

$$\begin{aligned} AQ^2 &= (500 + x)^2 + y^2 \\ BQ^2 &= (400 - x)^2 + (300 + y)^2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

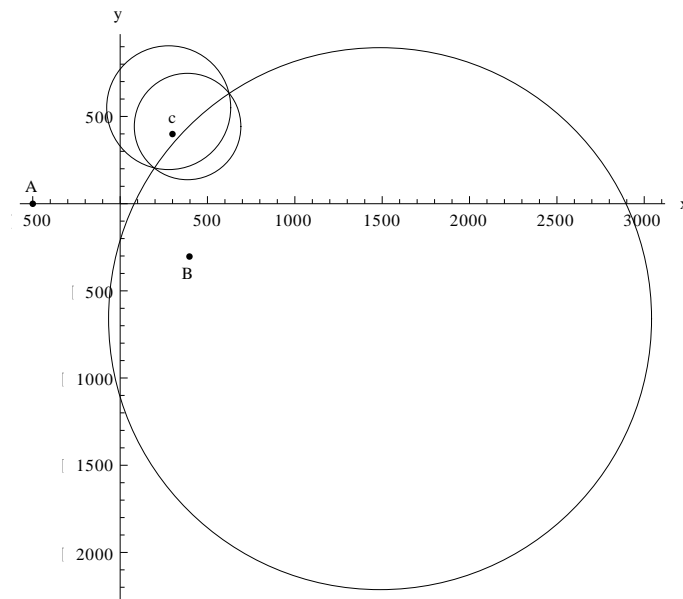
Combineren van (3.17) en (3.18) levert:

$$(400 - x)^2 + (300 + y)^2 = 0,548 \cdot [(500 + x)^2 + y^2] \quad (3.19)$$

Dit kan worden herleid tot $(x - 1488)^2 + (y + 663)^2 \approx 1550^2$ en dit is de vergelijking van een cirkel met straal 1550 en middelpunt (1488, -663). Op dezelfde manier leiden de andere dichtheidsverhoudingen uit (3.16) tot de cirkels:

$$\begin{aligned} (x - 383)^2 + (y - 442)^2 &\approx 303^2 \\ (x - 279)^2 + (y - 546)^2 &\approx 355^2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

De drie cirkels snijden elkaar (Figuur 3.18) niet alleen in (200, 200), maar ook in (625, 625)!



Figuur 3.18: Bovenaanzicht van de drie cirkelvormige oplossingskrommen. Bij elk tweetal dichtheden hoort zo'n kromme. De omgeschreven cirkel van de drie punten A, B en C is de inversiecirkel.

De drie cirkelvormige oplossingskrommen snijden elkaar in twee punten. Dat is het tweetal mogelijke inslagpunten. Het is interessant om te zien wat het verband is tussen de posities van de punten van zo'n tweetal. Om dat wiskundig te analyseren nemen we een mogelijk inslagpunt P met coördinaten (s, t) en gaan vervolgens de coördinaten (x, y) van het tweede mogelijke inslagpunt Q uitdrukken in s en t . De verhoudingen van de deeltjesdichtheid moet voor Q hetzelfde zijn als voor P . Dat betekent weer dat de verhoudingen van de afstanden van de detectoren tot Q hetzelfde moeten zijn als tot P . In formule vorm is dat:

$$\frac{(500+x)^2 + y^2}{(400-x)^2 + (300+y)^2} = \frac{(500+s)^2 + t^2}{(400-s)^2 + (300+t)^2}$$

$$\frac{(500+x)^2 + y^2}{(300-x)^2 + (400-y)^2} = \frac{(500+s)^2 + t^2}{(300-s)^2 + (400-t)^2} \quad (3.21)$$

Dit stelsel vergelijkingen heeft, naast de triviale oplossing $x = s$, $y = t$, de oplossing

$$x = \frac{500^2 \cdot s}{s^2 + t^2}$$

$$y = \frac{500^2 \cdot t}{s^2 + t^2} \quad (3.22)$$

Aan deze oplossing kun je zien dat het punt (x, y) dichter bij de oorsprong ligt naarmate het punt (s, t) verder bij de oorsprong vandaan gaat. De twee punten vallen samen, $x = s$ en $y = t$, wanneer $s^2 + t^2 = 500^2$ en dus ook $x^2 + y^2 = 500^2$. Dit laatste is precies de vergelijking van de omgeschreven cirkel van driehoek ABC . Noemen we de straal van de omgeschreven cirkel R , dan kunnen we ook schrijven:

$$x = \frac{R^2 \cdot s}{s^2 + t^2}$$

$$y = \frac{R^2 \cdot t}{s^2 + t^2} \quad (3.23)$$

Deze eenvoudige vorm heeft als voordeel dat direct kan worden ingezien dat $(x^2 + y^2) \cdot (s^2 + t^2) = R^4$ ofwel dat $R_Q \cdot R_P = R^2$, waarbij R_P en R_Q de afstanden zijn van punt $P(s, t)$ respectievelijk punt $Q(x, y)$ tot het middelpunt O van de omgeschreven cirkel. Verder volgt dat $x = v \cdot y$ als $t = v \cdot s$, met v een willekeurig getal. Dat betekent dat het puntentweetal altijd op een lijn door O ligt. Kortom, de omgeschreven cirkel fungeert als inversiecirkel.

Met de formules in (3.23) kan worden nagegaan dat bijvoorbeeld de cirkel $(x - 383)^2 + (y - 442)^2 \approx 303^2$ overgaat in $(s - 383)^2 + (t - 442)^2 \approx 303^2$. Deze cirkel wordt dus op zichzelf afgebeeld: de identieke afbeelding. Dit geldt ook voor de andere twee cirkels in Figuur 3.18.

3.3.4 Een directe formule

In sectie 3.3.3 rekenden we met concrete getalswaarden voor de dichtheidsverhoudingen. Nu gaan

we een algemene formule opstellen. De detectoruitslagen hoeven we daar dan alleen maar in te vullen om de mogelijke inslagpunten te berekenen. Startpunt zijn de eerste twee vergelijkingen in (3.16). De derde vergelijking laten we buiten beschouwing omdat die geen extra informatie bevat ten opzichte van de eerste twee vergelijkingen. De twee vergelijkingen kunnen we (voor punt Q) ook schrijven als:

$$\begin{aligned}\left(\frac{BQ}{AQ}\right)^2 &= \left(\frac{\rho_A}{\rho_B}\right)^{\frac{4}{7}} \\ \left(\frac{CQ}{AQ}\right)^2 &= \left(\frac{\rho_A}{\rho_C}\right)^{\frac{4}{7}}\end{aligned}\quad (3.24)$$

Om veel schrijfwerk te voorkomen definiëren we:

$$\begin{aligned}p &\equiv \left(\frac{\rho_A}{\rho_B}\right)^{\frac{4}{7}} \\ q &\equiv \left(\frac{\rho_A}{\rho_C}\right)^{\frac{4}{7}}\end{aligned}\quad (3.25)$$

De vergelijkingen worden dan $BQ^2 = p \cdot AQ^2$ respectievelijk $CQ^2 = q \cdot AQ^2$. Substitueren we de relaties:

$$\begin{aligned}AQ^2 &= (500 + x)^2 + y^2 \\ BQ^2 &= (400 - x)^2 + (300 + y)^2 \\ CQ^2 &= (300 - x)^2 + (400 - y)^2\end{aligned}\quad (3.26)$$

dan krijgen we het volgende stelsel van twee vergelijkingen voor de twee onbekenden x en y :

$$\begin{aligned}(400 - x)^2 + (300 + y)^2 &= p \cdot ((500 + x)^2 + y^2) \\ (300 - x)^2 + (400 - y)^2 &= q \cdot ((500 + x)^2 + y^2)\end{aligned}\quad (3.27)$$

Dit stelsel heeft de twee oplossingen:

$$\begin{aligned}x &= F \cdot \frac{E \pm \sqrt{D}}{N} \\ y &= G \cdot \frac{E \pm \sqrt{D}}{N}\end{aligned}\quad (3.28)$$

waarbij

$$\begin{aligned}F &= 50 \cdot (7 - 4p - 3q) \\ G &= 50 \cdot (1 + 8p - 9q) \\ E &= 5 + 4p + 3q\end{aligned}\quad (3.29)$$

$$D = 80p + 144pq + 90q - 25 - 81q^2 - 64p^2$$

$$N = 5 + 8p^2 - 6q + 9q^2 - 4p - 12pq$$

Het moet worden benadrukt dat deze 'algemene' oplossing alleen geldt voor de detectoropstelling zoals in Figuur 3.17. Aan de formules voor x en y zie je dat de twee mogelijke inslagpunten samenvallen indien $D = 0$. Dit is het geval als

$$p = \frac{5 \pm 6\sqrt{5q + 9q}}{8} \quad (3.30)$$

En dit correspondeert weer met

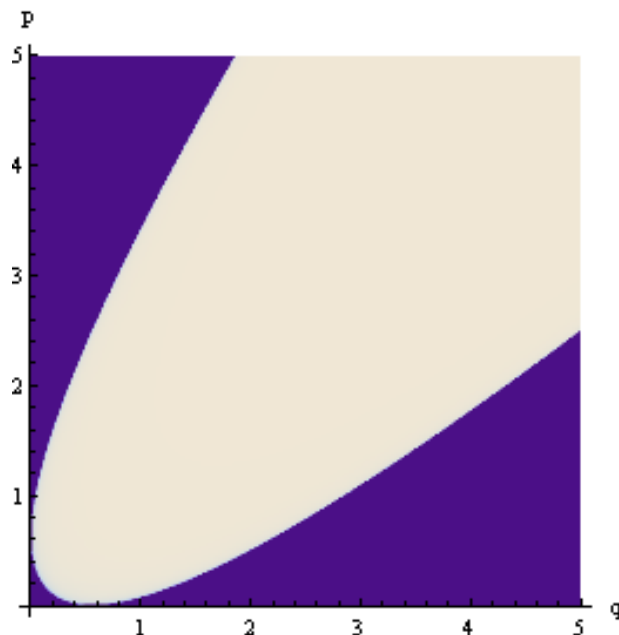
$$x = 500 \cdot \left(\frac{8}{5 \pm 2\sqrt{5q + 5q}} - 1 \right)$$

$$y = 500 \cdot \left(\frac{4 \pm 4\sqrt{5q}}{5 \pm 2\sqrt{5q + 5q}} \right) \quad (3.31)$$

Na eliminatie van q reduceert dit tot $x^2 + y^2 = 500^2$ en dit is juist de vergelijking van de omgeschreven cirkel ofwel van de inversie cirkel. De situatie met $D < 0$ is geen reële oplossing. De eis $D \geq 0$ ofwel $80p + 144pq + 90q - 25 - 81q^2 - 64p^2 \geq 0$ betekent dat

$$\frac{5 - 6\sqrt{5q + 9q}}{8} \leq p \leq \frac{5 + 6\sqrt{5q + 9q}}{8} \quad (3.32)$$

Grafisch is dit het witte gebied in Figuur 3.19.

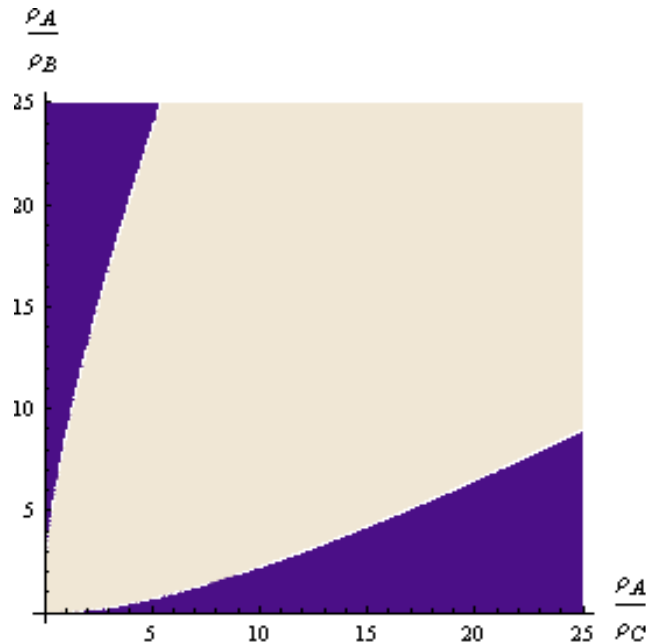


Figuur 3.19: Het toegestane gebied (wit) voor de waarden van p en q resp.

Omdat

$$p = \left(\frac{\rho_A}{\rho_B} \right)^{\frac{4}{7}} \text{ en } p = \left(\frac{\rho_A}{\rho_C} \right)^{\frac{4}{7}} \quad (3.33)$$

kunnen we ook het toegestane gebied van de verhoudingen van de dichtheden grafisch weergeven (Figuur 3.20).



Figuur 3.20: Het toegestane gebied (wit) van de dichtheidsverhoudingen.

In het algemeen fluctueren meetwaarden ten opzichte van de werkelijke waarden. Bij grote fluctuaties kunnen de gemeten dichtheidsverhoudingen terechtkomen in het donkere gebied van Figuur 3.20. In dat geval zijn de meetwaarden strijdig met de geometrie van de opstelling van de drie meetstations. In dat geval kun je dus ook niet verwachten dat een computerprogramma tot een numerieke oplossing leidt.

3.3.5 De deeltjesdichtheid

Tot nu toe gingen we uit van het eenvoudige verband $\rho \propto r^{-3.5}$ tussen de deeltjesdichtheid en de horizontale afstand r tot het inslagpunt. We beschouwen nu een minder simpel verband:

$$\rho \propto r^{-1.2} \cdot \left(1 + \frac{r}{92} \right)^{-2.8} \quad (3.34)$$

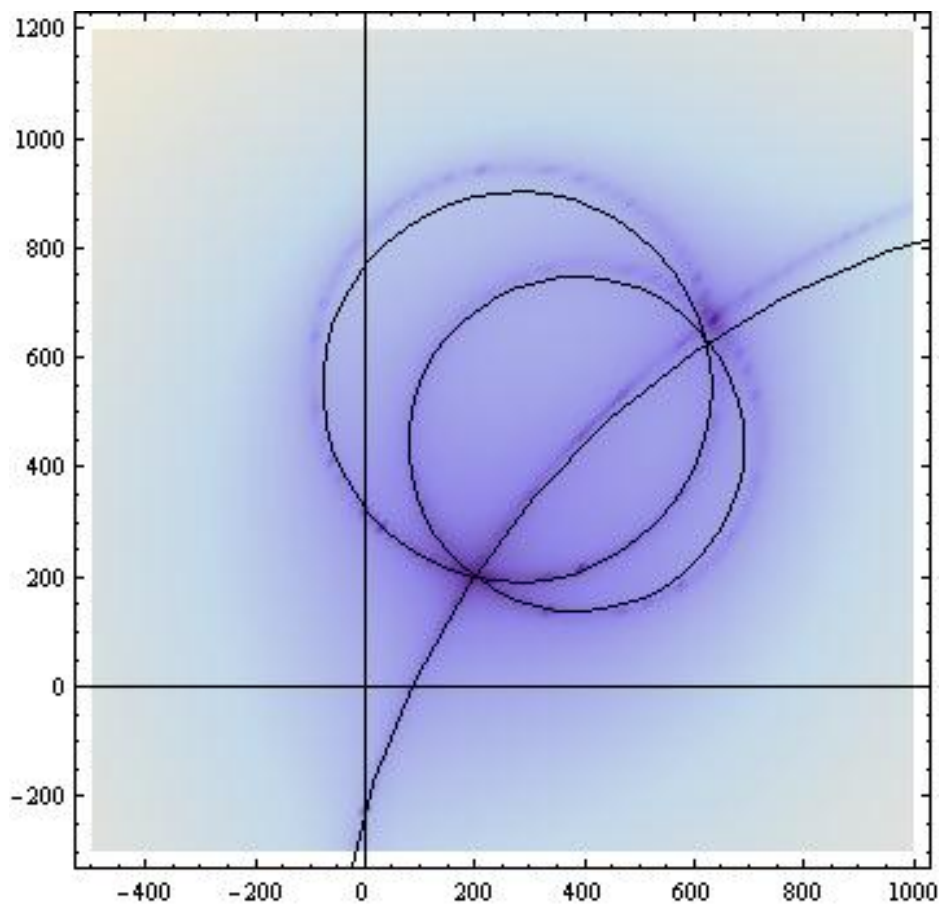
We gaan weer uit van de detectoropstelling in Figuur 3.17 en van (dezelfde) verhoudingen van de detectoruitslagen zoals gegeven in (3.16). Deze verhoudingen leiden met de nieuwe dichtheidsfunctie tot de volgende vergelijkingen:

$$\left(\frac{BP}{AP} \right)^{1.2} \cdot \left(\frac{92 + BP}{92 + AP} \right)^{2.8} = 0,349$$

$$\left(\frac{CP}{AP}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{92+CP}{92+AP}\right)^{2,8} = 0,0162 \quad (3.35)$$

$$\left(\frac{CP}{BP}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{92+CP}{92+BP}\right)^{2,8} = 0,0463$$

met de uitdrukkingen voor de afstanden gegeven in (3.26), maar nu i.p.v. punt Q voor punt P . Voor het zoeken van de punten (x,y) die aan een van de drie vergelijkingen voldoen, gebruiken we een computerprogramma. Voor de nieuwe deeltjesdichtheid is het resultaat daarvan te zien in Figuur 3.21. Ter vergelijking zijn de cirkels van Figuur 3.18 en driehoek ABC ook in deze figuur afgebeeld.



Figuur 3.21: Numeriek bepaalde oplossingskrommen (paars).

De oplossingskrommen van de drie vergelijkingen (wazig paars) verschillen maar weinig van die in de vorige situatie. Het linkersnijpunt van de drie cirkels is niet zichtbaar verplaatst, terwijl het rechtersnijpunt iets verder van O verwijderd is. De lijn door de twee snijpunten van de drie cirkels is weliswaar iets verdraaid ten opzichte van die in Figuur 3.18, maar gaat bijna nog door O . In de nieuwe situatie is het product van de afstanden van O tot de cirkelsnijpunten niet precies gelijk meer aan de straal van de omgeschreven cirkel in het kwadraat. Kennelijk is in de nieuwe situatie de omgeschreven cirkel niet meer de inversiecirkel, maar nog wel bij benadering. Dit inzicht levert een methode om de mogelijke inslagpunten met de computer te berekenen:

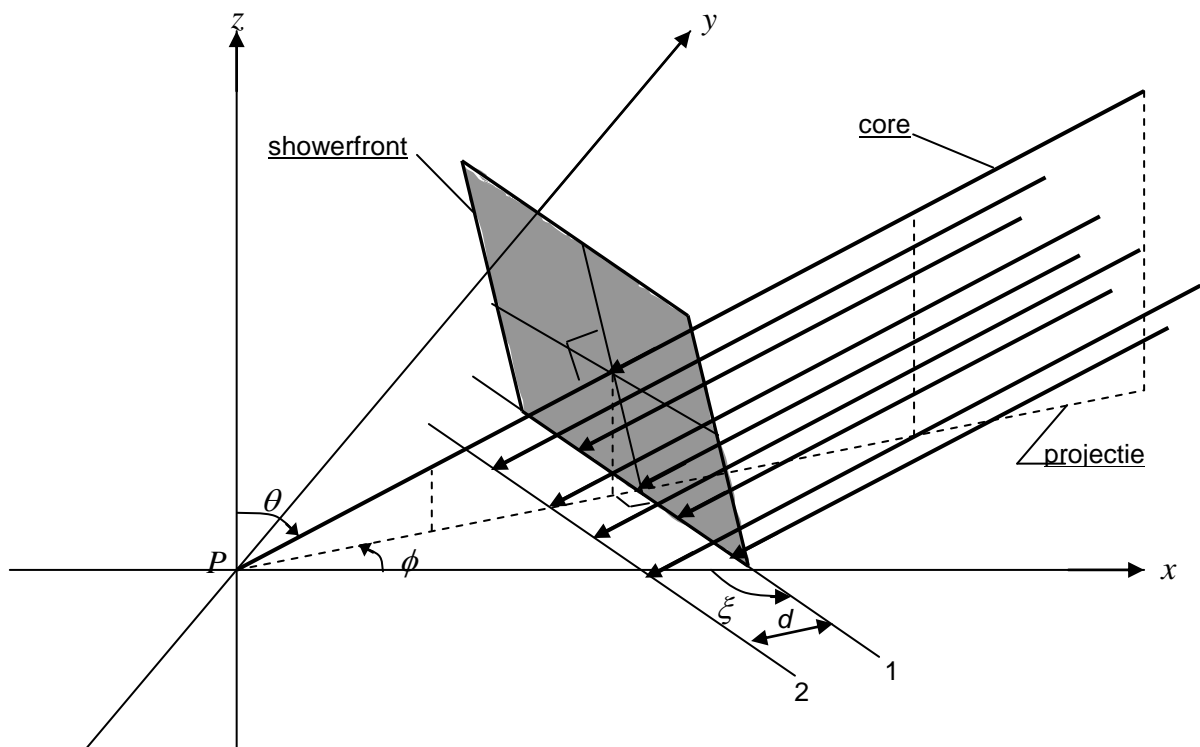
1. Bepaal de straal R en het middelpunt M van de omschreven cirkel van de drie detectoren.
2. Neem M als startpositie en bereken van daaruit het mogelijke inslagpunt P door de vergelijkingen numeriek op te lossen.
3. Verleng MP tot een punt T zo dat $MP \cdot MT \approx R^2$.
4. Neem T als startpositie en bereken van daaruit het mogelijke inslagpunt Q door de vergelijkingen numeriek op te lossen.

Met behulp van bijvoorbeeld *MATHEMATICA* vinden we op deze manier voor de snijpunten in de nieuwe situatie: (196,97; 204,76) en (634,83; 670,60). Dit zou corresponderen met een inversiestraal - maar daar kun je nu niet meer van spreken - van 521,46 m.

Verder onderzoek leert dat naarmate een inslagpunt dichterbij het middelpunt van de 'inversiecirkel' ligt, dat dan de 'inversiestraal' ongeveer 530 m is. Naarmate het inslagpunt dichterbij de omschreven cirkel komt, gaat de 'inversiestraal' steeds meer naar 500 m. Kortom, een minder simpel verband tussen de deeltjesdichtheid en de afstand tot de core maakt de inversie onzuiver, maar de onzuiverheid is betrekkelijk klein.

3.3.6 De richting van de shower

Tot nu toe hebben we alleen gekeken naar het inslagpunt. Het primaire deeltje heeft ook een richting. Deze richting wordt bepaald door de zenithoek en de azimuthhoek. We gaan er gemakshalve vanuit dat de baan van de kern van de shower in het verlengde ligt van de baan van het primaire deeltje. We trekken daarom in gedachten de baan van het primaire deeltje door tot het bij inslagpunt P het aardoppervlak bereikt. De zenithoek θ is dan de hoek tussen deze baan en de verticale z -as door P .



Figuur 3.22: 3-dimensionale voorstelling van een showerfront.

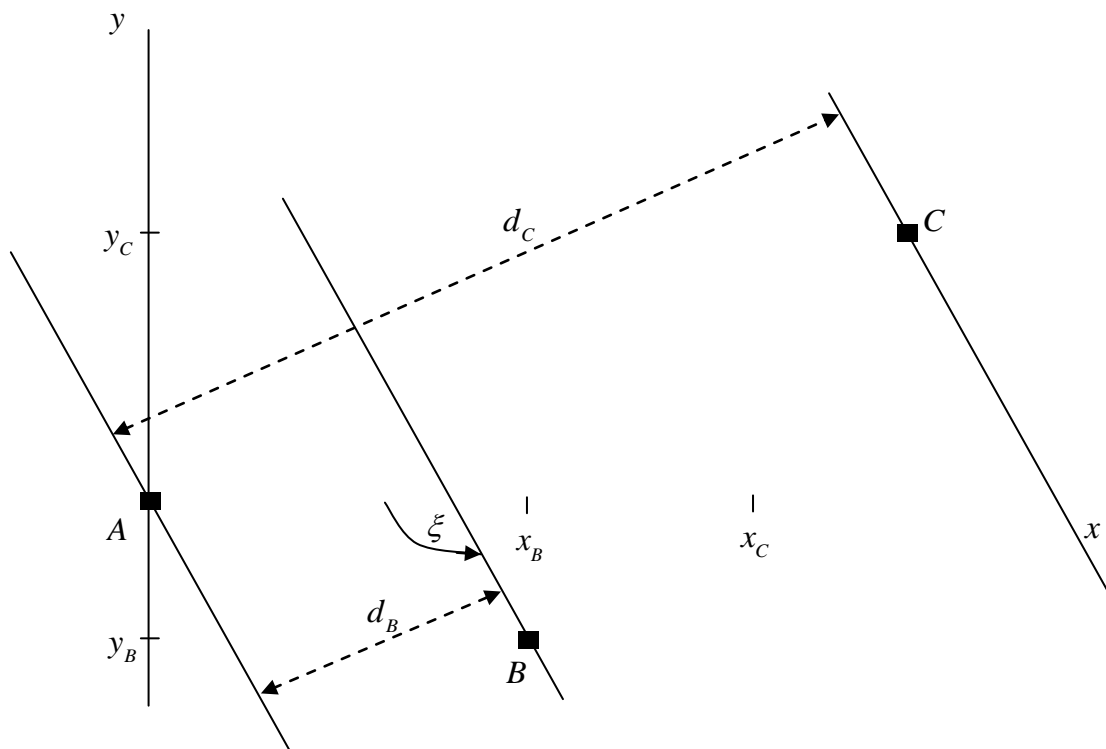
De azimuthhoek ϕ is de hoek tussen de loodrechte projectie van deze baan op het aardoppervlak en de horizontale x-as, zie Figuur 3.22. De richting van de horizontale x-as is van west naar oost en de richting van de horizontale y-as is van zuid naar noord.

We nemen aan dat het front van de shower vlak is, zoals getekend in Figuur 3.22. Op tijdstip t_1 is lijn 1 de snijlijn van het showerfront en het xy-vlak. Op tijdstip t_2 is lijn 2 de snijlijn van het showerfront en het xy-vlak. Het front van de shower beweegt zich voort met vrijwel de lichtsnelheid $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Als d de afstand is tussen lijn 1 en lijn 2 dan geldt:

$$\sin \theta = \frac{c \cdot (t_2 - t_1)}{d} \quad (3.36)$$

Voor de hoek ξ tussen de x-as en lijn 1 geldt $\xi = \phi + 90^\circ$.

Er is weer sprake van drie detectoren. Voor het vervolg is het handig de oorsprong te kiezen op de plaats van detector A. Dan heeft A de coördinaten (0, 0). De coördinaten van detector B en C duiden we aan met (x_B, y_B) respectievelijk (x_C, y_C) . Deze situatie is geschetst in (3.26). Tevens zijn de snijlijnen getekend van het showerfront met het grondvlak op het moment dat deze door een van de detectorposities gaat.



Figuur 3.23: Bovenaanzicht van de snijlijnen van het aardoppervlak en het showerfront op het moment dat deze de meetstations passeert.

De snijlijn door A schrijven we als $y = m \cdot x$, waarbij m de richtingscoëfficiënt is. Voor de afstanden tussen de snijlijnen geldt dan

$$d_B = \frac{m \cdot x_B - y_B}{\sqrt{m^2 + 1}}$$

$$d_C = \frac{m \cdot x_C - y_C}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (3.37)$$

De tijdstippen waarop de snijlijn de detectoren A, B en C passeert zijn t_A , t_B respectievelijk t_C . Hiermee kunnen de afstanden tussen de snijlijnen ook geschreven worden als:

$$d_B = \frac{c \cdot (t_A - t_B)}{\sin \theta}$$

$$d_C = \frac{c \cdot (t_A - t_C)}{\sin \theta} \quad (3.38)$$

Dit betekent dat

$$\frac{m \cdot x_B - y_B}{\sqrt{m^2 + 1}} = \frac{c \cdot (t_A - t_B)}{\sin \theta}$$

$$\frac{m \cdot x_C - y_C}{\sqrt{m^2 + 1}} = \frac{c \cdot (t_A - t_C)}{\sin \theta} \quad (3.39)$$

Deze twee vergelijkingen voor de onbekenden m en θ zijn te herschrijven tot:

$$m = \frac{y_B \cdot (t_A - t_C) - y_C \cdot (t_A - t_B)}{x_B \cdot (t_A - t_C) - x_C \cdot (t_A - t_B)}$$

$$\sin \theta = \frac{c \cdot |t_A - t_B| \cdot \sqrt{m^2 + 1}}{|m \cdot x_B - y_B|} \quad (3.40)$$

Aan de hand van de waarden t_A , t_B en t_C zoals die door de meetstations zijn geregistreerd, kan m en de zenithoek θ worden berekend. Omdat $m = \tan \xi = \tan(\phi + 90^\circ)$ weten we dan tevens de azimuthhoek ϕ .

3.3.7 De energie van het primaire deeltje

Om inzicht te krijgen in de samenhang tussen de twee mogelijke inslagpunten gingen we in eerste instantie uit van een eenvoudige verband tussen de deeltjesdichtheid en de horizontale afstand tot het inslagpunt. In werkelijkheid is het verband ingewikkelder.

$$\rho(r, \theta) = \frac{f(r, \theta)}{f(600, \theta)} \cdot \frac{E}{4 \cdot 10^{17}} \cdot e^{k(\theta)} \quad (3.41)$$

met

$$f(r, \theta) = \left(\frac{r}{r_m}\right)^{-1,2} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_m}\right)^{1,2-\eta(\theta)} \cdot \left(1 + \left(\frac{r}{1000}\right)^2\right)^{-0,6}$$

$$k(\theta) = -\frac{920}{594} \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} + 0,188\right) \quad (3.42)$$

en

$$\eta(\theta) = 3,97 - 1,79 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right) \quad (3.43)$$

Hierin is r de horizontale afstand tot het inslagpunt in meter, θ de zenithoek, E de energie van het primaire deeltje in eV en r_m de Molièrestraal: $r_m \approx 92$ m.

Het recept om de energie van het primaire deeltje te berekenen is nu duidelijk. Eerst op basis van de tijdregistraties de zenithoek θ berekenen op de manier beschreven in sectie 3.3.6. Daarmee zijn $\eta(\theta)$ en $k(\theta)$ vastgelegd en is de deeltjesdichtheid alleen nog maar een functie van r . Vervolgens bepalen we de twee mogelijke inslagpunten op de manier van paragraaf 4. Tenslotte nemen we voor r de afstand van een mogelijk inslagpunt tot een van de drie detectoren en berekenen aan de hand van de gemeten deeltjesdichtheid aldaar de energie E van het primaire deeltje. Met behulp van *MATHEMATICA*TM kunnen deze berekeningen weer worden uitgevoerd.

3.3.8 Een alternatieve distributie

Het aantal primaire deeltjes die onder een hoek θ inslaan is bij benadering evenredig met $\sin \theta \cdot \cos^9 \theta$. De hoek van inslag die het vaakst voorkomt is de hoek θ waarvoor $\sin \theta \cdot \cos^9 \theta$ maximaal is. Dat is ongeveer bij $\theta = 18^\circ$. De gemiddelde inslaghoek bedraagt ongeveer 22° . We bekijken daarom $\rho(r, \theta)$ voor het geval $\theta \approx 20^\circ$. Voor die inslaghoek is.

$$\rho(r) = \frac{E}{1,85 \cdot 10^{14}} \cdot f(r) \quad (3.44)$$

waarbij

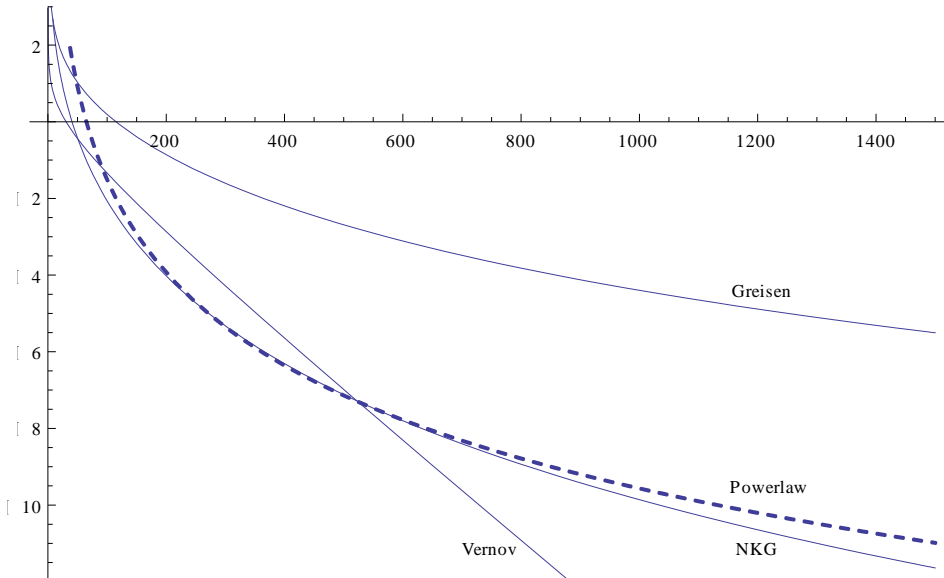
$$f(r) = \left(\frac{r}{92}\right)^{-1,2} \cdot \left(1 + \frac{r}{92}\right)^{-2,66} \cdot \left(1 + \left(\frac{r}{1000}\right)^2\right)^{-0,6} \quad (3.45)$$

de laterale distributiefunctie voor muonen is. Deze distributiefunctie is geïnspireerd door de zogenaamde NKG-formule (Nishima-Kamata-Greisen). In de literatuur duiken ook twee andere laterale distributiefuncties voor muonen op; die van Greisen:

$$f(r) : \left(\frac{r}{320}\right)^{-0,75} \left(1 + \frac{r}{320}\right)^{-2,5} \quad (3.46)$$

en die van Vernov:

$$f(r) : \left(\frac{r}{80} \right)^{-0.40} \cdot e^{-\frac{r}{80}} \quad (3.47)$$



Figuur 3.24: De 'log-plots' van de grafieken van laterale distributiefuncties

In Figuur 3.24 zijn van deze functies $\ln f$ uitgezet tegen r . Natuurlijk kan door vermenigvuldiging met een constante elke curve in Figuur 3.29 nog omhoog of omlaag worden verschoven. Desondanks zal voor grote r de grafiek van Greisen boven die van NKG liggen en die van Vernov eronder. De grafieken van de functies van Greisen, Vernov en NKG verschillen behoorlijk van elkaar. In Figuur 3.24 is tevens de grafiek getekend, aangeduid als Powerlaw, die hoort bij een distributiefunctie die verloopt volgens een machtsfunctie:

$$f(r) : \left(\frac{65}{r} \right)^{3.5} \quad (3.48)$$

Het gebruik van deze machtsfunctie heeft het voordeel dat de coördinaten van de twee mogelijke inslagpunten niet via een numerieke benaderingsmethode hoeven te worden bepaald, maar berekend kunnen worden met een directe formule zoals beschreven in sectie 3.3.4.

3.3.9 Conclusie

De meetwaarden van drie meetstations leiden in het algemeen tot twee mogelijke inslagpunten. Deze zijn aan elkaar gerelateerd via een enigszins onzuivere cirkelinversie. Op basis daarvan kunnen de mogelijke inslagpunten eenvoudig numeriek worden bepaald.

Een probleem is dat ten gevolge van meetonauwkeurigheden, de meetwaarden strijdig kunnen zijn. Er worden dan geen oplossingen gevonden. Dat valt zonnig te repareren door de meetwaarden een kleine 'correctie' te geven zodanig dat er wel een oplossing ontstaat.

Een ander probleem is dat er criteria nodig zijn om te besluiten welke van de twee oplossingen het 'echte' inslagpunt is. Dergelijke criteria moeten gezocht worden in de vorm van het showerfront, de 'pancake'. Daarvoor is inzicht nodig in de ontwikkeling van het longitudinale showerprofiel. Dat laatste zal dan ook een belangrijke plaats innemen in mijn onderzoek gedurende het komende schooljaar.

3.4 Data analyse cluster Nijmegen

*“Dinge sind die mit Vorstellungsbildern,
als mit ihren Ursachen, verbundenen
Sensationen unsrer Sinne”*

- Constantin Brunner(1862-1937).

*“Everything should be made as simple as
possible, but no simpler”*

- Albert Einstein.



Figuur 3.25: Frans Marcelis - Dr. Moller College Waalwijk [32] -

Frans Marcelis is in 1979 afgestudeerd in de vakgroep theoretische kernfysica van de TUE (Technische Universiteit Eindhoven) en is docent natuurkunde aan het Dr. Moller College te Waalwijk sinds 1982.

3.4.1 Onderzoeksopdracht

Het analyseren van meetresultaten vanaf 2002 van de meetstations van NAHSA (Nijmegen Area High School Array) in het kader van het project HiSPARC (High School Project on Astrophysics Research with Cosmics). Het nauwkeurig bepalen van de energie van een kosmische stralingsdeeltje uit deze metingen.

3.4.2 Introductie

Ter analyse van de meetresultaten is automatische verwerking van meetresultaten noodzakelijk. In Nijmegen wordt daartoe gebruik gemaakt van het dataverwerkingsprogramma ROOT [33] dat ontwikkeld is op onderzoeksinstituut CERN. Het is geschreven in de taal C++. Specifieke scripts kunnen met behulp van de CINT interpreter getest en eventueel daarna toegepast worden. Programma's kunnen ook eerst gecompileerd worden alvorens toe te passen.

De data van detectiestations van het Nijmegen-cluster zijn opgeslagen in tekstbestanden. Deze zijn de discrete gesampled waarden van de analoge signalen die de fotobuizen aan de 2 scintillatorplaten afgeven als er door beide platen vrijwel tegelijk een deeltjesfront (airshower) passeert.

De grootste waarde van de afgegeven spanning kan uit de tekstbestanden bepaald worden en ook de breedte van de grootste spanningspiek.

Van grote aantallen van deze maxima kan een histogram gemaakt worden die weergeeft hoe de verdeling is over de piekwaarden, die een maat zijn voor de afgegeven energie van de passerende deeltjes uit het deeltjesfront.

Door van een theoretische Landauverdeling de parameters zo nauwkeurig mogelijk aan te passen aan de gemeten verdeling kan bepaald worden welke waarde van de afgegeven energie het meest waarschijnlijk is (de Most Probable Value = MPV). Daaruit is gebleken dat er naast deze meest waarschijnlijke waarde nog een relatief maximum optreedt bij tweemaal de MPV-waarde.

Met de Nishimura-Katama-Greisen functie [34] kan de laterale deeltjesdichtheidsverdeling S berekend worden als functie van de afstand r tot de showerkern:

$$S(r) = k \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\alpha} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{-(\alpha-\eta)} \quad (3.49)$$

In het AGASA project worden gebruikt: $\alpha = 1,2$ en $\eta = 3,97 - 1,79(1/\cos(\theta) - 1)$. Voor r_0 (de zgn. Molièrestraal) wordt 92 m gebruikt. De parameter η is afhankelijk van de richting θ van het primaire deeltje. Deze richting kan bepaald worden bij een 3-voudige coïncidentie van signalen van 3 stations. Dit is gedaan voor een aantal jaren vanaf 2004 voor het cluster Nijmegen en wordt in sectie 3.3.12 beschreven in het LIO rapport uit 2009.

Met de waarden van het AGASA project kan de energie E (in eV) van het primaire deeltje berekend worden met:

$$E = 2,15 \cdot 10^{17} \cdot S(600)^{1,015} \quad (3.50)$$

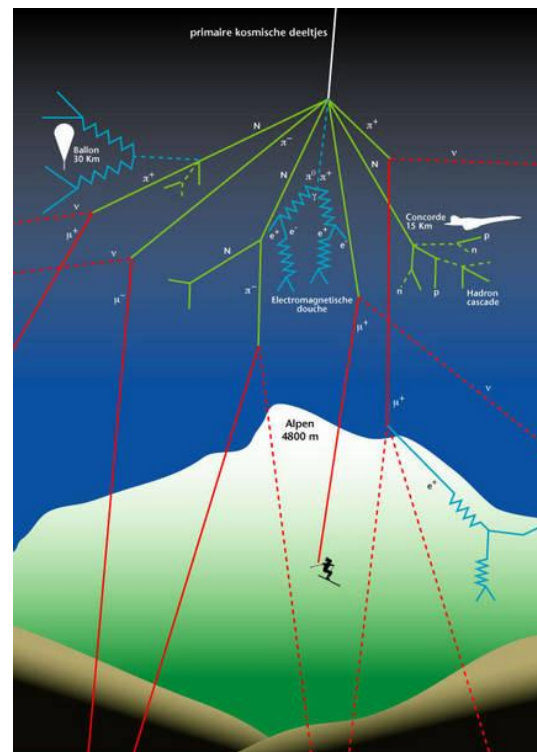
3.4.3 Wat wordt er gemeten en hoe?

Een hoogenergetisch deeltje dat uit de ruimte de atmosfeer binnendringt, het primaire kosmische deeltje, botst met atmosferische deeltjes. De energie die vrijkomt wordt omgezet in een lawine van secundaire deeltjes. Een aantal van deze deeltjes is niet stabiel en vervalt weer naar andere deeltjes (Figuur 3.26).

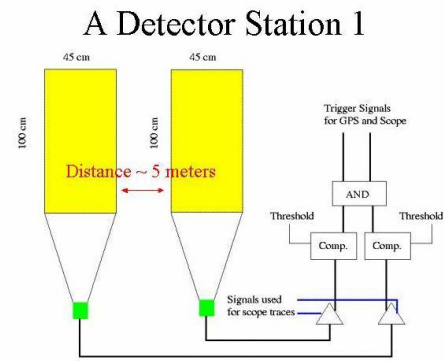
Een detectiestation op het aardoppervlak vangt hiervan hoofdzakelijk de overblijvende muonen en elektronen op.

Het detectiestation bestaat uit 2 platen van materiaal dat de energie van de afremmende muonen (en elektronen) omzet in kleine lichtpulsjes die in een photomultiplierbuis (PMT) terechtkomen (Figuur 3.27).

Als van de twee scintillatieplaten, die ongeveer 5 m uit elkaar liggen tegelijkertijd (binnen 1 μ s) een puls wordt geregistreerd, is dat een aanwijzing voor het optreden van een lawinefront en worden de signalen opgeslagen.

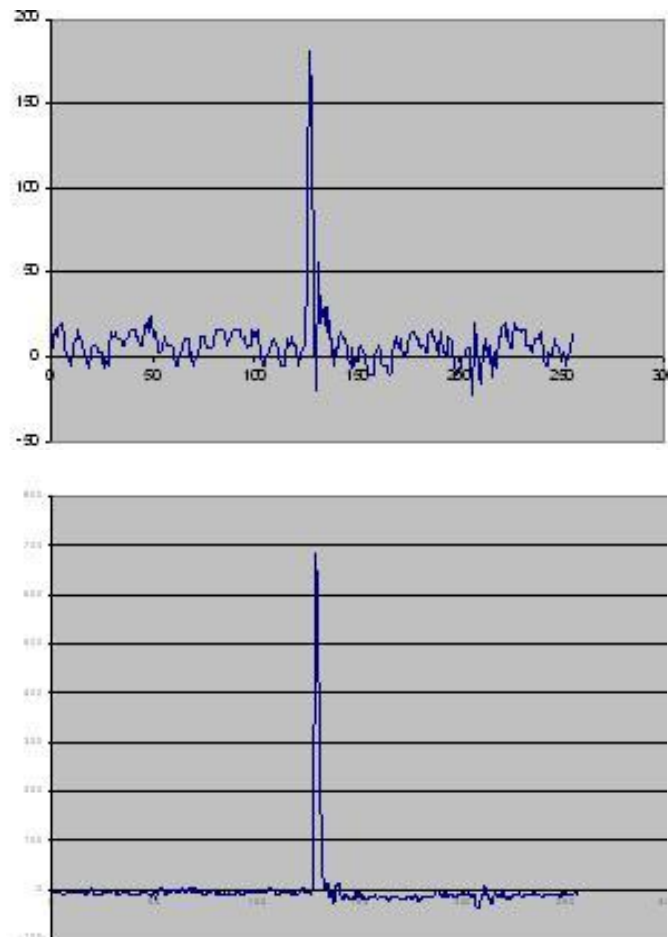


Figuur 3.26: Artist's view kosmische



Figuur 3.27: Een HiSPARC detectiestation met twee scintillatoren (links); het lichtsignaal wordt omgezet in een elektrisch signaal dat vervolgens gedigitaliseerd wordt en van een tijdstempel voorzien (rechts).

De spanning-tijd signalen (traces, zie Figuur 3.28) worden gesampled en opgeslagen als discrete waarden in tekstfiles (Tabel 3.10).



Figuur 3.28: Twee deeltjes passeren binnen $1 \mu\text{s}$ ieder een scintillator. Het signaal boven laat zien dat het deeltje in de eerste plaat een veel kleiner signaal (minder licht) geproduceerd heeft dan het deeltje in de tweede scintillator (onder).

Deze data zijn ook te downloaden van de NAHSA-site [35]. De 1e regel bevat informatie betreffende de datum en tijd (Tabel 3.10, linker kolom); de 2e regel bevat een aantal systeeminstellingen zoals de triggervoorwaarden en vanaf de 3e regel staan de door de beide fotobuizen gegenereerde signalen (links en rechts resp.).

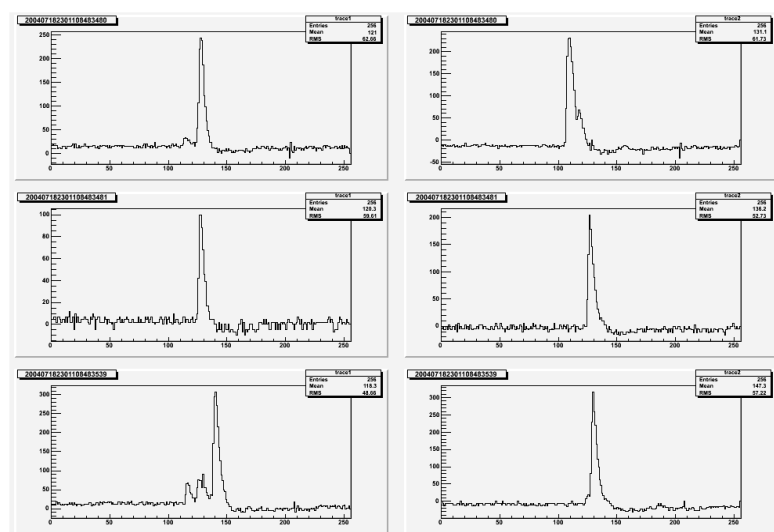
```

200401011146324915099
20 -128 10000 0.500
5 17 12 17 20 17 12 0 0 -5 2 10 10 17 7 5 2 -7
-5 2 7 7 5 2 2 -7 0 -5 7 15 12 15 10 10 7 7 10
12 17 17 17 12 12 7 7 15 20 15 24 12 15 7 2 5
5 12 7 7 7 5 -5 0 -5 7 7 10 10 0 2 -5 0 0 7 12
12 10 5 5 5 7 15 17 17 17 15 7 7 12 15 17 17
17 17 10 12 5 7 7 17 12 17 12 2 -5 -5 0 2 7 10
10 5 0 -5 -5 -5 10 7 12 7 7 -5 0 2 7 20 66 181
90 85 -20 54 27 20 29 15 29 2 10 -5 5 5 15 12
10 5 2 -7 5 -5 5 7 2 0 -7 -10 -10 -10 0 5 7
0 -5 -5 -5 -10 0 5 12 5 10 5 0 2 5 12 15 15 12
10 5 7 5 2 12 17 12 12 7 0 15 2 2 0 12 7 0 0
-10 -7 -5 0 2 5 5 -22 5 20 -7 -10 -15 2 10 0 7
-12 2 -7 12 12 17 20 12 17 5 7 20 17 17 17 15
17 7 7 2 5 10 10 10 15 2 -5 -5 2 0 2 10 7 2 0
2 -5 0 2 12 15
-7 -5 -7 -7 -10 -10 -7 -5 -5 -7 -5 -7 -7 -7 -7
-10 -5 -5 2 -5 -12 -12 -10 -12 -5 -5 -5 -7 -5
0 -12 -7 -10 -7 -7 -7 -7 -10 -10 -10 -10 -10 -
5 -5 -5 -5 -10 -15 0 -17 -10 0 0 0 -10 -7 0 -5
0 -5 -5 -5 2 -5 -5 0 2 -5 2 -5 -5 -7 -7 -12 -7
-5 -7 0 -7 -10 -5 -10 -12 -7 -10 -7 -10 -10 -7
-5 -7 -12 -7 -5 0 -7 0 -5 -7 -7 -7 -5 -5 -5 0
2 0 -5 -10 -10 -7 -7 -5 -5 -5 -7 -10 -5 -12 -5
0 2 -7 -7 -5 -12 193 674 562 208 103 5 2 12 -
15 -5 -27 7 12 -7 -20 -10 -12 -15 -20 -17 -17
-5 -17 -12 -20 -17 -20 -15 -15 -15 -12 -20 -15
-15 -17 -17 -22 -20 -15 -17 -15 -17 -20 -20 -
20 -17 -17 -15 -20 -12 -17 -22 -20 -17 -15 -17
-17 -15 -15 -12 0 -7 -12 -15 -7 -15 -10 -10 -
15 -15 -15 -10 -7 -12 -10 -7 -12 -15 -12 -34
-39 -22 -17 5 -5 -20 -22 -29 -7 -15 -10 -17 -
7 -17 -20 -17 -17 -10 -10 -10 -7 -15 -12 -10 -
10 -12 -12 -7 -12 -10 -12 -15 -12 -12 -10 -
10 -10 -10 -12 -10 -15 -5 -10 -12 -12 -10 -10
-5 -7 -12

```

Tabel 3.10: Het tekstbestand dat een coïncidentie beschrijft; de eerste twee regels geven algemene informatie over de gebeurtenis. De analoge pulsen zijn gesampled.

Ik heb voor verwerking in ROOT een script <MAAKSPOOR.C> gemaakt dat van meervoudige coïncidenties de tekstbestanden kan lezen en <TEKENHISTOS.C> dat de traces kan weergeven in één zogenaamd canvas dat te beschouwen is als een interactieve afbeelding waarin allerlei bewerkingen (uitvergroten, herscalen, functiefitten enz.) mogelijk zijn (zie Figuur 3.29).



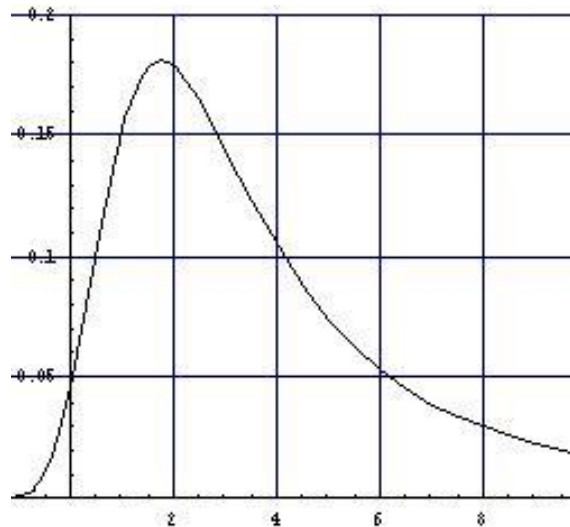
Figuur 3.29: M.b.v. ROOT worden de tekstfiles ingelezen van een coïncidentie tussen 2 of meer stations. Vervolgens kunnen deze gegevens bewerkt worden).

3.4.4 Energieverdeling

De Landauverdeling [36] is de waarschijnlijkheidsverdeling van de energie die de passerende deeltjes in de scintillatieplaat afgeven en luidt:

$$f(x) = \frac{1}{\pi\sigma} \int_0^{\infty} e^{-t \log t - (x-a)t/\sigma} \sin(\pi t) dt \quad (3.51)$$

Figuur 3.30 (gemaakt in Mathematica) toont de grafiek van deze verdeling met de verschuivingsparameter a gelijk aan 2. De meest waarschijnlijke waarde is gelijk aan $a - 0,22278$ en hier dus $2 - 0,22278 = 1,77722$. De parameter σ is hier gelijk aan 1.

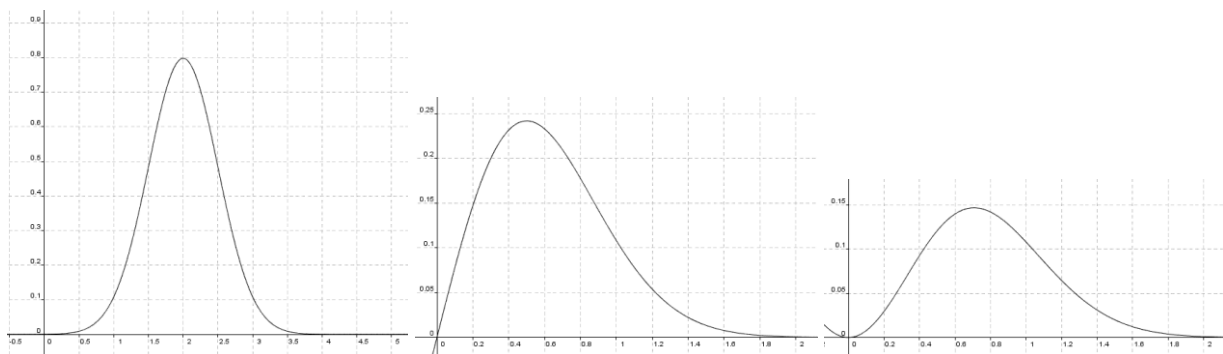


Figuur 3.30: Landauverdeling met $a = 2$ en $\sigma = 1$.

De halfwaardebreedte (FWHM = Full Width at Half Maximum) is $4,019 \sigma$. De piekhoogte van het signaal of de oppervlakte eronder is een maat voor de afgegeven energie. Er is gekozen voor de piekhoogte.

De piekhoogte en de pedestal (de gemiddelde waarde bij afwezigheid van signaalpiek) worden uit het signaal (tekstbestand) met een script bepaald. Het verschil (de gain) wordt in een histogram opgeslagen. De gemeten verdeling blijkt vaak aanmerkelijk af te wijken van deze vorm. Aanvankelijk werd een superpositie van twee van deze Landauverdelingen gebruikt om de meting te benaderen. Na weinig succesvolle pogingen is een Gauss- (of normale-)verdeling toegevoegd in superpositie aan de Landauverdeling (links in Figuur 3.31):

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.52)$$



Figuur 3.31: Van links naar rechts een Gaussverdeling met $\mu = 2$ en $\sigma = 0,5$, de functie $x \cdot g(x)$ (zie tekst) en $x^2 \cdot g(x)$.

Ook verdelingen van de vorm $x \cdot g(x)$ (met $\mu = 0$ en $\sigma = 0,5$) en $x^2 \cdot g(x)$ (met $\mu = 0$ en $\sigma = 0,5$) zijn uitgetoet en eveneens in Figuur 3.31 weergegeven.

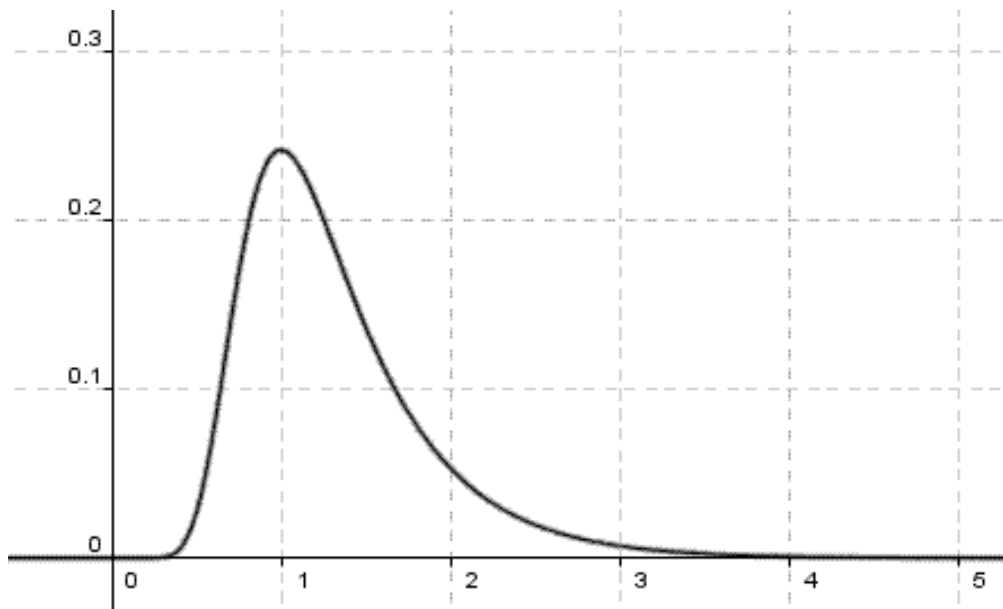
De Moyalverdeling [37] heeft de vorm:

$$M(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\lambda - \exp(-\lambda)}{2}} \quad (3.53)$$

met

$$\lambda = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.54)$$

De Moyalverdeling (Figuur 3.32) wordt ook gebruikt als benadering van de Landauverdeling.

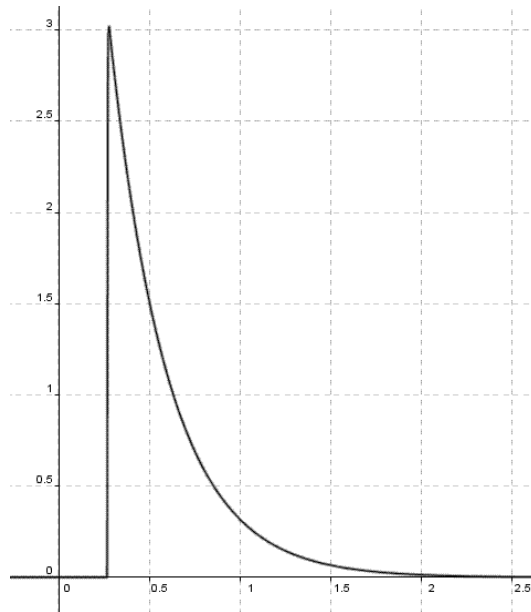


Figuur 3.32: Moyalverdeling met $\mu = 1$ en $\sigma = 0,25$ (grafiek gemaakt met GeoGebra).

Ik heb in plaats van één parameter σ de parameters σ_1 en σ_2 als onafhankelijke parameters gebruikt, zodat de staart rechts vooral bepaald wordt door σ_1 en de helling links vooral bepaald wordt door σ_2 :

$$M^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\frac{x-\mu}{\sigma_1} - e^{-\frac{x-\mu}{\sigma_2}}}{2}} \quad (3.55)$$

Deze aangepaste Moyalverdeling blijkt de beste resultaten te geven in combinatie met een convolutie (zie sectie 3.4.9) van deze superpositie en een Gaussfunctie. Een resultaat van een fit aan het signaal uit plaat 2 van detectiestation 7 (Montessori College Nijmegen) is weergegeven in Figuur 3.33. Door gebruik te maken van de convolutie wordt de scherpe piek afgerond.

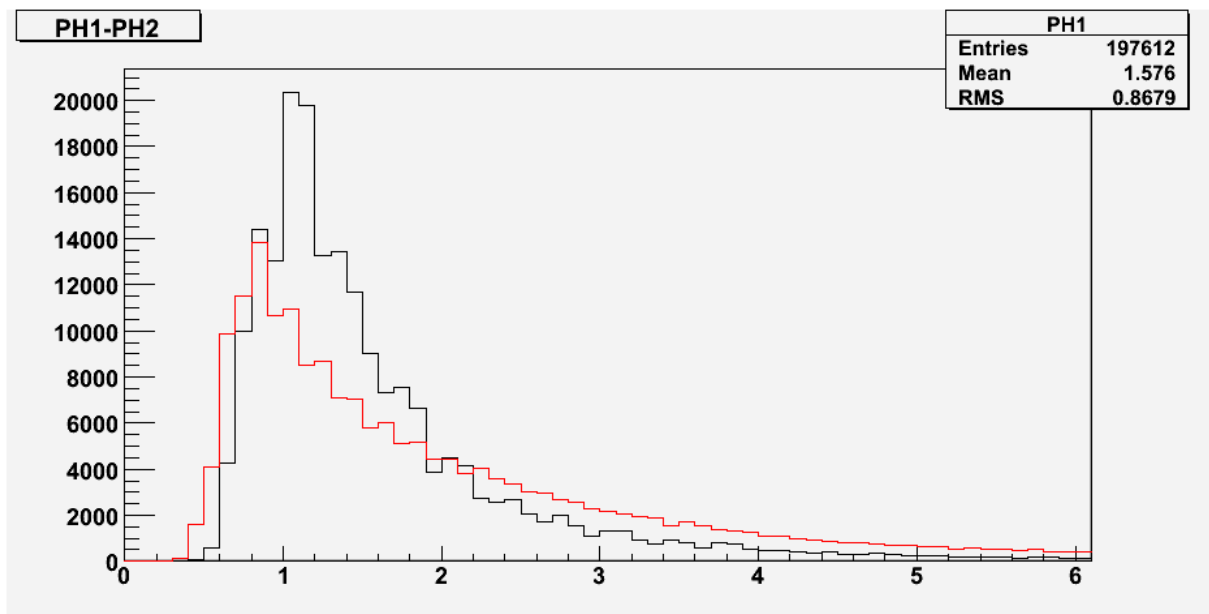


Figuur 3.33: Aangepaste Moyalverdeling 7.78 . $M^*(x)$ met $\mu = 0,27$, $\sigma_1 = 0,16$ en $\sigma_2 = 0,0013$.

3.4.5 Histogrammen maken

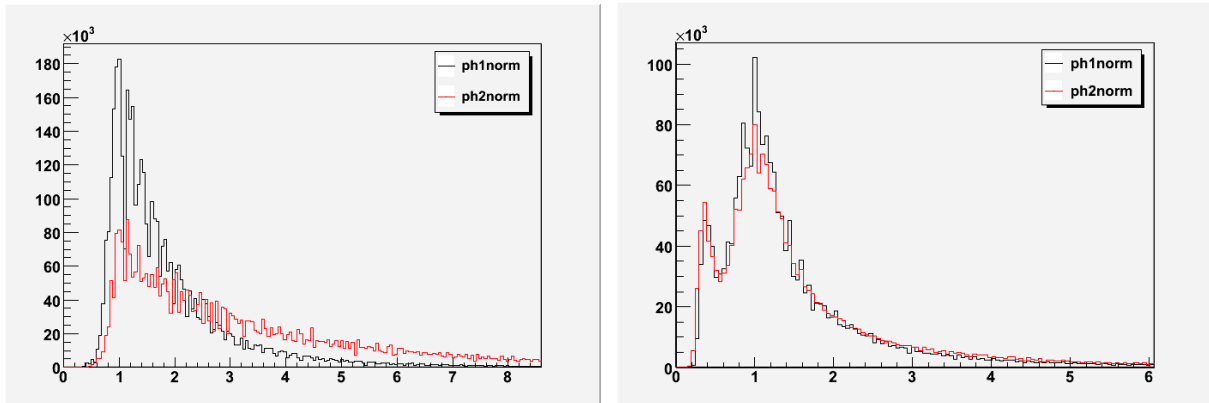
In het verslag van Teun van Heesch en Sjaak Wolst [38] wordt in sectie 3.3.4 beschreven dat van deze signalen met programma's <STATHIST.C> en <TEXTHIST.C> histogrammen zijn gemaakt die opgeslagen worden in ROOT-files. In 3.3.5 staat beschreven dat de MPV-waarden per dag zijn bepaald van de histogrammen door middel van een fit met een Landauverdeling. Van deze MPV-waarden is aanvankelijk gebruik gemaakt om de pulshoogte in de histogrammen te normeren op een MPV-waarde 1.

Deze procedure levert een typisch histogram op zoals in Figuur 3.34. Hier is ph1norm de pulshoogte van plaat 1 na normering op MPV-waarde 1, en ph2norm idem maar dan voor plaat 2.



Figuur 3.34: Histogram van detector 3 (Stedelijk Gymnasium Nijmegen) van januari 2004.

De pieken van de histogrammen blijken niet goed bij de waarde 1 uit te komen. Vervolgens is met script <mpvmaxbin.c> de bin-waarde bepaald met de grootste bin-inhoud. Nu is deze waarde gebruikt om de pulshoogte te normeren. Dit levert een typische histogrammen zoals in Figuur 3.35 te zien is. Ook nu is de piekwaarde vaak niet bij de 1 te vinden.

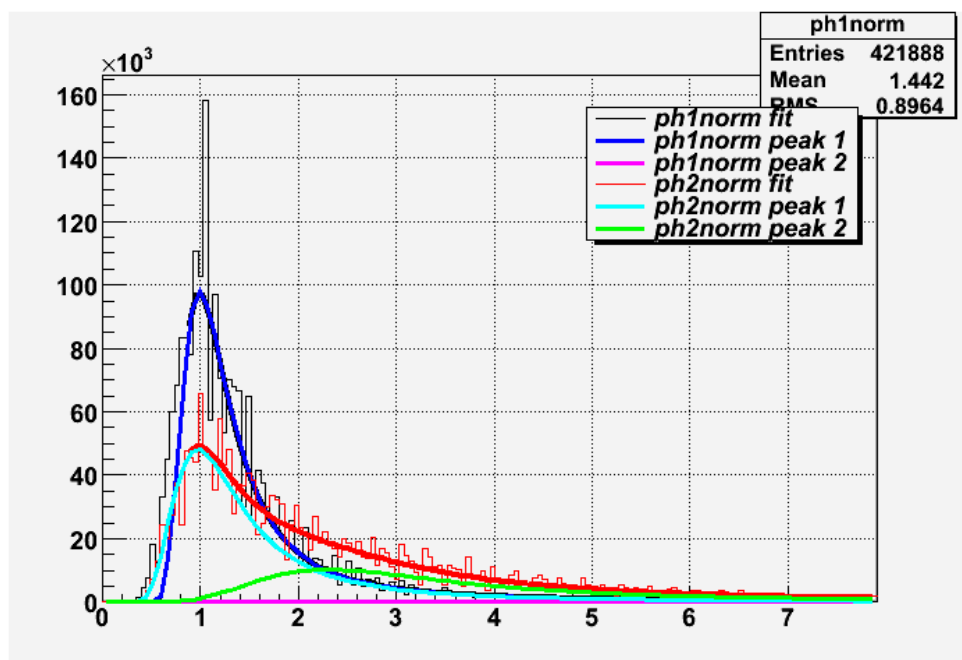


Figuur 3.35: Detector 3 (Stedelijk Gymnasium Nijmegen – links -) en detector 7 (Montessori College Nijmegen – rechts -), beiden uit 2004.

Om de normering goed te krijgen moet een betere fit verkregen worden die de MPV van de Landauverdeling zo goed mogelijk vastlegt.

3.4.6 Fitten

De vorm van het histogram deed in eerste instantie vermoeden dat er sprake was van twee Landaupeken. Met script <fitph.c> is een poging gedaan een superpositie van 2 Landauverdelingen te fitten aan het histogram (Figuur 3.36).



Figuur 3.36: Detector 3 (Stedelijk Gymnasium Nijmegen) van 2006 met fit van dubbele Landauverdeling.

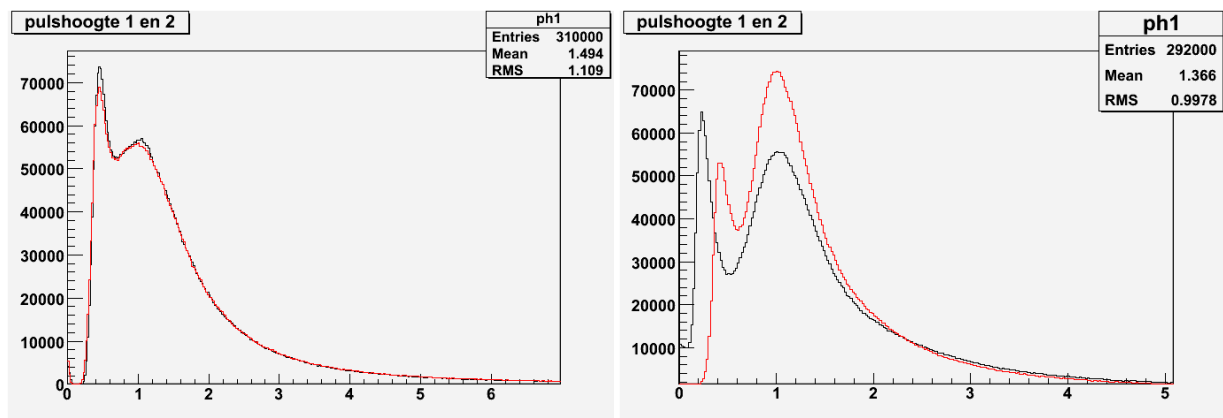
In deze figuur is *ph1norm fit*, van plaat 1, de superpositie van 2 Landauverdelingen (in zwart) en de 2 samenstellende Landauverdelingen heten *ph1norm peak 1* (blauw) en *ph1norm peak2* (magenta). Voor plaat 2 *ph2norm fit* (rood), *ph2norm peak 1* (cyan – lichtblauw -) en *ph2norm peak2* (groen). De tweede lagere piek blijkt niet consequent op de verwachte waarde bij 2 op te treden en levert geen consistente verbetering van de fitresultaten op.

3.4.7 Histogrammen maken met verbeterde MPV-waarde

Verbeteringen:

- Door de bins enigszins Gaussisch uit te smeren is het histogram gladder gemaakt. Hiervoor moeten nieuwe ROOT-files gemaakt worden.
- Van elke dag is nu de beschikking over een histogram, waar nu een functiefit aan gedaan kan worden met een superpositie van een Gaussverdeling en een Landauverdeling. Dit idee is geopperd door Bob van Eijk tijdens de LIO-bijeenkomst van 7 december 2009 in Utrecht. De week erna kwam Charles Timmermans met dezelfde suggestie.
- Met de MPV-waarde die de functiefit oplevert kan van elke dag het histogram genormeerd worden op MPV-waarde 1.
- Vervolgens kunnen de histogrammen over langere periode betrouwbaarder opgeteld worden.

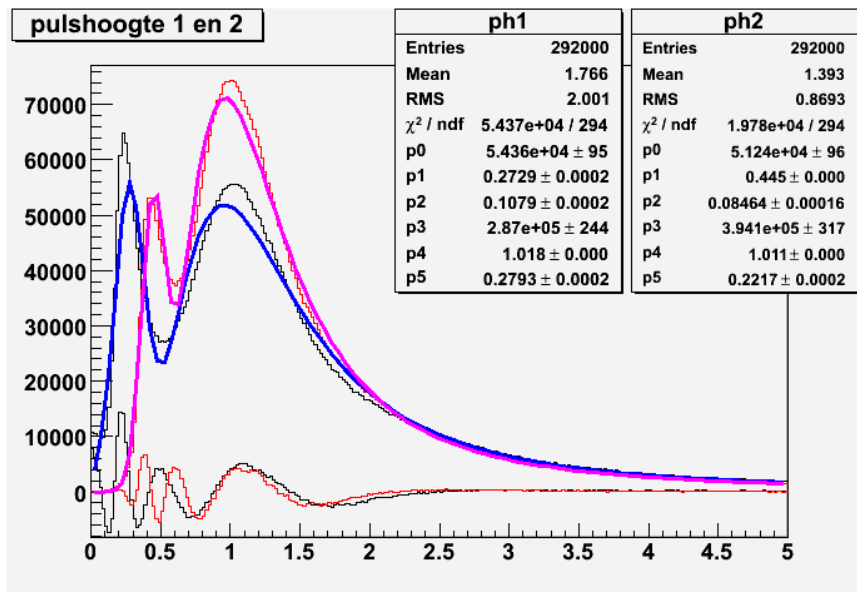
Achteraf is duidelijk waarom de eerdere MPV-bepaling vaak verkeerd gaat. De fit verwacht nogal eens de twee relatieve maxima van de Gausspiek en de Landaupiek. Een aanpassing van de startparameters is dan nodig. Dit is vaak het gevolg van een verandering van de instelling van detector (Figuur 3.37).



Figuur 3.37: Detector 4 (Dominicus College Nijmegen – links -) en detector 5 (Kandinsky College Nijmegen – rechts -), beiden uit 2004.

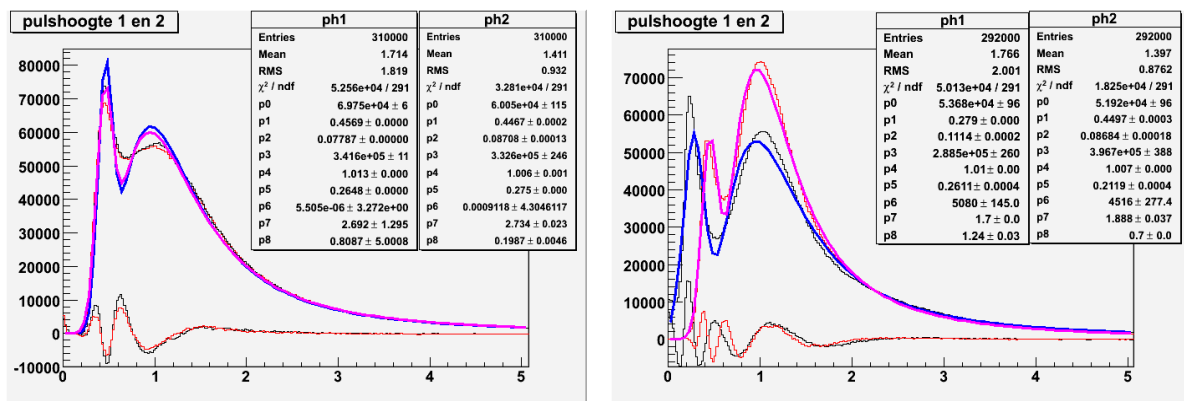
3.4.8 Fitten met verbeterde MPV-waarde

Over een periode van een jaar kan het verkregen histogram opnieuw onderworpen worden aan een 6-parameter fit met een superpositie van een Gaussverdeling en een Landauverdeling. (Figuur 3.38).



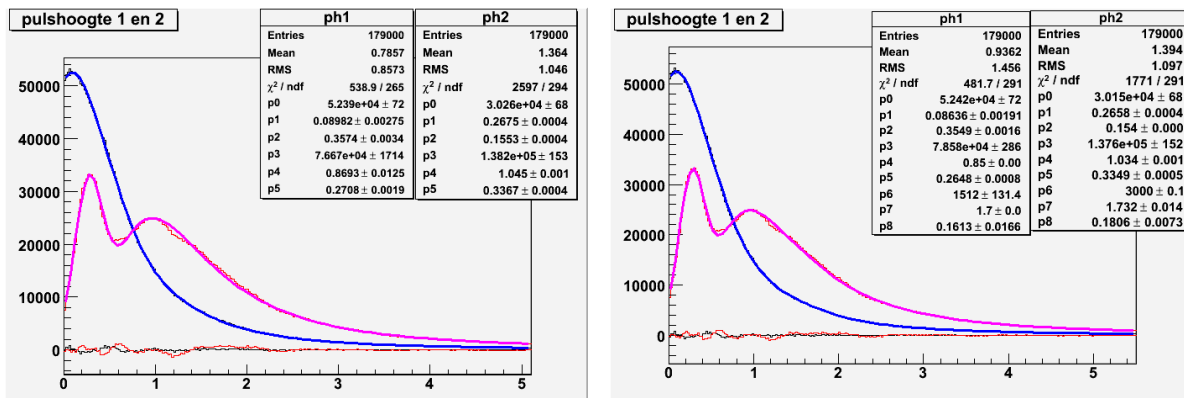
Figuur 3.38: Fit aan pulshoogte histogram van detector 5 (Kandinsky College Nijmegen).

Ook een 9-parameter fit met een superpositie van een Gaussverdeling en twee Landauverdelingen convergeert (Figuur 3.39).



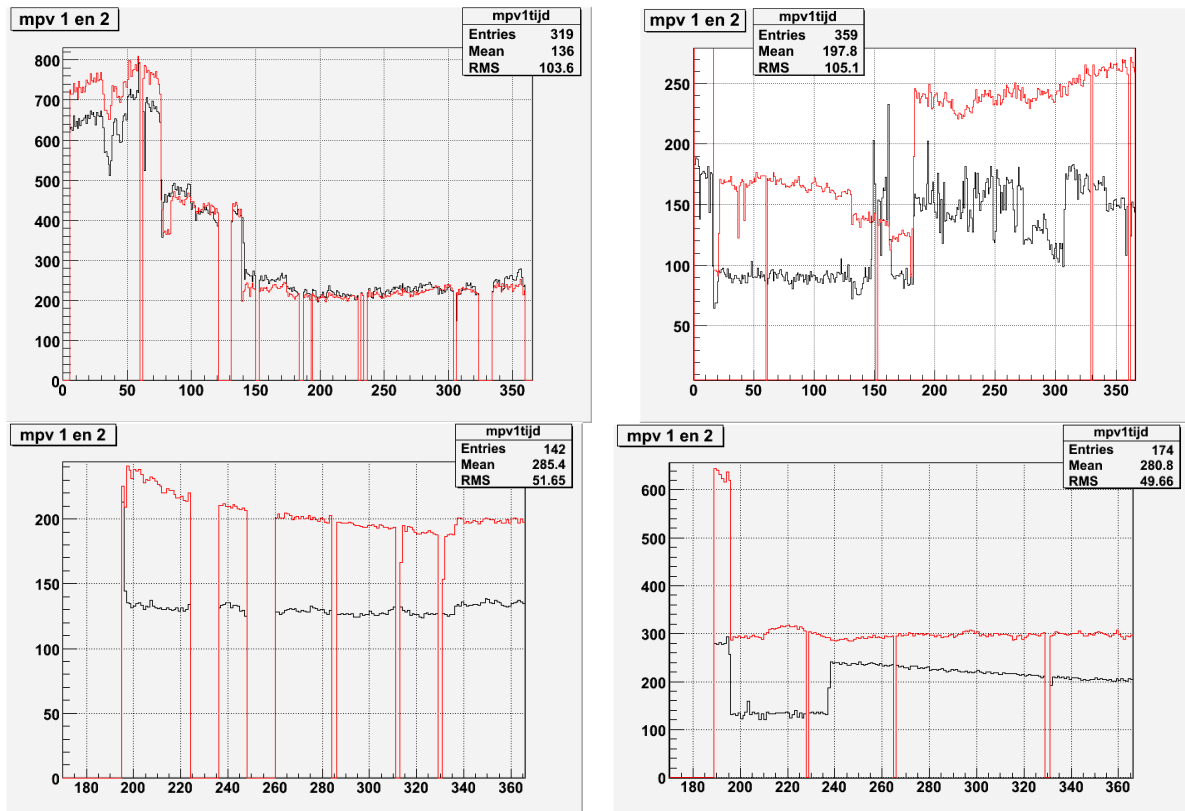
Figuur 3.39: 9-parameter fit aan data uit 2004 van detectors 4 (links) en 5 (rechts).

Bij het maken van de nieuwe ROOT-files is een fout gemaakt bij het bepalen van de pedestal (Figuur 3.40, links). Van detectiestations 1, 2 (Figuur 3.40, rechts), 6 en 7 zijn inmiddels verbeterde versies beschikbaar.



Figuur 3.40: Oude fit aan data van detector 2 (links) en rechts met correcte pedestal verwerking.

De MPV-waarden die de fits uit de daghistogrammen hebben opgeleverd, zijn voor detectiestations 1, 2, 6 en 7 weergegeven in Figuur 3.41. De dagen waarop geen daghistogram beschikbaar is, hebben de waarde 0.

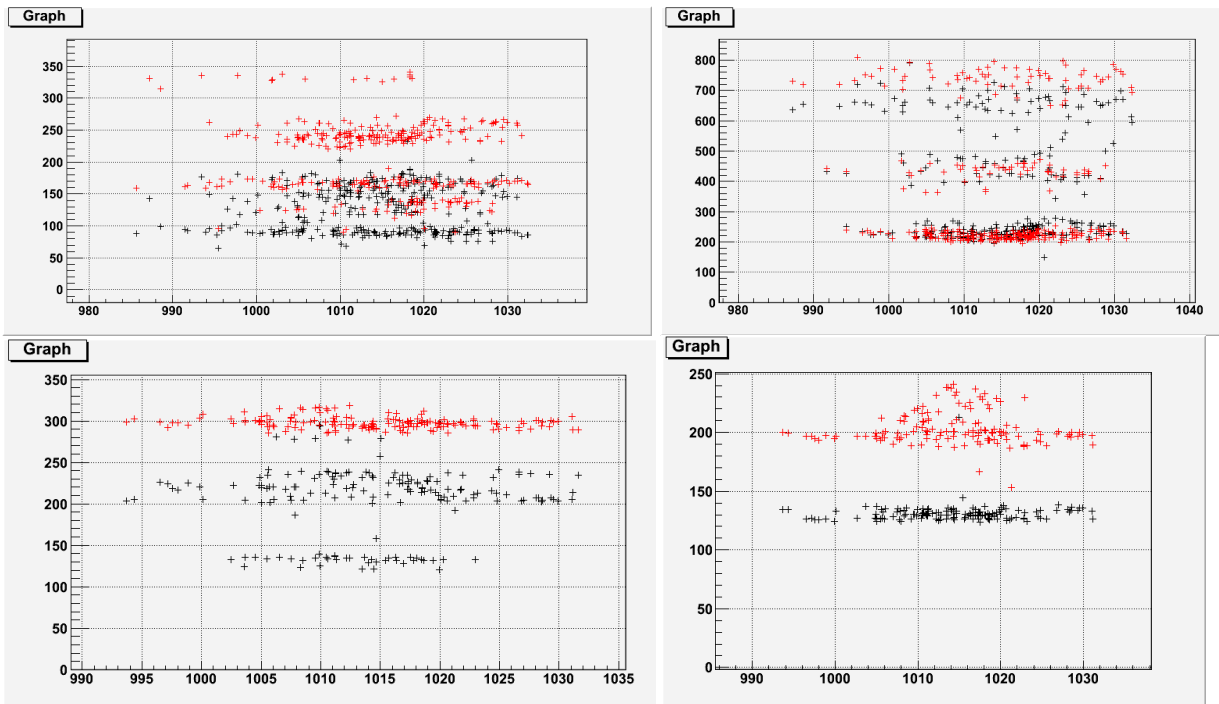


Figuur 3.41: MPV waarden over 2004 voor de detectiestations (vanaf links boven met de klok mee) 1, 2, 6 en 7.

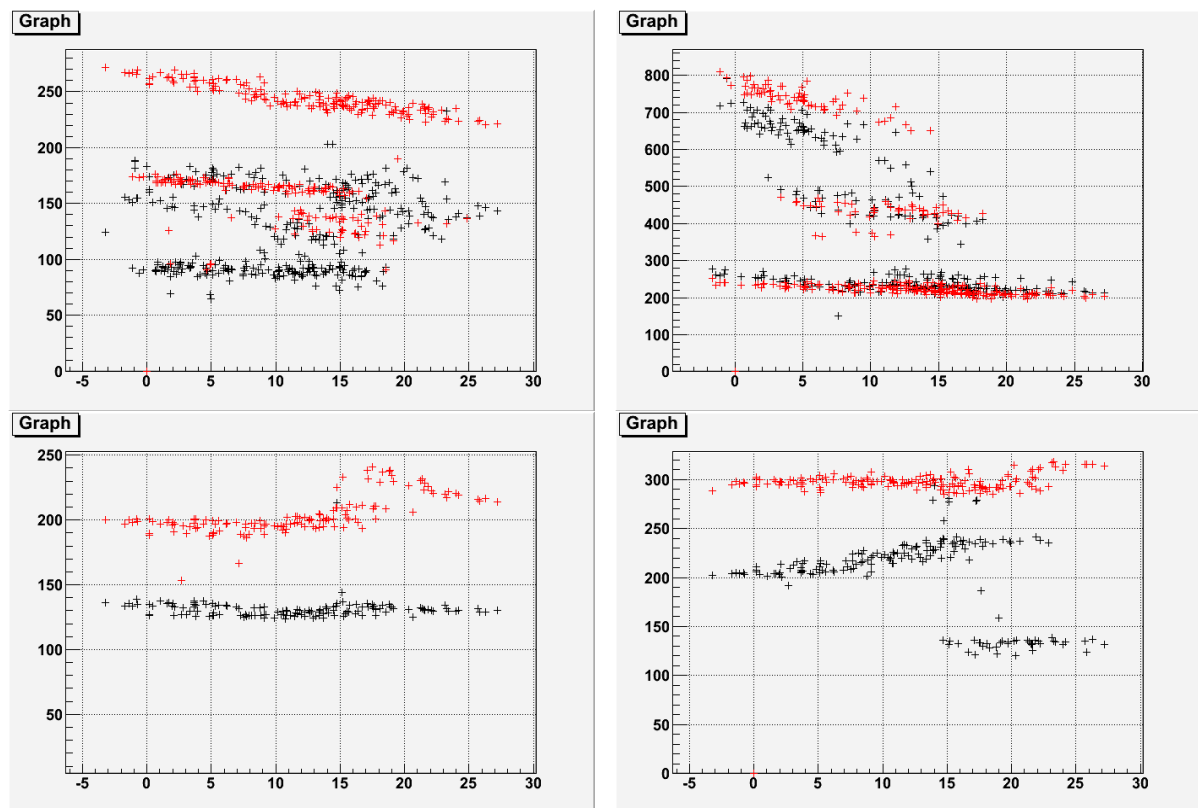
De dag-tot-dag variatie, vooral bij plaat 1 (zwart) van detectiestation 1, is veel groter dan bij de andere drie detectiestations. De wat grotere fluctuaties bij detector 2 vertonen een zekere correlatie tussen beide platen. Behalve de trend in een van de platen, lijkt bij detector 6 en 7 de variatie zo gering dat deze nadert tot de nauwkeurigheid van de fitprocedure. De soms abrupte veranderingen zijn waarschijnlijk toe te schrijven aan het veranderen van de instellingen.

In Figuur 3.42 is weergegeven hoe de MPV waarde afhangt van de gemiddelde luchtdruk van die dag over het jaar 2004. De MPV-waarden lijken niet afhankelijk te zijn van de luchtdruk.

In Figuur 3.43 is weergegeven hoe de MPV per dag afhangt van de gemiddelde temperatuur van die dag voor het jaar 2004. De MPV-waarden van detectiestations 1 en 2 lijken een afnemende MPV-waarde bij hogere temperatuur te laten zien. Ik neem aan dat de stijgende trend bij plaat 1 (zwart) van detector 6 eerder een verschijnsel in de tijd is (vanaf ongeveer dag 240) dan in de temperatuur (er is slechts gemeten in de tweede helft van het jaar).



Figuur 3.42: Gemiddelde MPV waarde (mV) en luchtdruk (hPa) over 2004 voor de detectiestations (vanaf links boven met de klok mee) 1, 2, 6 en 7.



Figuur 3.43: Gemiddelde MPV waarde (mV) en temperatuur ($^{\circ}$ C) over 2004 voor de detectiestations (vanaf links boven met de klok mee) 1, 2, 6 en 7.

3.4.9 Fitten met convolutie

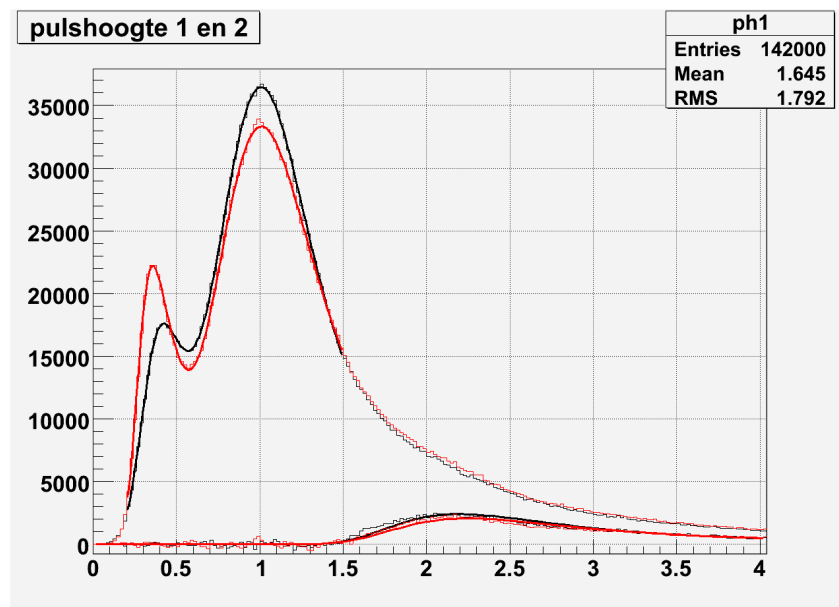
Tenslotte is een verbetering gezocht in het gebruik van een convolutie $f * g$ van de verdelingsfunctie f met een Gaussfunctie g . De convolutie-integraal van 2 functies f en g luidt:

$$(f * g)(x) = \int f(x - y)g(y)dy \quad (3.56)$$

Numeriek komt dit neer op een som:

$$(f * g)(x) = \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} f(x - i)g(i) \quad (3.57)$$

Er geldt o. a. $f * g = g * f$. Een fraaie applet maakt duidelijk wat de uitwerking van een convolutie is [39]. Het script <langaufun> dat de convolutie berekend staat in Appendix B. In Figuur 3.44 is het resultaat van de fit aan de data van detectiestation 7 over 2004 weergegeven. De fitparameters voor de data van deze detector zijn te vinden in Appendix C.

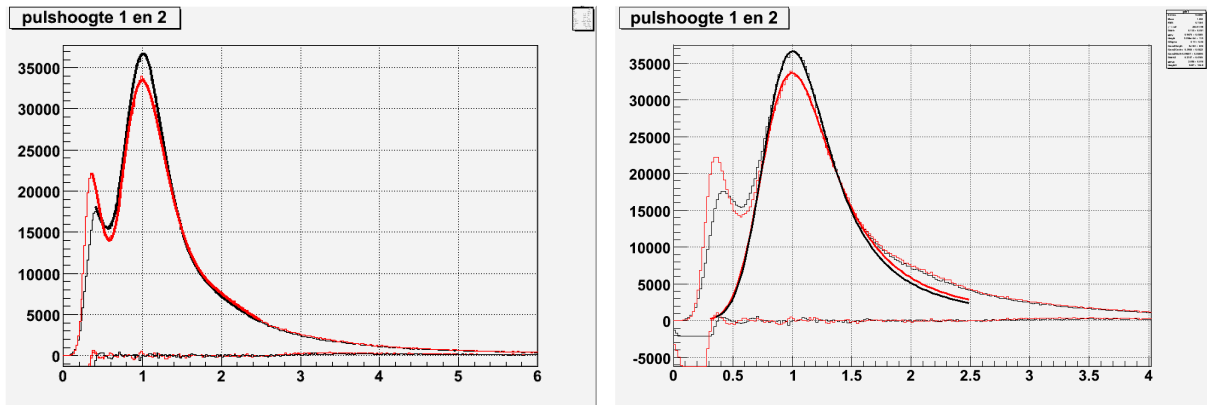


Figuur 3.44: Convolutiefit aan MPV-data van station 7 over 2004.

Deze fit is echter verkregen met een verkeerde functie f door een programmeerfout. In de rechterhelft van de convolutieberekening is het deel $f * g$ dat de Gausspiek moet toevoegen vergeten. Met de juiste functie met twee Landaufuncties verkrijgen we linker grafiek in Figuur 3.45. Rechts in deze figuur zien we van de fit uitsluitend de 1-muon Landaufunctie met de gevonden parameters van deze 10-parameterfit. Vreemd genoeg lukt het niet om de fit vanaf 0 goed te krijgen. Schijnbaar is de overlap met de Gausspiek verstorend en was het missen van de rechterflank bij de programmeerfout daarvoor juist gunstig. Dit kan er ook op wijzen dat de piek niet de symmetrische vorm van de Gaussverdeling heeft.

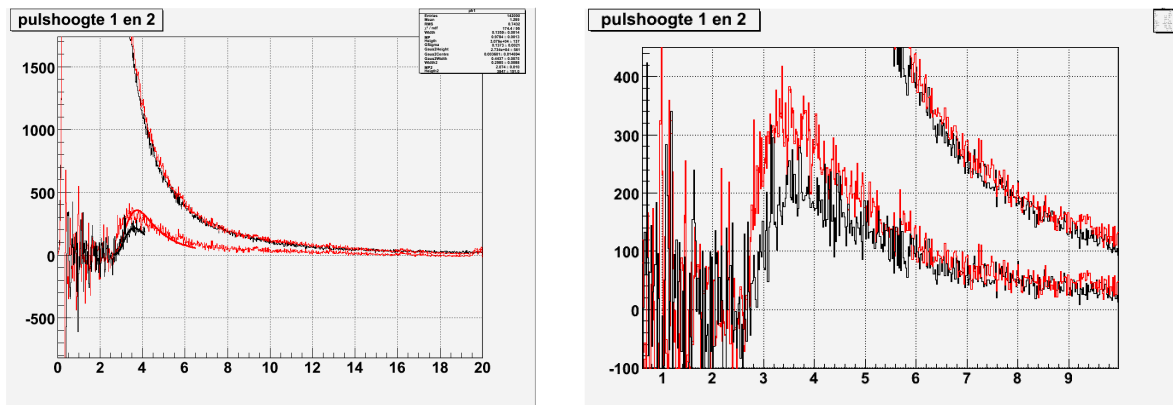
Maar aan de andere kant gebeurt er wel iets opmerkelijks. Inzoomen op het gebied rond de 3 – 4 MPV, en vervolgens het verschil nemen tussen de linker fit in Figuur 3.45 en de experimentele data,

leidt tot de grafieken in Figuur 3.46.

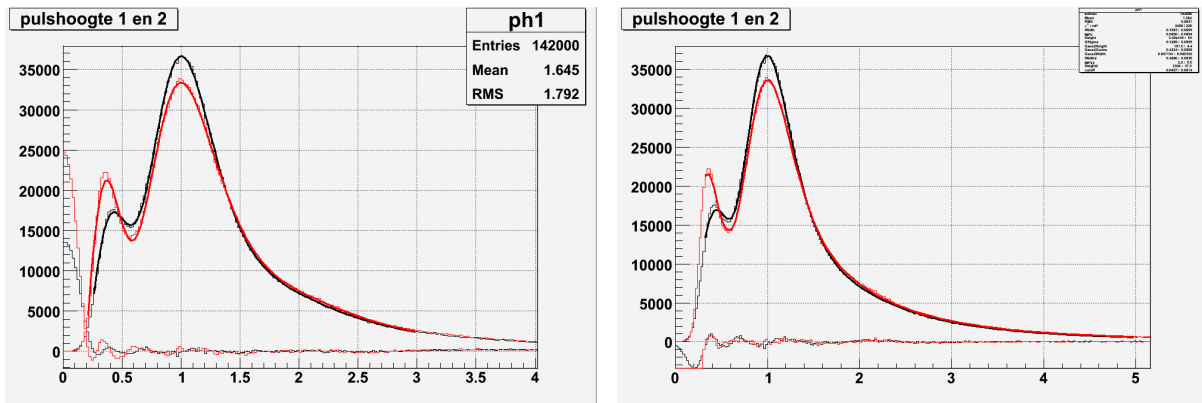


Figuur 3.45: Convolutiefit aan MPV-data van station 7 over 2004 met links 2 Landauverdelingen en rechts alleen een Landauverdeling rond de 1-muonpiek.

Het lijkt erop dat de relatief kleine aantallen een duidelijke verdeling laten zien met een maximum van ongeveer 200 tot 300 dat bereikt wordt tussen 3 en 4. Dat betekent weer ongeveer 10 % van de 2-muonpiek die zelf weer ongeveer 10 % van de 1-muonpiek bedraagt. Andere detectiestations laten in 2004 zo'n resultaat nauwelijks zien dus blijft de vraag of het echt significant is.



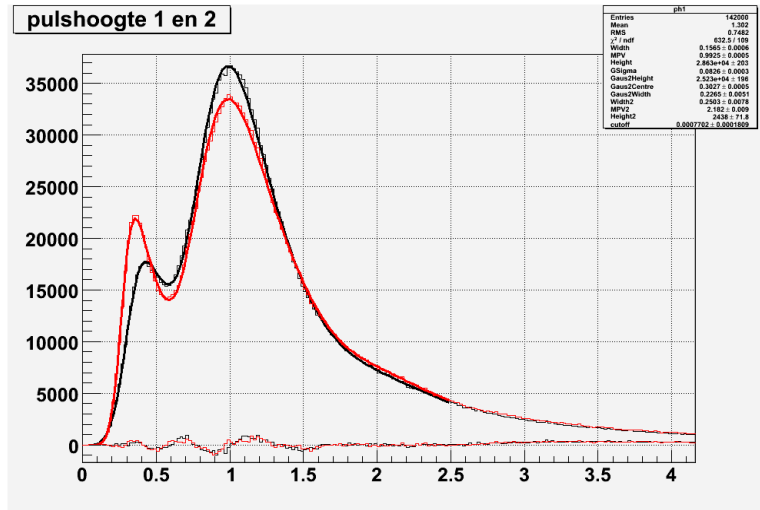
Figuur 3.46: Uitvergrotingen van het verschil tussen MPV-data en de 2-Landau convolutiefit aan de MPV-data van station 7 over 2004.



Figuur 3.47: Convolutiefits aan de MPV-data van station 7 over 2004 met asymmetrische Gaussverdelingen: $x \cdot g(x)$ (links) en $x^2 \cdot g(x)$ (rechts).

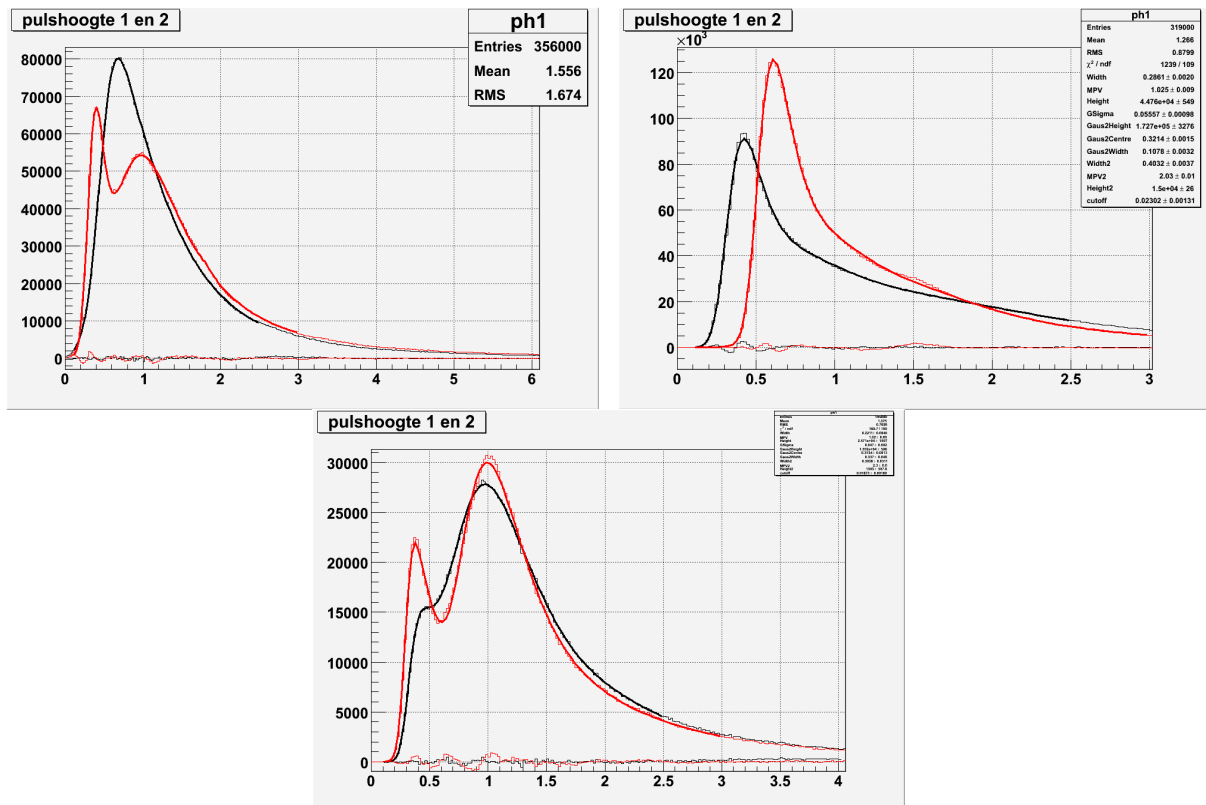
Teneinde de linkerkant toch weer in het gareel te krijgen is gezocht naar een asymmetrische variant van de Gaussverdeling (Figuur 3.47).

Het beste resultaat wordt verkregen met de aangepaste Moyalverdeling (zie sectie 3.4.4). De grafiek in Figuur 3.33 laat de aangepaste Moyalverdeling zien voor plaat 2 van station 7. De Gaussfunctie in de convolutie heeft voor de parameter σ de waarde $\sigma = 0,058$ en levert dus een aanmerkelijke bijdrage aan de breedte van de eerste piek in Figuur 3.48.



Figuur 3.48: Fit met aangepaste Moyalverdeling aan MPV-waarden van scintillator-2 van station 7 over 2004.

In Figuur 3.49 zijn de fits weergegeven aan de data van de stations 1 (links boven), 2 en 6 resp.



Figuur 3.49: Convolutiefits aan de MPV-data van station 1 (linksboven), 2 en 6 over 2004.

De afwijkingen voor deze 4 detectiestations zijn kleiner dan 2 à 3 % voor het gehele bereik van de energieverdeling. Bij detector 1 is de hoogte van de 2-muonpiek verwaarloosbaar klein. Bij detector 2 is de hoogte van de 2-muonpiek 45 % van de 1-muonpiek bij plaat 1 (zwart). Dat lijkt niet realistisch. In de andere gevallen (5 van de 8) varieert de piekhoogte van de 2-muonpiek tussen 5 en 15 % van de piekhoogte van de 1-muonpiek.

Behalve plaat 2 (rood) van detector 2, waar signaalwaarden kleiner dan $0,3 * MPV$ ontbreken, geldt voor alle detectiestations dat de signaalwaarden van minder dan ongeveer $0,15 * MPV$ vrijwel niet voorkomen. Dit zal de triggerwaarde voorstellen waaronder geen meting wordt geregistreerd. Wellicht kan dit nog bevestigd worden als inderdaad bekend is of deze triggerwaarde voor plaat 2 van detector 2 in 2004 ongeveer 2 x zo hoog is geweest.

De fysische interpretatie van de exponentiële staart van de aangepaste Moyalverdeling kan de aanwezigheid van fotonen zijn die niet ontstaan zijn door muonen uit de shower en dus een andere energieverdeling dan de Landauverdeling(en) die daarbij geacht worden te behoren. Dat er een convolutie nodig is heeft wellicht zijn oorsprong in de Gaussische respons van (delen van) het meetsysteem.

3.4.10 Conclusie

Met behulp van een fit van de energieverdeling van de signaalhoogtes kan een nauwkeurige bepaling van de *most probable value* van de door muonen afgegeven energie verkregen worden als deze onderscheiden kan worden van energie van energiebronnen die een enigszins Gaussisch profiel vertonen. Met de zo verkregen MPV-waarden kan een genormeerde energieverdeling gemaakt worden die benut kan worden om voor veel langere periodes dan een dag een betrouwbaar histogram te maken. De invloed van wijzigingen in de instelling kan zo onzichtbaar gemaakt worden.

Met de betrouwbare MPV's kan de deeltjesdichtheid van drievoudige coïncidenties nauwkeuriger bepaald worden en daarmee de energie van het primair deeltje.

De MPV-waarden lijken niet van de luchtdruk af te hangen. De afhankelijkheid van de temperatuur lijkt niet te bestaan voor 2 van de 4 onderzochte detectiestations terwijl de andere 2 een afnemende MPV bij toenemende temperatuur laten zien.

Het is mogelijk de energieverdeling van de signalen van de HiSPARC-detectoren te benaderen met een convolutie van een Gaussfunctie en de superpositie van 2 Landaufuncties en een aangepaste Moyalverdeling met een maximale afwijking kleiner dan 2 à 3 %.

3.5 MPV-waarde en telsnelheid als functie van omgevingstemperatuur ³



Figuur 3.50: Willem Remmers – Zernike College Groningen - [40].

Willem Remmers is docent natuurkunde aan het Zernike College in Groningen. Na zijn studie technische natuurkunde met de lerarenaantekening werkte hij lang bij KPN Research en later in consultancy en projectmanagement. Hoewel informatiekunde ook leuk is, vond hij het altijd meer een kunstje dan een vak, en hij wist altijd dat hij eens bij zijn eigen vak zou terugkeren. In 2003 maakte hij de overstap naar het onderwijs en zag ook dat de natuurkunde op de middelbare scholen nog steeds de oude natuurkunde van de 19-de eeuw is. Bij KPN leerde hij dat inhoud, proces en middelen (waaronder mensen) goed op elkaar afgestemd moeten worden voor een optimaal resultaat, en deze wijsheid probeert hij in het onderwijs juist bij vernieuwingen vast te houden.

'Na zoveel jaren je eigen onderzoek doen, was enorm uitdagend. In het verleden was ik gewend als projectmanager planningen te maken, maar alle onderdelen waren grofweg wel een beetje bekend. Hier bij HiSPARC lag alles open en dat was ook best moeilijk. Maar mijn leerervaring is ook dat het goed is eens teruggeworpen te worden, zodat je weer beginner bent, met de daarbij behorende onzekerheden. Ik had me ook voorgenomen niet te programmeren en me op de natuurkunde te concentreren; helaas kan ik constateren dat ik heel veel geprogrammeerd heb en eigenlijk maar weinig gemeten heb. Onderzoek laat zich niet makkelijk plannen, in feite is alles wat je voor het eerste doet qua efficiency niet te optimaliseren. Ik heb dit jaar met veel plezier aan mijn onderzoek gewerkt, het was ook duidelijk weer iets anders dan 'gewoon' onderwijs, bijna elke maandag weer een ander uitdagend en leuk probleem.

Ik denk dat ik richting leerlingen op mijn school de komende tijd wat milder zal gaan worden. Ik was een beetje vergeten dat als je iets ingewikkelds voor de eerste keer doet, dat je gewoon niet efficiënt kunt zijn.'

³ Analyse en conclusie zoals beschreven in deze tekst wordt niet gedeeld door de editors, en is op punten in tegenspraak met resultaten verkregen door andere LiOs.

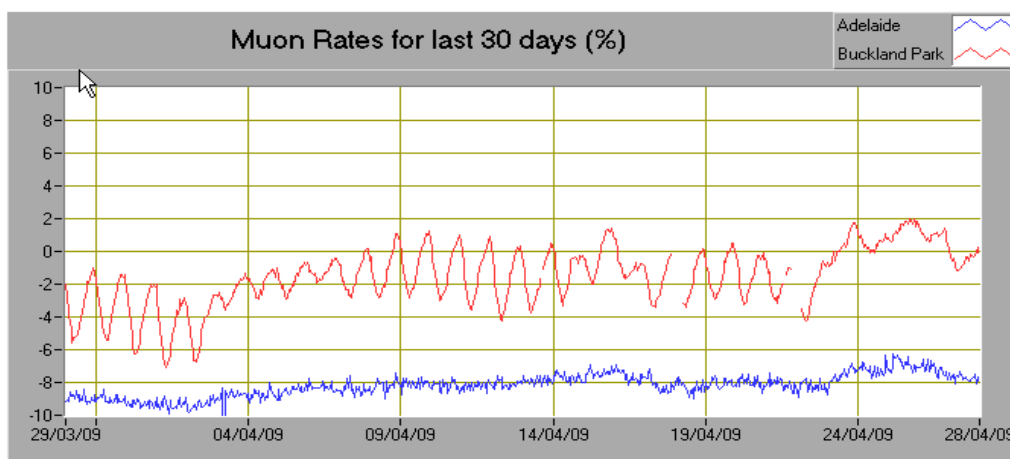
3.5.1 Onderzoeksopdracht

Het bepalen wat de invloed is van de temperatuur op de apparatuur zoals die bij de HiSPARC opstelling wordt gebruikt. Specifiek richt de opdracht zich op de positie van de muon-piek en het aantal hits per seconde.

3.5.2 Introductie

Bij de metingen met standaard HiSPARC opstellingen is in het verleden op verschillende plaatsen geconstateerd dat de temperatuur en de luchtdruk invloed heeft op de uitkomst van de metingen. Een literatuurscan leverde diverse experimentele resultaten op. Op deze plaats worden genoemd experimenten met HiSPARC opstellingen ([41] en [42]) en diverse studies ([43], [44], [45], [46] en [47]).

Druk en temperatuur bepalen samen met andere factoren de hoogte van de atmosfeer, en hebben hierdoor direct invloed op de shower aan secundaire deeltjes die de detectoren bereiken. In het algemeen zijn druk en temperatuur langzaam variërende grootheden, waar een meteorologische tijdschaal in de metingen direct terug te vinden is. Dit zien we bijvoorbeeld duidelijk terug in de weergave van de resultaten van de Universiteit van Adelaide zie Figuur 3.51 (afkomstig van hun website).

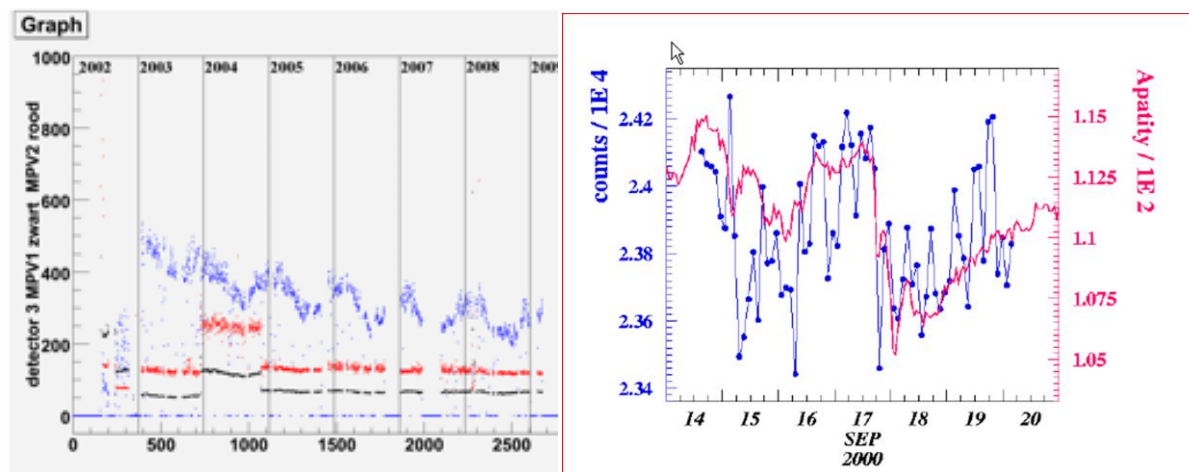


Figuur 3.51: Procentuele veranderingen in telsnelheden voor muonen als functie van de tijd (horizontaal). Duidelijk bij de rode (bovenste) lijn is de dagelijkse cyclus te zien.

Naast deze 24-cycli zien we nog andere cycli, o.a. de cyclus van de seizoenen (uit [42], linker grafiek in Figuur 3.52) en spectaculaire 'Forbush Decrease' (sterke afname in telsnelheid van muonen t.g.v. variaties in zonnewind en magnetische velden) uit [47], rechter grafiek in Figuur 3.52. Bij de linker grafiek staat verticaal de zogenaamde MPV-waarde uitgezet; dit is de meest voorkomende puls-waarde binnen een bepaalde meting en/of tijdsperiode. MPV-waarden worden meestal in mV getoond, maar zijn afhankelijk van o.a. de versterking van fotobuizen enz. en hebben in het algemeen alleen relatieve betekenis. In de rechter figuur staat het aantal 'counts', waarbij in feite de integraal over het spectrum wordt weergegeven.

Bij al deze studies is de invloed van de temperatuur en luchtdruk dus *indirect*, d.w.z. deze variabelen bepalen onder andere de hoogte van de stratosfeer. De opbouw van de atmosfeer en de kosmische

straling bepalen uiteindelijk de aard en de soort van de deeltjes die de detectoren bereiken. Druk en temperatuur hebben dientengevolge indirecte invloed op de positie van de piek (MPV-waarde) en de event-rate. Bij een deel van deze studies spelen ook verouderingseffecten van apparatuur een grote rol, met name natuurlijk bij langere meetseries over meerdere seizoenen of jaren. Systematisch onderzoek naar de afhankelijkheid van druk en temperatuur is complex, omdat deze variabelen niet beheersbaar zijn. Dit onderzoek richt zich op de invloed van lokale temperatuur, dus de temperatuur van de HiSPARC apparatuur. De temperatuursbeïnvloeding is hierbij dus *direct*.



Figuur 3.52: Links: verloop MPV-waarden (zwart/rood) en aantal events (blauw) over een reeks van jaren (in dagen) [42]. Rechts: 'Forbush Decrease' in blauw waargenomen in Lodz en in Apatity (West-Rusland, bij Moermansk) [47]. Afstand is hemelsbreed 1800 km.

De HiSPARC opstelling bestaat zoals bekend (zie [48]) in essentie uit twee parallel samenwerkende combinaties van een scintillator en een fotobuis (PMT). Binnenkomende deeltjes maken in de scintillator één of meerdere fotonen vrij; via het foto-elektrisch effect wordt het signaal van de fotonen omgezet in een elektrisch signaal dat op haar beurt versterkt wordt in de PMT en vervolgens in de elektronica (het HiSPARC kastje) wordt gedetecteerd, gefilterd en opgeslagen. Door twee combinaties parallel te gebruiken, wordt een belangrijk deel van de achtergrondruis weg gefilterd, en pas indien de 2 kanalen min of meer tegelijkertijd een signaal ontvangen, wordt er gesproken van een event. De communis opinio anno 2010 is, dat het voornamelijk hoogenergetische muonen, gamma's en elektronen zijn die door de HiSPARC opstelling worden gezien.

De elektronica is gekoppeld aan een standaard PC met meetsoftware geschreven in LabVIEW van National Instruments, en de events worden bewaard op de PC, waarna de lokale data via een bufferdatabase en een 'dispatcher' via het internet in een centrale database bij het NIKHEF belanden. Alle events worden voorzien van een GPS-tijdstip, en op deze manier kan de grootte van de shower en de energie van de invallende deeltjes worden bepaald. Vanwege de omvang van de standaard scintillator van de HiSPARC opstelling wordt het geheel meestal op het dak van scholen in een skibox geplaatst. In deze grijze skiboxen kan de temperatuur 's zomers flink oplopen (geschat wordt tot 70 °C) en 's winters flink afkoelen (tot -10 °C typisch in Nederland). Deze lokale temperatuursinvloed op de me-

tingen is in het verleden niet systematisch onderzocht, en was het onderwerp van deze studie.

Het bijproduct van deze studie zou kunnen zijn, dat er bijv. een standaard correctie toegepast moet worden bij de interpretatie van de resultaten (relatief goedkope oplossing) of dat er een koelelement (Peltier of iets anders) in de skibox ingebouwd zou moeten worden.

3.5.3 Temperatuurgevoelige elementen van de HiSPARC opstelling

De HiSPARC scintillator bestaat uit een plastic materiaal, dat gedoteerd is met een materiaal dat een hoge fotonen opbrengst per inkomend deeltje heeft. Leo [49] maakt de cryptische opmerking, dat in het algemeen de temperatuursafhankelijkheid gering is, maar indien er niet sprake is van 'normal operation' dat dit niet altijd het geval hoeft te zijn. Andere temperatuurgevoelige elementen zijn de kathode van de PMT, waar een typische waarde van minus 0,5 % per graad Celsius wordt gegeven (dus een *afname* van de hoeveelheid elektronen bij constante hoeveelheid fotonen). Bij een temperatuursvariatie van 80 graden, zou dit een 40 % signaalvermindering (counts per seconde) betekenen.

Verder merkt hij [49] op (zie pagina 197 en verder) dat de versterking (gain) van de PMT minder afhankelijk van de temperatuur is, maar dat deze ook sterk afhangt van de bouw en *zelfs het exemplaar*. Uiteraard is de 'dark current' (ruis) zoals altijd wel temperatuurgevoelig; over genoemd bereik zou dit een factor 10^{+6} (!) variëren.

Als laatste element van de HiSPARC opstelling moet de PMT hoogspanningsvoeding genoemd worden. Deze voeding zit in de standaard PMT ingebouwd, d.w.z. het elektronikakastje stuurt middels een lage spanning de hoogspanningsvoeding getrapt aan. De documentatie van de buis [11] geeft aan dat de PMT voeding voldoende gestabiliseerd is (0,035% per graad Celsius), het effect van 0,3 % (= 80 keer 0,035 %) op een optimale hoogspanning van 1054 Volt is relatief groter.

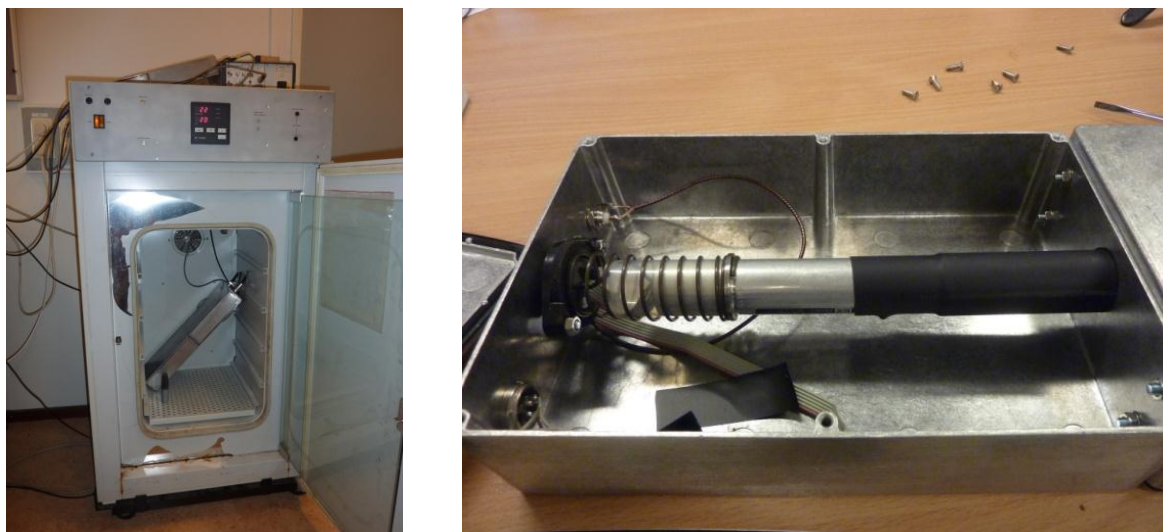
3.5.4 Opzet van het experiment

Beschikbaar bij het KVI in Groningen is een soort broedstoof (Figuur 3.53), waarvan de temperatuur ingesteld kan worden van 20 °C tot 70 °C. Deze kast biedt plaats aan een zogenaamde Nijmeegse detector die schuin in de broedstoof geplaatst worden. De broedstoof wordt geplaatst vlak bij de normale HiSPARC opstelling, en de temperatuur van 1 scintillator/PMT combinatie wordt gevarieerd, terwijl de andere scintillator/PMT op constante kamertemperatuur wordt gehouden. In de volgende tekst worden deze detectoren steeds consequent aangeduid met REF (referentieopstelling op de kast) en OUS (Object Under Study; in de broedstoof).

De eerste opzet, en dus de eerste meetreeks, betrof het *verkennen* van de gevoeligheid. De temperatuur wordt hierbij in stappen van 20 °C opgevoerd vanaf -10 °C. Elke meting zou ongeveer een uur in beslag nemen zodat na 1 meetdag met in achtname van insteltijden en *opwarmtijden* er een globaal beeld zal ontstaan. Afhankelijk van deze resultaten kan besloten worden tot verdere metingen en/of controle metingen.

In verband met de gevoeligheid van de scintillator/PMT voor de atmosferische buitendruk, wordt de meting uitgevoerd op een dag met een stabiele weersituatie. We nemen dan aan dat de atmosferische

drukopbouw in de bovenlucht dan ook constant is.



Figuur 3.53: Meetopstelling (links) met 1 detector boven (REF) en 1 detector in de broedstoof (OUS). Rechts boven op de stoof is de aansturing van de hoogspanning te zien. In het midden het display voor de temperatuurinstelling. In rechter figuur een foto van de opengemaakte detector. Alleen de PMT is zichtbaar. De veer links fixeert de positie van de PMT.

Deze eerste opzet leverde al meteen twee problemen op. Ten eerste, bij duidelijke veranderingen in MPV-positie en event-rate zouden deze effecten vertaald moeten worden naar andere scintillator/PMT combinaties. Dit is in feite niet te doen, omdat standaard HiSPARC opstellingen met andere scintillatiematerialen, PMTs, lichtgeleidervormen en oppervlakken werken. Ten tweede, bleek dat de event-rate pas na een aantal uren constant te zijn. Hierdoor werd de doorlooptijd van het experiment sterk vergroot, en kan moeilijker gesproken worden over een constante druk en bijbehorende constante opbouw van de atmosfeer.

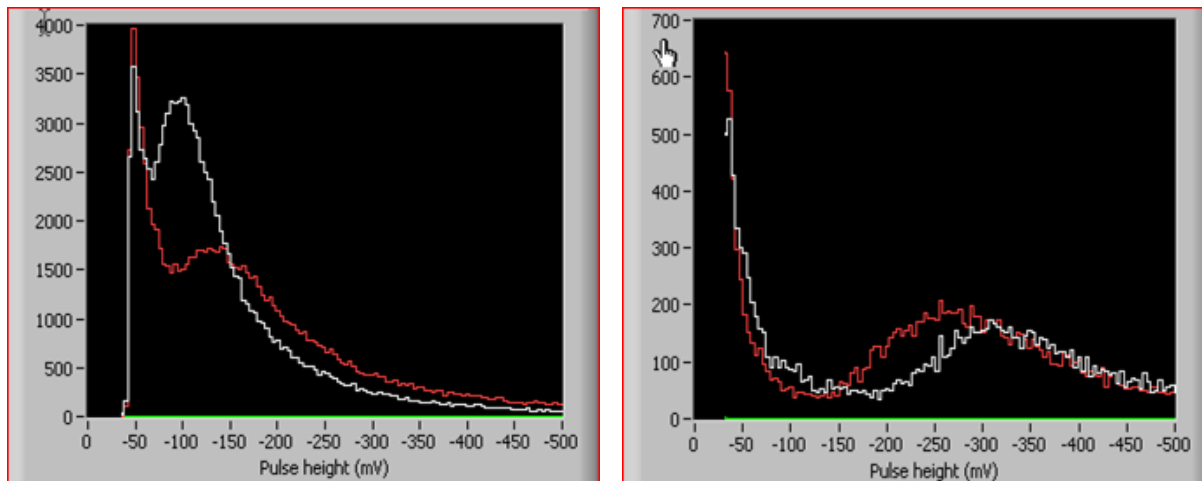
De broedstoof bleek redelijk goed te functioneren; tussen temperaturen van 0 tot 70 °C werkte de temperatuurstelling correct. Beneden de 0 °C bleek de ingestelde temperatuur niet erg constant, hetgeen gecontroleerd werd met een mini temperatuur datalogger. Een werkt temperatuur beneden de -10 °C bleek ondanks de specificaties van de stoof niet haalbaar.

Anderzijds leverde deze combinatie ook bijzondere resultaten, hetgeen gedemonstreerd wordt Figuur 3.54. Deze plaatjes zijn op verschillende tijdstippen gemaakt bij het instellen van de meest optimale hoogspanning voor de PMTs. Links een standaard plaatje van het station 4099, bestaande uit twee standaard scintillatoren en PMTs. Rechts het plaatje van de twee Nijmeegse detectoren. De hoogspanningen worden bij het 'matchen' van de 'gain' zo ingesteld dat de pieken van de muonen op dezelfde pulshoogtewaarden liggen.

De beide grafieken in Figuur 3.54 laten de ruispiek (elektronen, gamma's) zien bij een waarde van rond de 50 mV pulshoogte. Bij station kvi1 zien we de muon signaal piek (MPV-waarde) dicht tegen de ruispiek bij ongeveer 100 en 150 mV liggen. Bij het plaatje rechts is de muon piek heel duidelijk ge-

scheiden van de ruispiek. Dit maakt de calibratie en analyse veel eenvoudiger. Het project werd in meerdere fasen onderverdeeld:

- Een serie verkennende metingen.
- Een vervolgsérie met grotere temperatuurbereiken.
- Omwisseling van de detectoren.
- Experimenten met andere deeltjesbronnen ter verificatie van de experimenten.

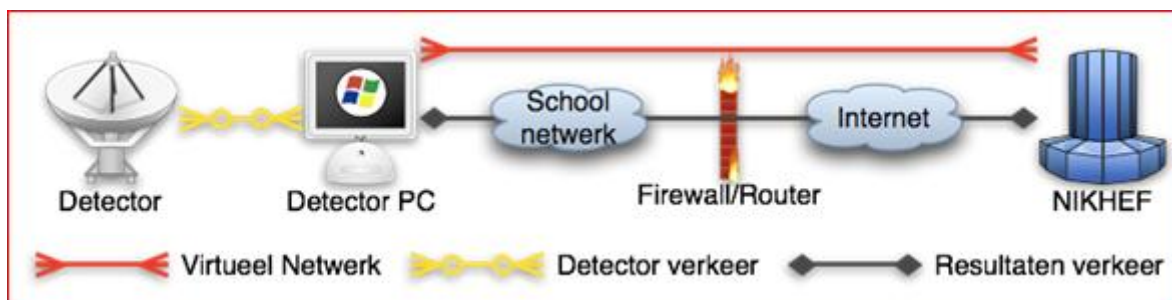


Figuur 3.54: Event count (verticaal) tegen pulshoogte(horizontaal) in de display van het HiSPARC besturingsprogramma met (links) de kvi1 opstelling (station 4099) met standaard scintillatorplaten d.d. 19-10-2009. Rechts de (inmiddels ontmantelde) kvi2 opstelling met Nijmeegse detectoren d.d. 11-01-2010.

3.5.5 Uitvoering van de metingen

De standaard LabVIEW software bestaat uit een aantal schermen die een goed beeld geven van het functioneren van het meetstation. Naast het pulshoogtespectrum (zie Figuur 3.54 als voorbeeld), worden trigger-rates getoond, integralen berekend, enz. en als lokale data (als statistiek) bewaard.

De HiSPARC opstelling functioneert alleen indien dat de lokale MySQL bufferdatabase aanwezig en bereikbaar is. Per 5 events wordt naar deze bufferdatabase geschreven, waarna de data via de dispatcher in de centrale database bij het Nikhef belandt (zie Figuur 3.55).

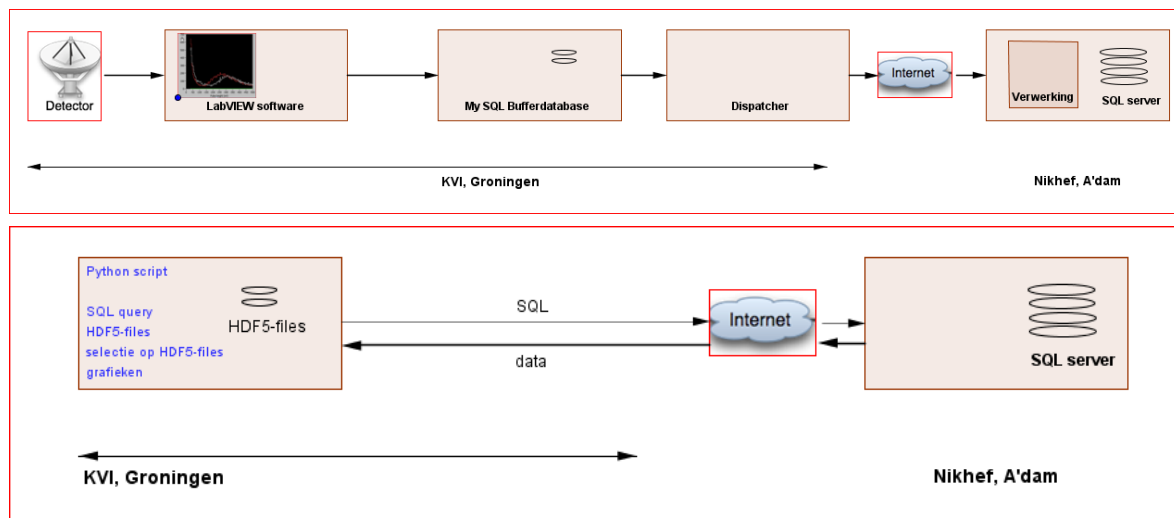


Figuur 3.55: Architectuur van het datatransportsysteem.

Als meerdere dagen doorgemeten wordt, en er spanningsuitval is, dan start het meetstation automa-

tisch weer op, maar de lokale statistiek is verloren. De opzet van deze architectuur is dan ook dat de data analyse per definitie niet realtime kan verlopen, maar alleen via het *achteraf* benaderen van de centrale database bij het Nikhef na afloop van de centrale verwerking. Deze verwerking is deels vergelijkbaar met de lokale statistische verwerking (berekening pulshoogtespectrum en integralen) en behelst voorts controle en rubricering. Via Pythonscripts op een lokale PC worden de in SQL opgeslagen data van de centrale database gedownload; voor de snellere verwerking worden deze data lokaal opgeslagen in lokale zogenaamde HDF5 structuren. Ad hoc geschreven Python scripts maken hier vervolgens selecties en indien gewenst grafische voorstellingen van (zie verder).

De selectie van de data is dus een meertraps mechanisme. Via Pythonscripts worden de stationsnummers en de perioden geselecteerd, hetgeen direct leidt tot een 'SQL query' op de centrale database. De inhoud van de SQL tabellen worden in de Python scripts geconverteerd naar *hiërarchisch* georganiseerde HDF5-structuren; deze lokale files kunnen weer gefilterd en verwerkt worden met gebruikmaking van de onderliggende HDF5-structuur (zie Figuur 3.56).



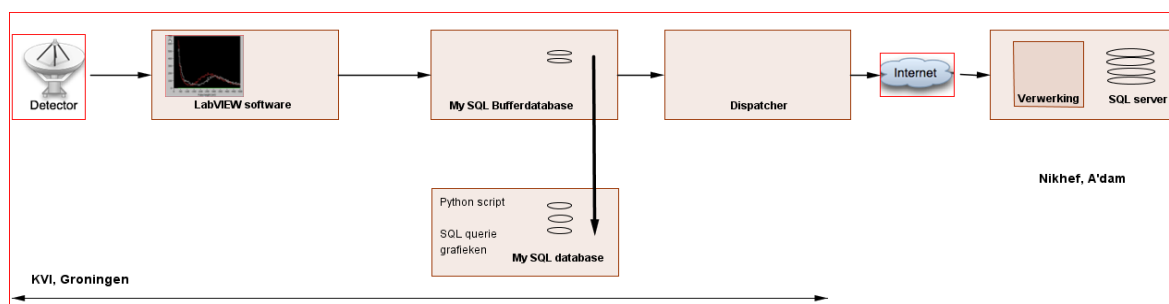
Figuur 3.56: Datastromen in het HiSPARC netwerk met (boven) het transport van de meetgegevens van de 'data acquisitie PC' naar de centrale opslag bij Nikhef en de toegang tot deze data voor offline analyse in Groningen (onder).

Deze architectuur van het systeem is gericht op analyse van grotere hoeveelheden data, en met name ideaal voor het berekenen van correlaties tussen events op meerdere stations. Immers hiervoor moet de data op 1 plaats samenkomen, en hiervoor is een centrale SQL database zeer geschikt.

Voor dit experiment, waarbij we alleen in de data van 1 station geïnteresseerd zijn, en we liefst zo snel mogelijk en realtime zien wat de invloed is van de veranderende temperatuur op de vorm van de spectra, is deze architectuur niet echt geschikt (en ontworpen). Immers, de weg die de data doorloopt, is zeer complex: van lokale data in de LabVIEW software wordt SQL data gemaakt in de bufferdatabase, via de dispatcher belandt de data druppelsgewijs in de centrale database (met een zekere tijdsvertraging). Dan moet de centrale SQL-data weer gedownload worden, in HDF5 vertaald worden en met scripts verder verfijnd en bewerkt worden, alvorens in een of ander grafische voorstel-

ling zichtbaar te worden.

In eerste instantie dachten we veel beter uit te zijn met een *lokale aftap* van de data. Hiertoe werd in de lokale SQL buffer database een zogenaamde trigger geplaatst, met het doel het repliceren van de inkomende data. Omdat de data al in lokale SQL structuren bewaard wordt, zou (bijna) realtime analyse veel makkelijker zijn; immers voor deze experimenten zijn alle data reeds lokaal aanwezig en is verrijking van data niet aan de orde. Hiermee wilden we een soort shortcut maken voor de datastromen (zie Figuur 3.57).



Figuur 3.57: Aftappen van data ten behoeve van dit experiment.

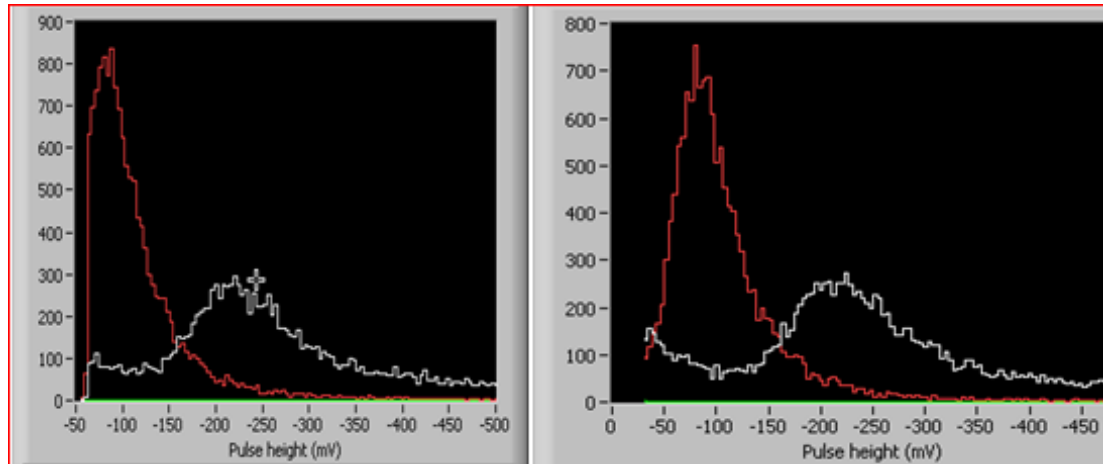
Noodzakelijk voor deze opzet was dus het begrijpen van de lokale database structuur, en kennis van SQL. De structuur van de database en de kennis van SQL bleek in de eerste maanden van het onderzoek niet het knelpunt, maar wel de database software op de lokale PC (MySQL). Deze gratis database ondersteunt wel triggers, maar in zeer beperkte mate (o.a. maar 1 trigger per tabel). Uiteraard zorgen triggers wel voor extra systeem belasting en dit bleek in combinatie met WindowsXP en de LabVIEW software te zorgen voor WindowsXP vastlopers, MySQL 'locks', overlopende buffers voor de LabVIEW software, niet werkende dispatchers en meer ellende. Na enig experimenteren zijn we *gedwongen* overgegaan op de standaard software, waarbij dus het (bijna) realtime analyseren van de temperatuursinvloed helemaal opgegeven werd. De aanbeveling om een andere PC te nemen ten behoeven van de analyse werd gezien de blijkbaar al aanwezige systeembelasting ter harte genomen. Voor de keuze van het platform van de analyse PC werd in eerste instantie gekozen voor WindowsXP. Dit bleek een niet stabiele configuratie te zijn en vervolgens is fluks voor het stabiele Ubuntu gekozen. Vervolgens dienden de Amsterdamse scripts nog verder ontwikkeld te worden.

3.5.6 Calibratie experimenten

Medio november hebben we een tweede PC ingericht voor dit experiment. De resultaten van de metingen op de tweede PC bleken echter af te wijken van de resultaten op de eerste PC en we konden de metingen van september niet goed reproduceren. Een duidelijke oorzaak hebben we hiervoor niet kunnen vinden. Achteraf gesproken had dit een aanwijzing kunnen zijn om hier systematisch naar te kijken.

Op enig moment is 1 HiSPARC opstelling aangesloten geweest op 2 meetopstellingen. Het van de PMTs afkomstige signaal werd d.m.v. lijnsplitters parallel aangeboden op 2 kastjes (waarbij alleen de masteraansluiting benut werd) met hierachter 2 PCs. Dit experiment werd gedaan omdat een van de

beschikbare PCs steeds uitviel in verband met ‘loop’ problemen met de harde schijf en intern geheugen ten gevolge van het gebruik als meetstation voor HiSPARC. De gebruikte hardware waren de nieuwe elektronica kastjes, waarbij de calibratie van de analoog digitaal conversie doorlopen was. De resultaten zijn te mooi om niet te presenteren (Figuur 3.58).



Figuur 3.58: Snapshot HiSPARC displays van pulshoogte histogrammen voor de HiSPARC scintillator (wit) en Nijmegen detector (rood) onder identieke omstandigheden op 9/11/2009 voor (links) PC KVIQ82 (kvi1) en (rechts) KVIQ54 (kvi2).

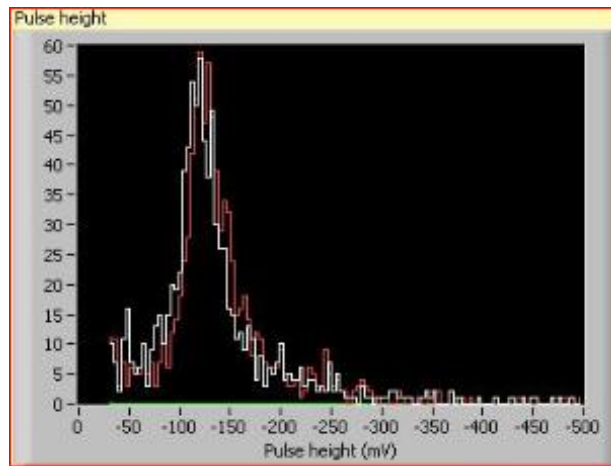
In de grafieken zitten subtiele verschillen: er zijn duidelijk verschillende filters gehanteerd (links alle events, rechts instelling met drempel van 40 mV). De pieken (MPV-waarden) zitten wel op dezelfde posities en de vorm van de grafieken komt globaal overeen. Maar de vorm zou 100 % identiek moeten zijn in het gebied > 40 mV. Verder is het grootste verschil het verschil in opbrengst (10 %). De calibratie kan niet de enige oorzaak van het verschil in grafieken zijn; onjuiste calibratie zou mogelijk betekenen dat de MPV-piek bij een andere pulshoogte zou verschijnen, met andere woorden de maximale count (wit en rood) zou links en rechts even hoog moeten zijn.

Duidelijk is dat het rechter DAQ station een 10 % van de events niet gezien heeft, mogelijk t.g.v. te hoge systeembelasting. Maar deze verklaring is niet echt bevredigend. Een HiSPARC station komt bij te hoge belasting via het Nagios monitoring en control systeem in het rood te staan, en dat is bij deze metingen niet aan de orde geweest.

3.5.7 Referentiesituatie bij $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

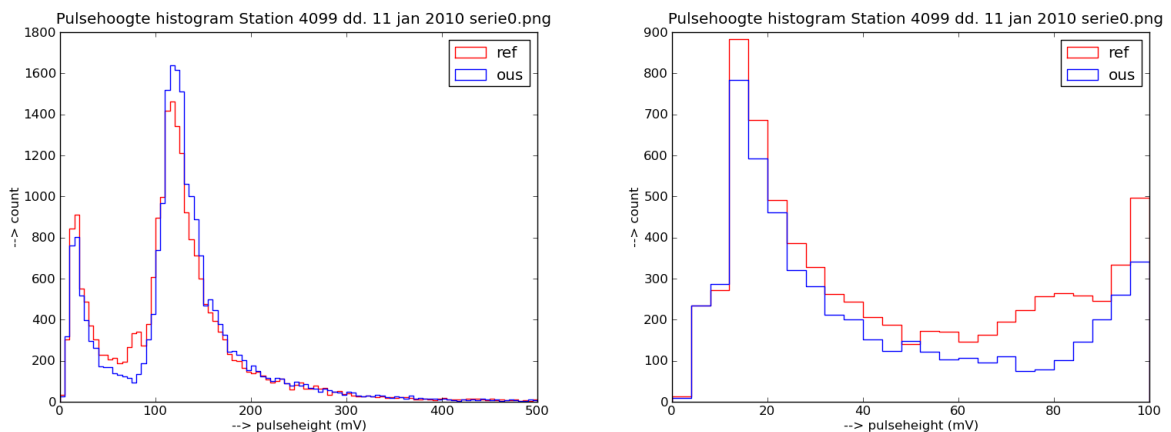
Na de verkennende metingen van begin januari is verder geëxperimenteerd met de optimale verspanningen. Het doel is hierbij zodanige spanningen aan te leggen, dat na calibratie van het elektronica kastje, de MPV-pieken van de 2 identieke Nijmeegse detectoren bij dezelfde pulshoogte (horizontaal) liggen. Het onderstaande LabVIEW plaatje dat getoond wordt in Figuur 3.59 werd als ongeveer optimaal gezien.

Deze meting is vervolgens langere tijd doorgelopen en is bij al onze analyses als referentie gebruikt. We zien hierbij rond de MPV-waarde van 115 mV een kleinere opbrengst bij de REF detector (die ligt steeds boven op de broedstoof) dan bij de OUS-detector. We weten dat we hier events zien, dus de



Figuur 3.59: Resultaat van de metingen bij optimale versnelspanningen van de PMTs. Op het oog zijn de MPV-waarden gelijk (ongeveer 120 mV).

integraal onder de curve (alle metingen in totaal over alle pulshoogten gerekend) zouden in theorie hetzelfde moeten zijn. Dus een hogere opbrengst rond de muon-piek betekent ook dat elders in Figuur 3.60 meer counts moeten zijn, hetgeen duidelijk te zien is. De MPV-piek (rond 130 mV) zou volgens de theorie de vorm van een Landaucurve moeten hebben, al is het laatste woord hier nog niet over gezegd. De ruispiek (rond 30 mV) lijkt soms op een (symmetrische) Gaussverdeling, maar is dit zeker niet.

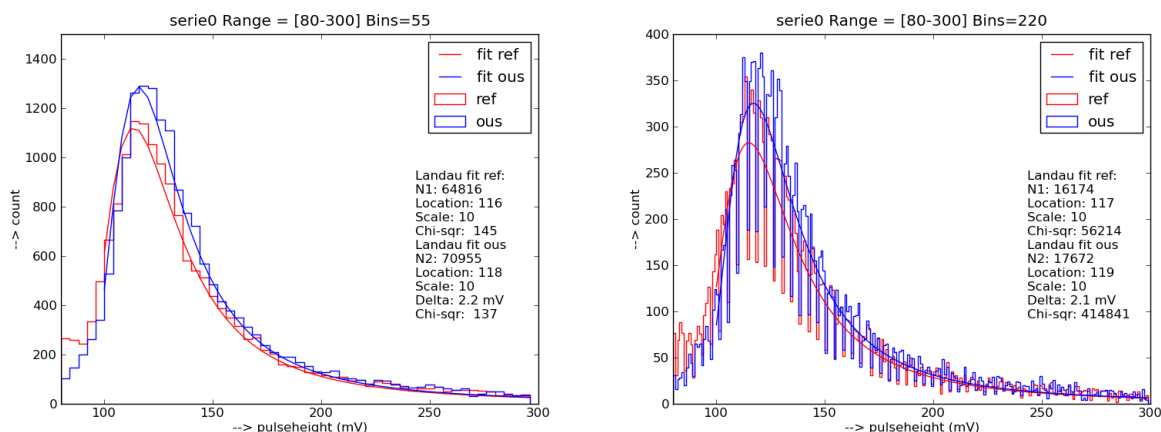


Figuur 3.60: Pulshoogte histogrammen bij referentietemperatuur (20 °C). Met rechts een uitvergroting van het gebied van 0 - 100 mV. Met REF de scintillator die boven op stoof ligt (rood) en OUS (Object Under Study, blauw) de detector die in de stoof ligt.

Bij de metingen met de HiSPARC opstelling is de voorwaarde voor een event *definieerbaar*. Vaak wordt gebruikt 'twee pulshoogten van 40 mV (negatief)'. Hiermee wordt veel ruis uit de metingen gefilterd. Dat er dan toch pulshoogten zichtbaar zijn in dit gebied (rechter grafiek in Figuur 3.60), kan te maken hebben met verschillende oorzaken; o.a. verloop in de tijd van deze ingestelde spanning, onjuiste calibratie en problemen met de nauwkeurige vaststelling van de zogenaamde baseline van het signaal. De bepaling van deze baseline is een van de taken van de centrale software bij het Nikhef

(zie Figuur 3.57, bij verwerking bij Nikhef).

De ruispiek is dientengevolge geen echte piek; bij afnemende pulshoogte komen we uit het gebied van de opbrengst t.g.v. muonen en is de piek het resultaat van losse elektronen en mogelijk gamma's die onze analyse deels verstoren in combinatie met de drempelwaarde. Als signaal-ruisverhouding kunnen we de opbrengst onder de curven nemen. Voor de bepaling van de hoeveelheid ruis nemen we als beste een vaste ondergrens van bijvoorbeeld 40 mV. Uit het linker histogram zouden we ook concluderen dat de OUS scintillator (blauw) een betere signaal/ruisverhouding heeft. Bij iedere meting is met behulp van Python scripts de MPV-waarde bepaald door middel van de kleinste kwadraten methode, zie Figuur 3.61.



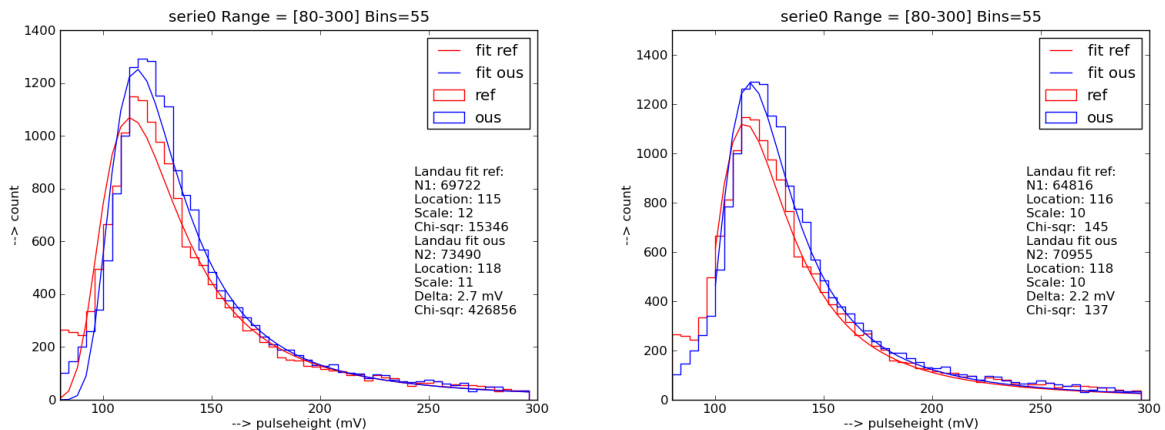
Figuur 3.61: Landau analyse referentiesituatie. Links met een goede binning (nbins = 55); rechts is het aantal bins 220.

Vier keer zo veel bins levert uiteraard vier keer lagere opbrengst per bin. De binning is hier niet goed, waardoor er als gevolg van de conversie analoog naar digitaal anomalieën optreden. De kleinste kwadraten methode is hiervoor zeer ongevoelig, immers er komt nu spreiding in de meetresultaten maar de metingen zijn wel gemiddeld (paarsgewijs) goed. Chi-kwadraat is voor nbins = 55 goed, voor nbins = 220 is deze waarde onacceptabel. De Landaufit geeft de volgende gegevens terug:

- N1 en N2: schalingsparameter in verticale zin.
- Locatie: positie van de top.
- Schaal: de vormfactor van de Landaucurve.
- De verschuiving (Delta) in mV van de topposities.
- De berekende waarde voor chi-kwadraat bij de Landaufit.

De waarde van delta van 2,2 mV is het resultaat van de analyse, waarbij de metingen langere tijd doorliepen, bij dezelfde omstandigheden als bij Figuur 3.59. De verschillen die bij Figuur 3.59 nog niet goed zichtbaar zijn (ook omdat het beeld met het oog wordt bekeken, en omdat het LabVIEW beeld niet echt scherp is), worden met behulp van de scripts scherper uitvergroot. De versnellingsspanningen van de twee detectoren, die bij optimale instelling dezelfde MPV-waarden moesten opleveren, is dus bijna ideaal.

Deze Landaufit en -analyse is deels handwerk. Eerst moet geverifieerd worden dat ruis- en muon-pek voldoende uit elkaar liggen en vervolgens wordt een zo groot mogelijk deel van de metingen benut voor de Landaufit. Zo is bij Figuur 3.61 het gebied van 80 mV tot 100 mV niet in het Landaufitgebied meegenomen. Nemen we dit gebied wel mee, dan neemt de chi-kwadraat waarde sterk toe maar blijft de fit goed. De bijdrage aan de chi-kwadraat waarde wordt dan helemaal bepaald door de bijdrage van dit extra gebied. Voor de waarde van de Delta maakt het nauwere analysegebied niet veel uit (zie Figuur 3.62).



Figuur 3.62: Landau analyse referentiesituatie. Links voor de Landaufit over het interval 80 - 300 mV en rechts 100 - 300 mV.

De pulshoogte diagrammen worden dus eerst op het oog beoordeeld en dan wordt de Landaufit gedaan. Een goede eerste schatting voor de kleinste kwadraten methode met name voor de ligging van het maximum bevordert het hele proces.

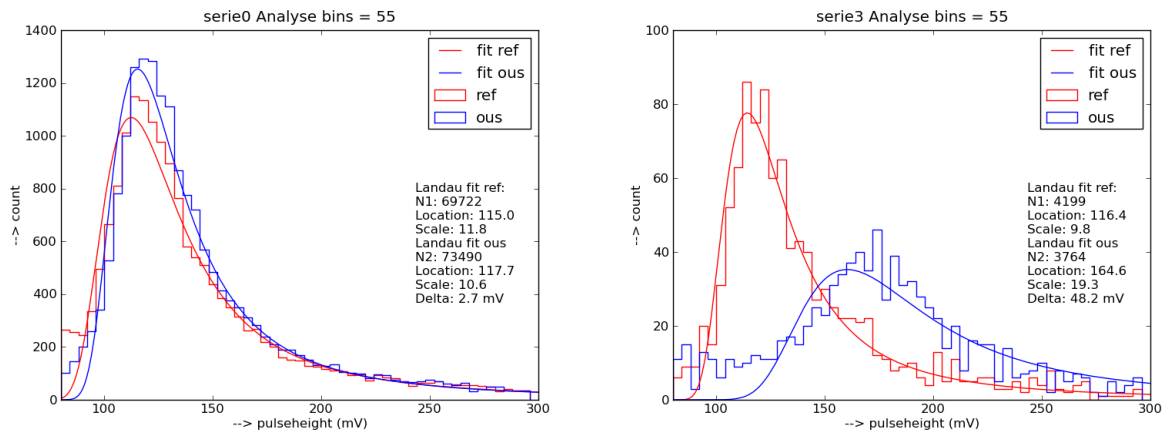
Het draaien van de Python scripts voor de analyse van de Landaucurven bleek niettemin een tijdrovend proces te zijn, met name in Windows systemen zoals Windows XP en Windows 7. Het Ubuntu platform bleek in hierbij in prestaties superieur. In bijna alle gevallen bleek een ondergrens van 80 mV de beste resultaten op te leveren. Duidelijk is ook dat de nauwkeurigheid van de bepaling van de MPV-waarden niet bijzonder groot is (zie Figuur 3.61, Delta = 2,2 mV), maar bij de metingen waren we meer geïnteresseerd in reproduceerbaarheid van het effect dan de absolute waarden van de verschuivingen.

3.5.8 Eerste verkennende metingen: MPV-waarden

De eerste metingen van begin januari betrof het vergelijken van het standaard beeld met het beeld bij een veel hogere temperatuur. Er bleek een heel duidelijk temperatuur-effect te zien (zie Figuur 3.63). Serie 3 is gemeten op dezelfde dag (11-01-2010) waar serie 0 afliep, met een tussenperiode en opwarmtijd van 4 uur. De referentie scintillator blijft op dezelfde positie in het pulshoogtespectrum, maar de OUS-scintillator is spectaculair verschoven naar hogere waarden (rechts in Figuur 3.63).

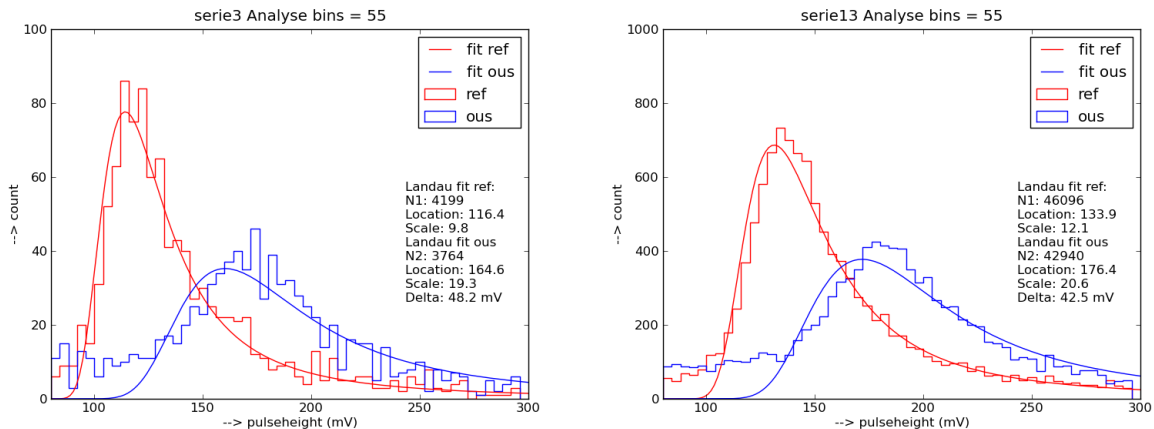
Vervolgens werd volgens plan besloten de metingen te doen in een zo groot mogelijk temperatuursbereik. Een probleem was dat de event-rate niet erg groot was, typisch 0,1 event per seconde. Bij een

grafiek zoals rechts in Figuur 3.63, met een tijdsduur van 2,6 uur, zijn exact 1964 events in het spel.



Figuur 3.63: Pulshoogte histogrammen bij $T = 20^{\circ}\text{C}$ (links) en $T = 50^{\circ}\text{C}$ (rechts). De distributie voor van de REF detector is onveranderd; de OUS detector geeft veel hogere MPV-waarden. Meettijd: links 2,5 dag; rechts 2,6 uur.

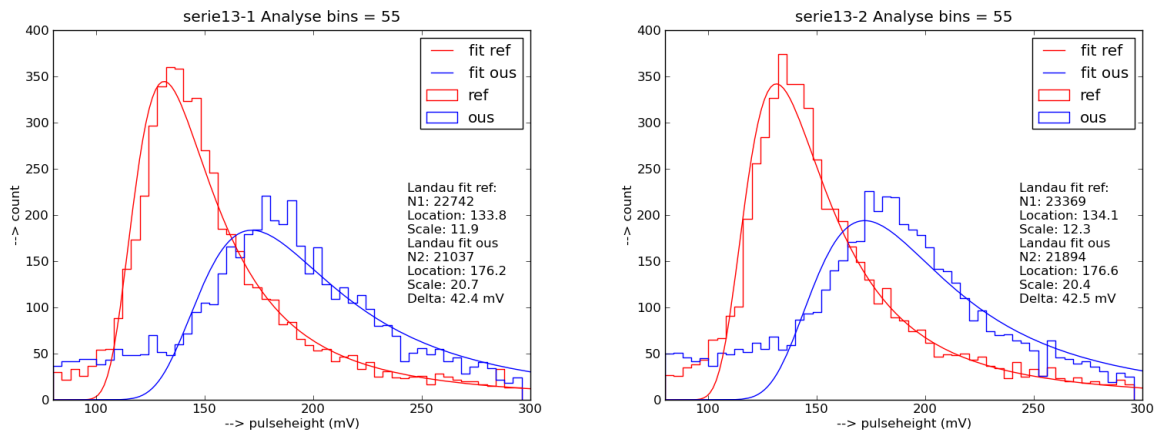
Verdelen we deze evenredig over het aantal bins, dan is het gemiddelde aantal events per bin $1964/55 = 35$, en hebben we dus een *zichtbaar* weinig statistiek. Verlenging van de tijdsduur van de metingen, leverde wel uiteraard betere statistiek op en minder variërende grafieken, zoals te zien is in Figuur 3.64.



Figuur 3.64: Pulshoogte histogrammen bij $T = 50^{\circ}\text{C}$ maar over verschillende tijdsintervallen: links 2,6 uur en rechts 48 uur.

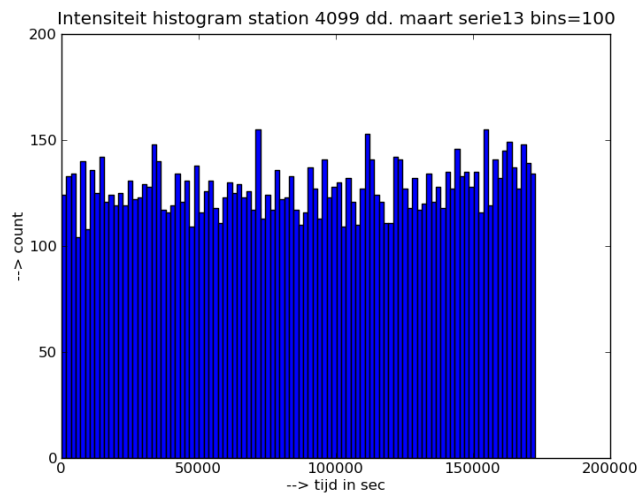
Om een indruk te krijgen van de variaties, hebben we serie 13 opgesplitst in 2 dagen en de Landaufit hierop gedaan (zie Figuur 3.65). Dit geeft ons een beeld van de nauwkeurigheid van de analyses, c.q. de natuurlijke variaties.

Het intensiteit histogram over 2 dagen wordt gegeven in Figuur 3.66. Langere meettijden leverden dus wel de gewenste statistiek op, maar brachten het uitgangspunt bij de metingen om alle metingen in 1 dag te doen in gevaar. Immers, de druk en opbouw van de lucht in de atmosfeer verandert meestal niet in orde uren maar wel in orde dagen. Een goede middenweg hierin was niet te vinden, ook omdat



Figuur 3.65: Positie van de MPV-piek bij meetserie 13, opgesplitst in twee dagen. Gemiddelde aantal counts/sec voor serie 13-1: 0,0729. Voor serie 13-2: 0,0749.

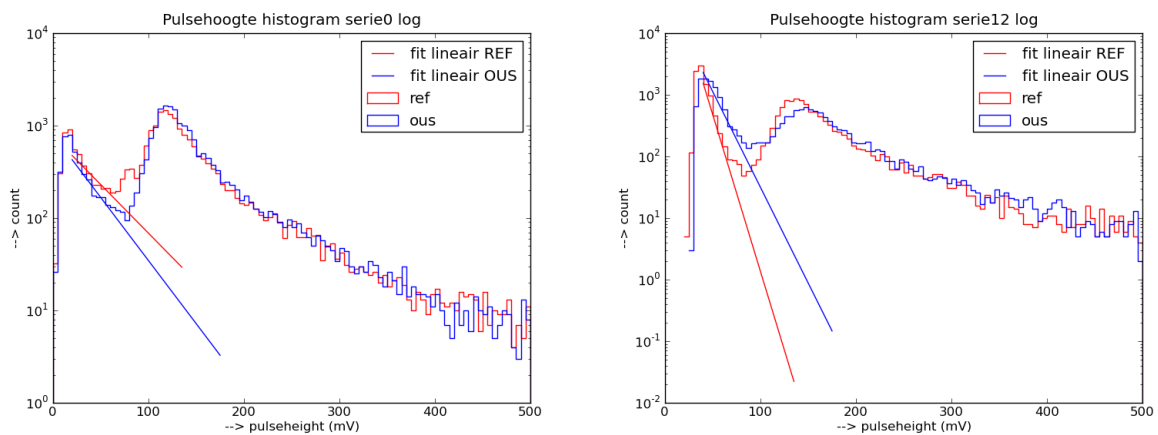
de PMT een aantal uren stabilisatietijd nodig heeft, zoals ook in algemene zin aangegeven door Leo [49] in zijn handboek ‘detectoren bouw’. Waarschijnlijk speelde dit effect mee bij de eerste calibratie experimenten.



Figuur 3.66: Intensiteit histogram serie 13 over 2 dagen. Aantal bins = 100. De gemiddelde waarde per bin is 128. Een trend is hier niet in te herkennen.

Tot slot van deze paragraaf nog iets over de positie van de MPV-piek als gevolg van de invloed van ruis. Bij Figuur 3.54 zien we hoe de rechterflank van de ruiscurve en de muon-piek als het ware in elkaar grijpen. Het rustsignaal moet eigenlijk eerst van het totale signaal afgetrokken worden voor de bepaling van de piekwaarden. Bij deze Nijmeegse detectoren ligt de muon-piek duidelijk gescheiden van de ruis. Indien we aannemen dat de ruiscurve een e-macht is, dan moet dat duidelijk als rechte lijn zichtbaar worden met een logaritmische plot van het pulshoogtespectrum (Figuur 3.67).

De trendlijn is in Figuur 3.67 getekend door de kleinste kwadraten methode toe te passen op een gebied dat duidelijk (ver) voor muon piek zit. We nemen hiervoor een gebied vanaf 40⁰ mV tot 80⁰ mV.



Figuur 3.67: Pulshoogte histogrammen serie 0 en 12 (verticaal logaritmische schaal). Serie 0 (links) bij 20 °C, serie 12 (rechts) bij 3 °C.

Duidelijk is dat de bijdrage van de ruis in de buurt van de MPV-waarde een decade (serie 0) of nog meer (serie 12: decades) verschilt. Correcties in de procedure voor de bepaling van de MPV-waarde zijn dus bij deze detector-PMT combinatie overbodig.

3.5.9 Eerste verkennende metingen: event-rate en signaal-ruisverhouding

Naast de positie van de MPV-waarden waren we geïnteresseerd in de event-rate en de signaal-ruisverhouding. Voor de muon event-rate van het signaal hebben we de integraal genomen over pulshoogten in het interval 80 mV tot 300 mV. Uit de metingen is ook de totale count aan events in het hele spectrum bekend. De signaal-ruisverhouding was hiermee vervolgens eenvoudig te berekenen.

3.5.10 Verslag van alle metingen: MPV-waarden

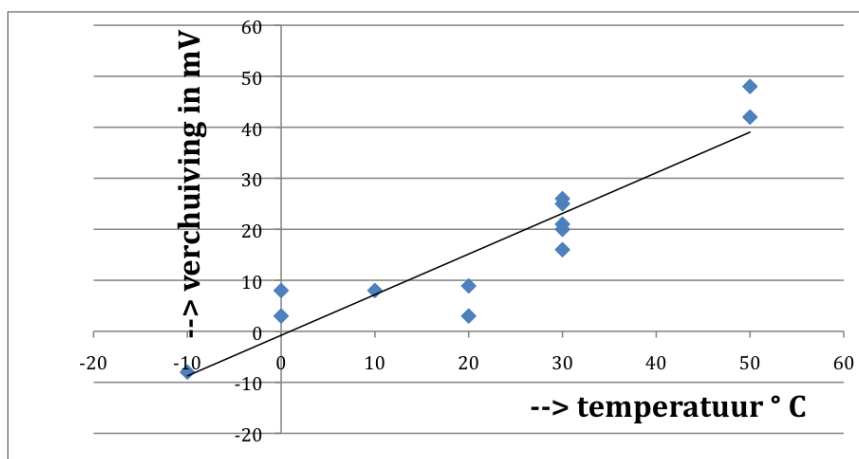
De metingen zijn gestart in januari 2010 en hebben doorgelopen tot einde april 2010. De metingen besloegen altijd een aantal dagen, met uitzondering van serie 7 die de krokusvakantie omvatte.

De eerste reeks liep van serie 0 tot serie 16, daarna zijn REF en OUS omgewisseld. De metingen zijn samengevat in Tabel 3.11 en worden weergegeven in een reeks grafieken. Vanaf begin hebben we ons geconcentreerd op de verschuiving in de positie van de muonen piek. Na de eerste meetserie ontstond het volgende plaatje (Figuur 3.68).

Belangrijk is dat er gedurende de hele periode steeds is gecalibreerd, d.w.z. de HiSPARC DAQ heeft meerdere keren de ingebouwde calibratiestappen doorlopen. De eenmaal vastgestelde hoogspanningen (zie sectie 3.5.6) zijn evenwel niet veranderd. Aanvankelijk leek de grafiek een heldere conclusie op te leveren, namelijk een duidelijke verschuiving in de positie van de MPV-piek bij hogere temperatuur. In Figuur 3.68 is een duidelijke trendlijn zichtbaar, met een $\Delta V/\Delta T$ van 0,8 mV per graad Celsius. Aanvankelijk waren we ook met deze waarden erg tevreden, omdat de reproduceerbaarheid groot leek. Bijvoorbeeld tussen beide meetpunten bij een temperatuur van 50 °C, zit een tijdsperiode van 3 maanden. Ditzelfde gold voor de twee punten bij 20 °C en 0 °C.

| Serie | Temp OUS ($^{\circ}\text{C}$) | Verschuiving (mV) | Duur meting | Startdatum |
|------------|---------------------------------|-------------------|-------------|------------|
| Serie 0 | 20 | 3 | 2,5 dag | 8-1 |
| Serie 1 | 20 | 0,4 | 40 minuten | 11-1 |
| Serie 3 | 50 | 48 | 3 uur | 11-1 |
| Serie 4 | 0 | 3 | 2 dagen | 12-1 |
| Serie 5 -1 | 30 | 17 | 3 dagen | 18-1 |
| Serie 5 -2 | 30 | 20 | 2 dagen | 21-1 |
| Serie 6 | 30 | 21 | 9 dagen | 25-1 |
| Serie 7 | 30 | 26 | 15 dagen | 25-2 |
| Serie 8 | 30 | 25 | 11 dagen | 1-3 |
| Serie 12 | 20 | 8,9 | 3 dagen | 12-4 |
| Serie 13 | 50 | 42 | 2 dagen | 16-4 |
| Serie 14 | 0 | 8 | 1 dag | 19-4 |
| Serie 15 | 10 | 8 | 1 dag | 21-4 |
| Serie 16 | -10 | -8 | 1 dag | 23-4 |
| Serie 17 | 50 | 61 | 1 dag | 26-4 |
| Serie 18 | 30 | 55 | 16 uur | 27-4 |
| Serie 19 | 10 | 43 | 2 dagen | 28-4 |

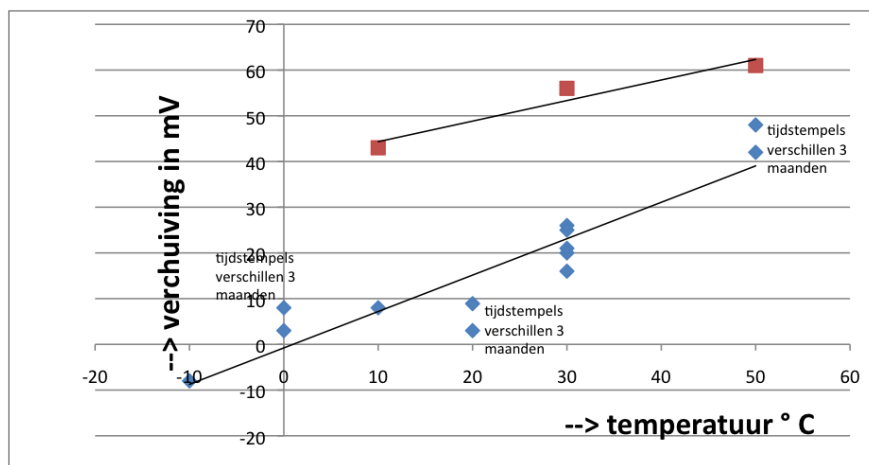
Tabel 3.11: Overzicht van metingen met de standaard beginconfiguratie (1 t/m 16) en omgewisselde detectoren (17 t/m 19). De verschuiving is het resultaat van de Landaucurven die gefit worden op REF en OUS en waarbij het verschil in MPV-positie genoteerd is.



Figuur 3.68: Verschuiving van de positie van de MPV-waarde voor een reeks metingen bij verschillende temperaturen. Tussen de metingen zit een tijdverschil van ongeveer 3 maanden. De waarden zijn bepaald aan de hand van Landaufits.

De meetserie van april verstoort echter deze conclusie (zie Figuur 3.69 rode markeringen). De kleinere serie van april was alleen bedoeld voor controle. Volgens plan (sectie 3.5.4) werden de detectoren omgewisseld (de REF scintillator op de broedstof kwam dus in de broedstof en vice versa). De verwachting was dat de temperatuurseffecten ook in deze configuratie zichtbaar zouden moeten zijn, gesteld dat de scintillatoren en PMT volkomen identiek zijn. Ingeval van juiste calibratie zou het spectrum van Figuur 3.59 (de referentie situatie) weer tevoorschijn moeten komen en er bij $T = 20^{\circ}\text{C}$ geen verschuiving moeten zijn. De drie metingen worden in Figuur 3.69 samen met de andere metingen getoond. Enerzijds is er een bevestiging dat de positie van de MPV-waarde bij hogere temperatuur naar

hogere waarden verschuift (voor de tweede set is $\Delta V/\Delta T = 0.7$ mV per graad Celsius), anderzijds hebben we een verschil van bijna 50 mV dat moeilijk te verklaren is.



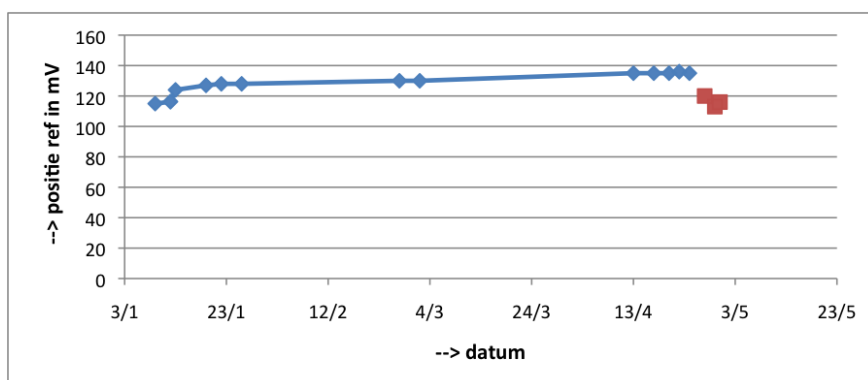
Figuur 3.69: Verschuiving van de positie van de MPV-waarde voor twee reeksen metingen bij verschillende temperaturen. Tussen de metingen zit in totaal een tijdverschil van ongeveer 3 maanden. Standaard configuratie (blauw) en verwisselde detectoren (rood).

We hebben een aantal mogelijke oorzaken voor dit verschil kunnen identificeren:

- Calibratie problemen. Aangezien de calibratieprocedure niet verder onderzocht is, gaan we hier niet verder over speculeren. Anderzijds kunnen we vermoeden dat het calibreren van een signaal van orde grootte 100 mV en met een stijgtijd in de orde van nanoseconden best aan de ontwerpers van elektronica van het Nikhef overgelaten kan worden.
- Veroudering van scintillatoren. Met name de PMT die in de broedstof is geweest, zou mogelijk geleden kunnen hebben van (te) hoge temperaturen als gevolg waarvan materiaal weggesputterd is. Dit zou zich dan kunnen vertalen in een lagere aantal counts per seconde omdat een aantal elektronen niet meer het hele versneltraject zou kunnen doorlopen. Informatie van de leverancier Matsusada [50] over het ontwerp van het hoogspanningsgedeelte van de PMT is hier echter mee in strijd. Onze specificaties in de vorm van een Fax die in 'steenkool Engels' gesteld is, suggereert een brede inzetbaarheid over een groot temperatuursbereik van de hoogspanningsvoeding. De vraag is ook of dit zou kunnen leiden tot lagere MPV-waarden. Onze redenering zou dan hierbij kunnen zijn dat de OUS detector in de eerste drie maanden erg geleden heeft onder de experimenten, en de MPV-piek hierdoor naar lagere waarden is verschoven. Dit is niet bepaald waarschijnlijk, want op 12 april is een meting gedaan bij $T = 20$ °C (als controle) en hierbij bleek de delta 9 mV te zijn. Dan heeft de verandering zich wel heel plotseling in 2 weken afgespeeld.
- Verandering van samenstelling van de atmosfeer en/of verandering van samenstelling van de kosmische straling. Dit zou zich dan vertalen in een andere waarde voor de MPV als functie van de tijd. We hebben dit in Figuur 3.70 weergegeven. Dit wijst helemaal niet op een kleine afname van de MPV-waarde zoals door [42] gemeten is in de loop van jaren. Dit is in tegen-

deel een forse toename in enkele maanden.

- Wijzigingen in de configuratie van de opstelling. Met name de hoek die de scintillatoren maken met een horizontaal vlak en ten opzichte van elkaar. Het muon vliegt helemaal door de scintillator en verliest per cm materiaal een vaste hoeveelheid energie. Het totale energieverlies is hierdoor uiteraard afhankelijk van de hoek, waarbij een steilere hoek een grotere afgelegde weg betekent en dus meer energieverlies. De grotere opbrengst vertaalt zich in een MPV-waarde die hoger is. Bij onze opstelling was de configuratie met Scotchtape gefixeerd, en bij de verwisseling zijn de detectoren op het oog op dezelfde positie teruggeplaatst. Beide detectoren zijn niet uitgelijnd en/of uitgericht. Hierdoor kan een verschuiving zijn opgetreden. Of deze verschillen ook kwantitatief tot een dergelijke verschuiving hebben kunnen leiden, moet nader onderzoek uitwijzen.
- Triviale problemen als elektrische doorslag. Bij het verwisselen van de draden zijn de aansluitingen beschadigd en/of in contact gekomen met geleidende materiaal waardoor de PMT niet de goede aanstuurspanning heeft gekregen die noodzakelijk is voor de optimale hoogspanningen. Dit lijkt uitermate onwaarschijnlijk gezien het correct functioneren van de buizen bij deze meetseries en momenteel ook bij het Auger project in Argentinië.

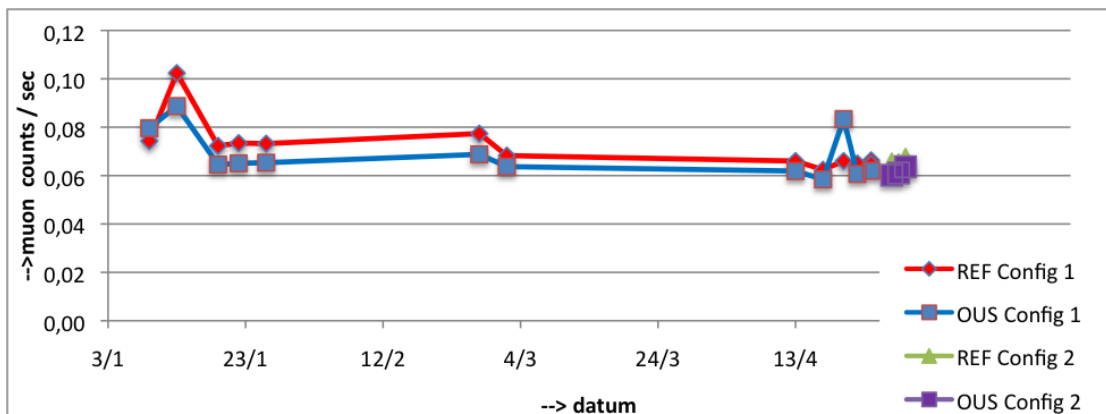


Figuur 3.70: MPV-piekwaarde van de REF scintillator in de tijd gezien. Blauw is de meetreeks van januari 2010 tot april 2010, rood (drie punten) is de controle meting in april 2010 met verwisselde detectoren.

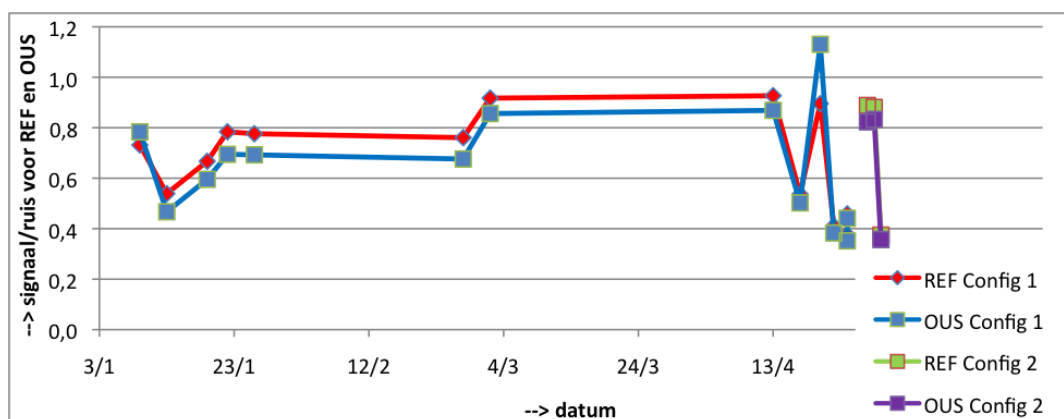
3.5.11 Verslag van alle metingen: event-rate en signaal-ruisverhouding

De grafieken in Figuur 3.71 - Figuur 3.72 tonen de muon event-rate voor de beide detectoren en de signaal-ruisverhouding bij de twee meetseries als functie van de datum (Figuur 3.71 en Figuur 3.72 resp.) en als functie van de temperatuur (Figuur 3.73 en Figuur 3.74 resp.). Bij deze grafieken zijn de volgende opmerkingen te maken:

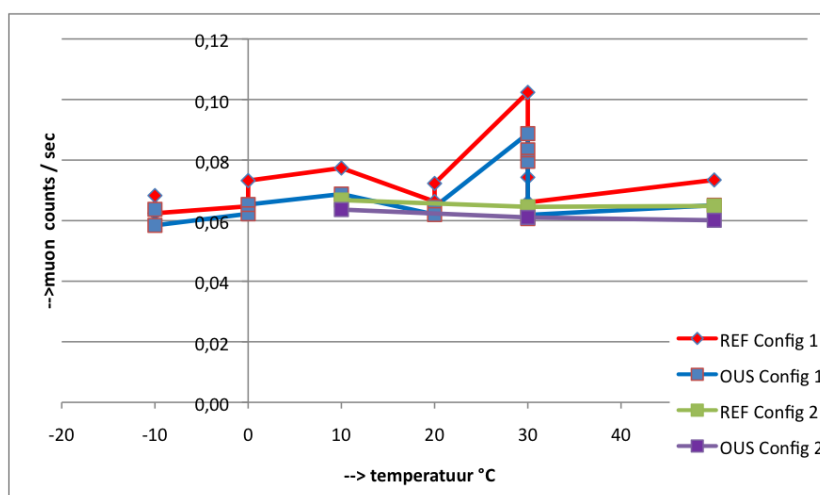
- Het aantal counts per seconde voor REF en OUS is in deze grafieken niet voor 100% gelijk ten gevolge van de verschillende gevoeligheden van de PMT buizen. We definieerden de muon-rate als alles wat een pulshoogte had groter dan 80 mV (zie sectie 3.5.9). We hebben de versnelspanning zo gekozen dat de MPV-waarden op het oog op dezelfde waarden zaten,



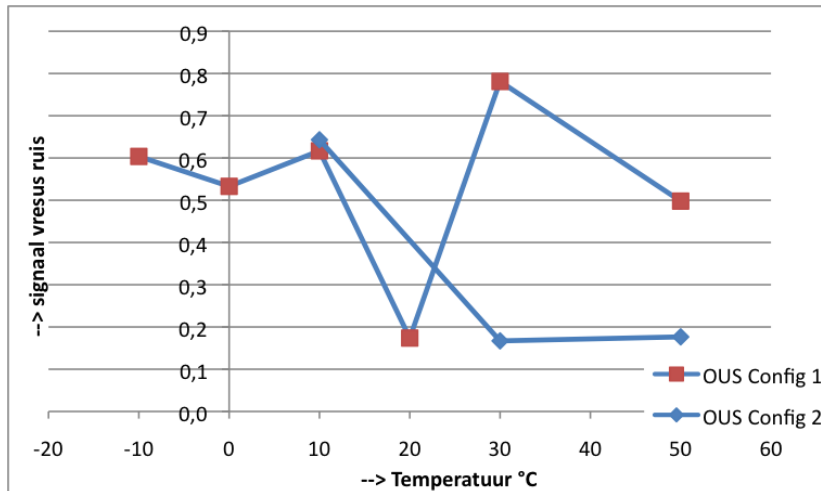
Figuur 3.71: Muon event rate (counts/sec) als functie van de tijd. De oorspronkelijke configuratie is aangeduid met config 1. Config 2 zijn de drie metingen die gedaan zijn voor controle (april 2010). Deze laatste metingen (als vlek zichtbaar) passen goed in de trend. OUS config 1 en OUS Config 2 zijn toegevoegd voor de volledigheid, maar aangezien naast datum ook temperatuur varieert, is de analyse hiervan complex.



Figuur 3.72: Signaal-ruisverhouding bij de REF en OUS scintillatoren als functie van de tijd voor resp. Config 1 - oorspronkelijke configuratie - en de situatie met omgewisselde detectoren (Config 2). OUS config 1 en OUS Config 2 zijn toegevoegd voor de volledigheid.



Figuur 3.73: Muon event rate (counts/sec) als functie van de temperatuur.



Figuur 3.74: Signaal vs. ruis als functie van de temperatuur. Bij elke temperatuur is het gemiddelde van de waarden signaal/ruis genomen. In dit verslag is steeds de kleur rood voor REF gebruikt; hier zijn echter twee OUS grafieken weergegeven (blauw).

maar hebben niet tegelijk gelet (kunnen letten) op de hoeveelheid ruis. In Figuur 3.60 zijn de vormverschillen al goed zichtbaar van de curven, die op het eerste gezicht best met Landouwkrommen gefit kunnen worden maar het duidelijk niet voor 100% zijn.

- De meting van serie 1 is relatief kort en kan beter buiten beschouwing gelaten worden.
- Uit de grafiek in Figuur 3.71 zien we dat de afname in opbrengst voor REF ongeveer 20 % is over een periode van 3 maanden. De linker grafiek in Figuur 3.52 levert een afname van 60 % over 5 jaar. De afname van de opbrengst is op basis van deze metingen flink groter.
- Figuur 3.71 levert niet het bewijs dat er veel materiaal bij de PMT is weggesputterd. Eerder toont het aan dat de opbrengst min of meer constant is.
- De grafiek in Figuur 3.72 toont een min of meer constante opbrengst aan over een toch ruim temperatuursbereik. Leo [49] verwacht voor de PMT gevoeligheid voor fotonen een afname van 0,5 % per graad Celsius, hetgeen over dit bereik een afname van 30% zou zijn. Dit zien we zeker niet terug in deze grafiek. Een min of meer constante opbrengst over een gebied werd ook genoemd in [51].
- Figuur 3.74 is het meest complex. Bij toenemende temperatuur wordt de dark current meestal spectaculair groter, terwijl de opbrengst aan muonen (Figuur 3.73) min of meer constant is. De signaal-ruisverhouding zou dus af kunnen nemen is de verwachting. Om deze conclusie uit deze beperkte set metingen te halen, is niet reëel.

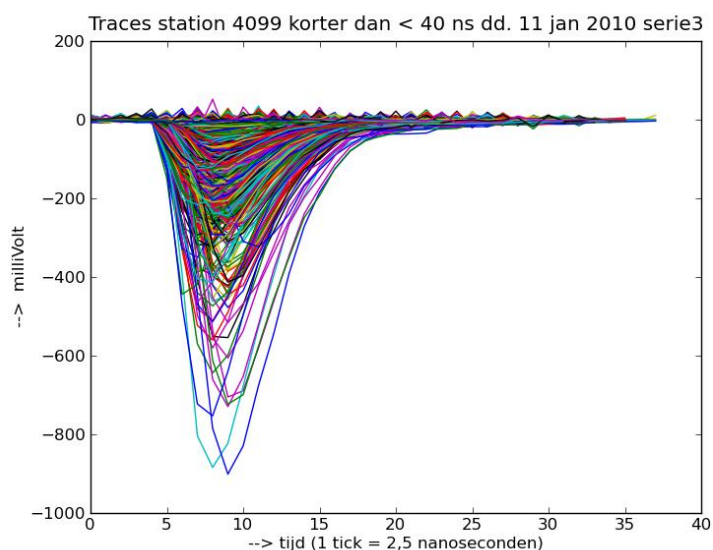
3.5.12 Conclusie

In voorgaande secties hebben we een aantal mogelijke effecten geïdentificeerd die de metingen beïnvloed kunnen hebben. Dit zijn:

- Calibratie problemen.
- Verouderingsproblemen.

- Atmosferische veranderingen.
- Triviale problemen zoals elektrische doorslag.

Helaas kwam de twijfel over de juistheid van de metingen pas in de loop van april 2010 naar boven. De Nijmeegse detectoren waren vanaf einde april niet meer beschikbaar voor controle- en herhalingsmetingen. Ook zijn de traces van de metingen (Figuur 3.75) in het geheel niet bekeken. Met name omdat we niet snel een idee kregen hoe we deze grote hoeveelheid data konden 'analyseren en fileren'.



Figuur 3.75: Voorbeeld plaatje van traces van HiSPARC. Horizontaal staat de tijd in eenheden van 2,5 nanoseconden. Het Python programma kiest zelf de kleuren voor de verschillende traces. Duidelijk is ook waar het zwaartepunt van de traces ligt. Traces met een maximale waarde van > 200 mV zijn dus relatief zeldzaam.

De enige conclusie die we uit sectie 3.5.11 mogen trekken is de conclusie die begin januari al duidelijk was nl. dat bij verhoging van de temperatuur de MPV-waarde sterk stijgt. Welk mechanisme (en dus de verklaring) hiervoor zorgt, is niet verder onderzocht. Andere harde conclusies over het verloop van de opbrengst als functie van de tijd zijn moeilijk te trekken in verband met twijfels over de reproduceerbaarheid van de resultaten.

Vooraf hadden we bedacht dat na de eerste reeks experimenten er geëxperimenteerd zou moeten worden met andere deeltjesbronnen ter verificatie. Hieraan zijn we helemaal niet toegekomen. Meten is weten en aangezien de metingen niet geverifieerd konden worden, zijn we ook niet toegekomen aan de vaststelling welke elementen nu daadwerkelijk temperatuurgevoelig zijn en welke niet.

3.5.13 Aanbevelingen

Voor het vervolgonderzoek op dit gebied:

Er moet er een strikte procedure gevolgd worden of mogelijk zelfs ontworpen m.b.t. de calibratie. Nu neem je langzamerhand ook de verouderingseffecten mee en dat wil je niet.

De calibratie van de kastjes is niet 100%. Gelijke signalen op identieke kastjes zouden hetzelfde beeld

moeten geven. Dit is gebleken niet het geval maar dit heeft geen invloed gehad op onze voortgang. Andere effecten waren nog van meer invloed.

Ten aanzien van algemeen HiSPARC:

De skibox wit kleuren en niet de diepe grijze kleur geven is in ieder geval een verbetering ten opzichte van de bestaande situatie.

Windows XP wordt aangeraden voor de HiSPARC software. Op andere platformen is de DAQ niet getest. Dit is niet meer van deze tijd. XP is hopeloos verouderd en instabiel . Ook met de nieuwere kleine pc's, die standaard worden uitgeleverd met een USB stick met hierop alle HiSPARC software, gebeuren soms nog rare dingen.

De MySQL server is ongeschikt voor het maken van professionele toepassingen. De voordelen (open source, gratis) wegen niet op tegen de nadelen. De problemen die we hadden met de lokale aftap van data, zouden we niet hebben gehad met een robuuste database (bijvoorbeeld ORACLE). De footprint van dergelijke databases is ook niet groter. De documentatie en support van professionele databases is veel beter dan bij programma's als MySQL.

De Nijmeegse detector levert betrouwbare resultaten, waarbij de muon-piek goed gescheiden is van de ruis-bijdragen. Ten opzichte van een standaard HiSPARC scintillator/PMT detector is hij in dit opzicht veel beter. Daarnaast is het grote voordeel de omvang. Voor experimenteren en onderzoek voor HiSPARC is hij daarom beter geschikt dan de standaard scintillator.

De data architectuur van HiSPARC is niet flexibel. Er zijn geen goede aftappunten gedefinieerd, en voor allerlei onderzoek is dit mogelijk vaak gewenst.

Python is een krachtig hulpmiddel bij de data-analyse. Niettemin is SQL als query-taal veel expressiever en veel sneller te aan leren. In combinatie met hoge data-volumina heeft ook SQL bewezen uiterst effectief te zijn. Voor een schoolproject verdient SQL duidelijk de voorkeur, gezien de bekendheid van leerlingen en docenten hiermee.

3.6 MPPC versus PMT



Figuur 3.76: Wim Meeuwsen - Stedelijk Gymnasium Johan van Oldenbarnevelt Amersfoort [52] -

Wim Meeuwsen werkt sinds 1980 in het voortgezet onderwijs. De onderwijservaring begon al wat eerder, tijdens zijn studie gaf hij practicumlessen Sterrenkunde. Na wat omzwervingen buiten het regulier onderwijs (waaronder lessen bij de Rijksbrandweeracademie) geeft hij nu al 22 jaar les op het Stedelijk Gymnasium Johan van Oldenbarnevelt in Amersfoort. Hij geeft daar lessen Natuur- Scheikunde in de onderbouw en lessen Natuurkunde in de bovenbouw. Ook heeft hij een aantal jaren Techniek in de onderbouw gegeven. Elementen uit dat vak zijn nu bij Natuur- Scheikunde gevoegd. In het kader van een LiO onderzoekplaats is gekeken naar alternatieve mogelijkheden voor detectie van de scintillatortpulsen bij de HiSPARC opstellingen zoals ze nu gebruikt worden.

3.6.1 Onderzoeksopdracht

Zou de rol van de photomultiplier buizen (PMT) in de bestaande HiSPARC opstelling overgenomen kunnen worden door halfgeleidertechnologie waarmee fotonen geteld kunnen worden? Hierbij zijn de volgende deelvragen te stellen (in willekeurige volgorde):

- Is de MPPC eenvoudig geschikt te maken voor het tellen van fotonen?
- Hoe functioneren de MPPCs bij verschillende omstandigheden? Ik denk dan aan:
 - Temperatuurswisselingen
 - Variaties in voedingsspanning, regeling daarvan.
- Wat is de invloed van de donkerstroom/dark count op de metingen?
- Is er voldoende energieresolutie te bereiken met de beschikbare MPPCs?

- Is er een goede optische koppeling te maken tussen de MPPC en het scintillatormateriaal?
- Is de huidige HISPARC elektronica bruikbaar (te maken) voor de MPPCs?
- Hoe is response snelheid van de MPPC t.o.v. de PMT?
- Hoeveel MPPCs zijn er nodig per opstelling? Hierbij spelen de volgende zaken een rol:
 - Detectieoppervlak
 - Fotonendichtheid
 - Events vaststellen door coïncidenties.

3.6.2 Introductie

De HISPARC opstelling bestaat tot op heden uit een plak kunststof scintillator materiaal (BC-408 [53]), waaraan een photomultiplier 9107B [54] buis gekoppeld is, via een fishtail van kunststof. Hierbij zie ik een aantal zwakke punten:

- De verbinding van de photomultiplier buis aan het eind van de fishtail is kwetsbaar. Dit speelt vooral bij het bouwen en verplaatsen van de opstelling.
- De buis is op zichzelf kwetsbaar en vrij groot.
- Signaal-ruisverhouding bij de buis is niet gunstig.
- De buis werkt op een hoge spanning (bij de buis rond 1500 V).

Op basis van nieuwe technieken zijn er lichte, compacte halfgeleider detectoren (MPPC [55]) op de markt, die in staat zijn fotonen te tellen. Deze zouden mogelijk een aantal van de zwakke punten van de photomultipliers kunnen wegnemen. In de volgende sectie wordt verder ingegaan op de werking van de MPPC en de photomultiplier.

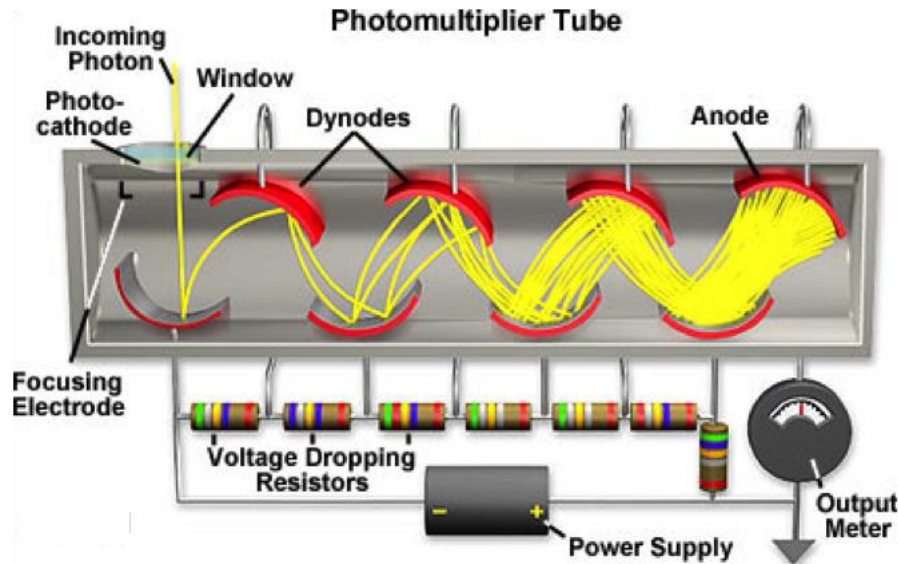
3.6.3 Theorie

Voor de detectie van muonen wordt een organische scintillator gebruikt. Het gaat hierbij om een kunststof waarin de energie van invallende deeltjes leidt tot excitatie. Je moet hierbij onderscheid maken tussen ioniserende en niet-ioniserende werking. Een belangrijk voorbeeld van niet-ioniserend energieverlies is de productie van Bremsstrahlung (remstraling). De energie van de fotonen die in dit proces gecreëerd worden is zo hoog dat ze zonder verdere interactie uit de scintillator ontsnappen.

De detectie van muonen is gebaseerd op ioniserende werking. De hierdoor veroorzaakte excitatie vindt overal langs het spoor van het muon plaats. Een geringe concentratie van een effectieve organische scintillator is aan de kunststof toegevoegd. Deze scintillator geeft een emissie van fotonen. Ook andere geladen deeltjes (bijvoorbeeld elektronen) zullen excitatie en scintillatie veroorzaken en dus gedetecteerd worden. Het is dus niet zeker dat alle gedetecteerde deeltjes muonen zijn. Dit is een probleem dat inherent is aan de gebruikte detectietechniek. De eigenschappen van de gebruikte scintillator zijn terug te vinden in tabellen en specificatie sheets [53, 56].

Voor de detectie van de fotonen wordt nu gebruik gemaakt van photomultipliers. Bij een photomultiplier wordt gebruik gemaakt van het foto-elektrisch effect. Fotonen vallen op een fotokathode (Figuur

3.77) waar elektronen worden losgemaakt. De foto-elektronen worden versneld en gefocusseerd op de eerste dynode, waar ze worden vermenigvuldigd door secundaire elektronen-emissie. Bij de volgende dynodes herhaalt dit proces zich. Het aantal dynodes en de spanning over de buis bepaalt de versterking.



Figuur 3.77: Schematische weergave van de mechanische- en elektrische onderdelen en signaalversterking in een 'photomultiplier tube' (PMT).

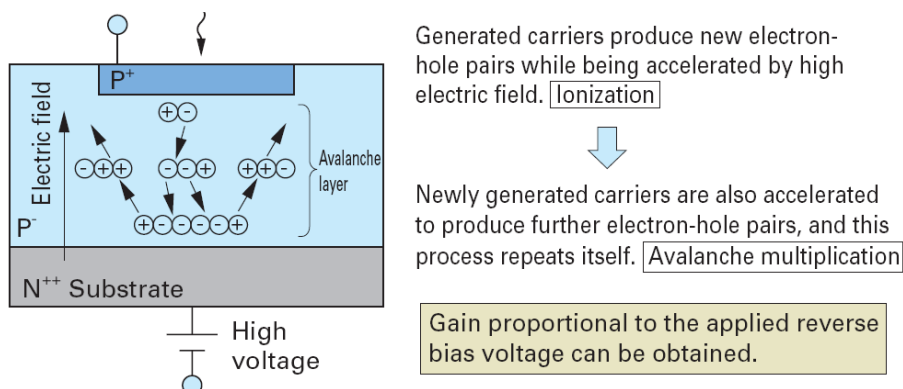
Een fotonenpuls van 1 - 1000 fotonen wordt omgezet in een bruikbare stroompuls. Hierbij geeft een typische scintillatorpuls 10^7 - 10^{10} elektronen bij de anode. Hierbij is de totale lading in de stroompuls recht evenredig met het aantal geproduceerde foto-elektronen aan de kathode. Het aantal foto-elektronen is evenredig met het aantal opvallende fotonen met voldoende energie. De vorm van de puls komt niet helemaal overeen met de vorm van de fotonenpuls van het scintillatiekristal, door verschillen in afgelegde weg van elektronen binnen een PMT. Volgens Knoll [56] (blz 274) blijft veel van de timing informatie van de oorspronkelijke lichtpuls wel bewaard.

Een MPPC (Multi Pixel Photon Counter) is een silicium photomultiplier. Een MPPC-diode is opgebouwd uit een groot aantal parallel geschakelde diodes (tot 14400). Deze diodes staan in sperrichting geschakeld. Daarbij bevat elke diode een kleine hoeveelheid lading (vanwege de capaciteit van de diode) bepaald door de grootte van de diode en de 'reverse-bias' spanning.

Bij gebruik van een MPPC-diode wordt gebruik gemaakt van het Geiger-effect in een halfgeleider. Over de diode is een zodanig hoge spanning (rond de 70 V) aangelegd dat bij invallen van een foton een 'avalanche-effect' optreedt. De diode ontlad zich en er is een stroompuls te meten. Deze stroompuls is voor één pixel (Figuur 3.78) onafhankelijk van het aantal fotonen dat op het pixel valt.

Bij gelijktijdige fotonen op verschillende pixels ontstaat een hogere puls, de som van de pulsen van de afzonderlijke pixels. Die hogere stroompuls resulteert dan ook in een hogere spanningspuls over een weerstand in serie met de diode. Bij een grote lichtstroom zullen er pixels zijn die door meerdere fotonen tegelijk getroffen worden. Dit is te corrigeren. Dit vermindert dan wel de nauwkeurigheid van het tellen. Omdat de MPPC niet gebruikt zal worden om grote aantallen fotonen te meten, zullen we

daar weinig hinder van hebben.



Figuur 3.78: Schematische weergave van een 'avalanche diode'. De halfgeleider is gedoteerd met p+, p en n materiaal. Door een 'teggengestelde' biasspanning aan te leggen ontstaat een depletie laag die geen vrije ladingsdragers meer bezit.

Pixels kunnen ook spontaan 'vuren'. Hierbij zal meestal de pulshoogte niet groter zijn dan die overeenkomt met één foton. Door de grenswaarde van de te meten pulsen op een waarde te stellen die overeenkomt met de spanning van een 1,5 p.e. (photo-electron) kan de 'dark count' verminderd worden. Hamamatsu [55] geeft aan dat bij het verhogen van de grenswaarde van 0,5 p.e. (waarbij je dus alles meet) tot 1,5 p.e. de dark count verandert van 200 kcps naar 5 kcps (bij 25 °C en 69,8 V). Deze gegevens gelden voor een MPPC met een oppervlak van 1 x 1 mm² en 400 pixels.

Dit zou betekenen dat in het voorbeeld 2,5% van de dark count hogere pulsen geeft dan die overeenkomt met één foton. Naarmate de spanning over de MPPC groter wordt neemt dat percentage toe (bij 25 °C en 70,8 V is het 5%). De stroompuls bevat $2,75 \cdot 10^5 - 2,4 \cdot 10^6$ elektronen voor één foto-elektron (afhankelijk van type MPPC), dus $4,4 \cdot 10^{-14} \text{ C} - 3,8 \cdot 10^{-13} \text{ C}$. Bij een pulsduur van 8 ns [55] geeft dat bij de gebruikte MPPC een spanningspuls van maximaal 0,55 mV over een weerstand van 50 Ω. Dit is te weinig om over een coax-kabel te sturen en moet dus versterkt worden door een opamp achter de diode.

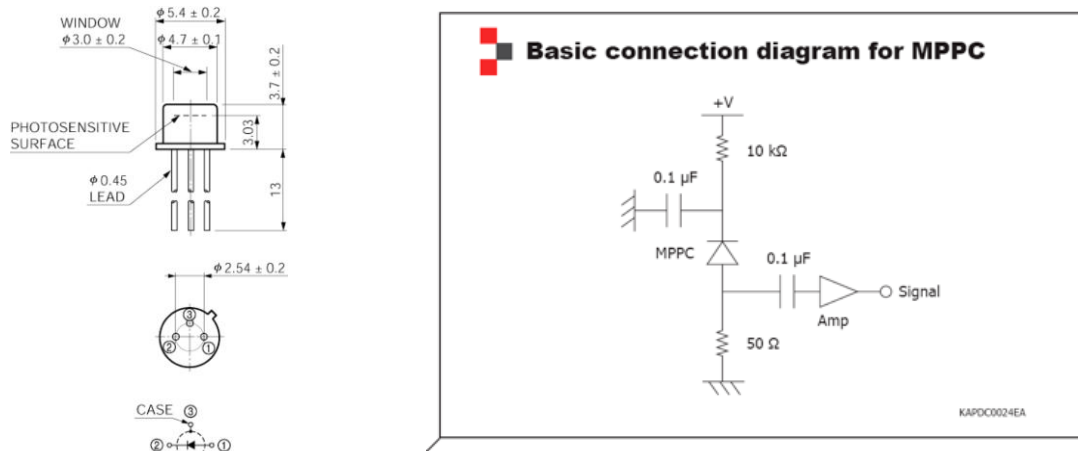
Belangrijk is dat de gevoeligheid van de diode afhankelijk is van de aangelegde spanning en de temperatuur. Hiervoor zijn de gegevens van de fabrikant te raadplegen [55].

3.6.4 Uitgevoerde experimenten

De eerste experimenten en berekeningen zijn vooral bedoeld om te kijken of een MPPC überhaupt bruikbaar zou kunnen zijn (feasibility study). In Nijmegen was een doosje beschikbaar met daarin een MPPC van 1x1 mm van het type S10362-11-050U (Figuur 3.79). Aan het typenummer is de opbouw van de diode te zien: - 11 - betekent dat het detectoroppervlak 1x1 mm is, - 050 - geeft de lengte van een zijde van een pixel in µm en U geeft het type behuizing aan.

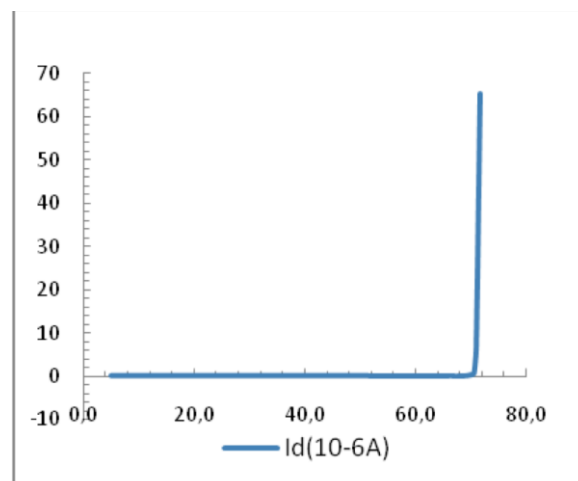
In het doosje uit Nijmegen was het rechter deel van het elektrische schema van Figuur 3.79 – de versterker - weggelaten, en direct met een meetuitgang verbonden. Dit is het punt tussen de weerstand van 50 Ω en de anode van de diode. Met deze schakeling werd in eerste instantie geprobeerd een

signaal op een oscilloscoop te krijgen. In de eerste opstelling ontladde de diode zich over een weerstand van 50Ω . Een serie weerstand van $10 \text{ k}\Omega$ beperkt de totale stroom door de diode. Het signaal kon worden afgelezen op een oscilloscoop.



Figuur 3.79: Behuizing en afmetingen van de MPPC (links); rechts het elektrische (principe) schema.

De werkspanning van de diode is volgens de opgave 69,69 Volt. Boven de werkspanning gaat de diode weer enigszins geleiden vanwege spontaan ontstane elektron-gatparen die tot avelanches leiden. Dit leidt tot een donkerstroom (dark-current) die sterk oploopt met de aangelegde spanning. De diode moet zo ingesteld worden dat de donkerstroom praktisch nul is. Deze stroom zal ook temperatuurfankelijk zijn. In eerste instantie werd de waarde van de donkerstroom bij verschillende spanningen gemeten (Figuur 3.80).



Figuur 3.80: Donkerstroom door de MPPC-diode als functie van de 'reverse bias' spanning.

Boven de opgegeven werkspanning van 69,69 Volt blijkt de donkerstroom sterk toe te nemen (van $0,1 \mu\text{A}$ tot meer dan $60 \mu\text{A}$ bij een spanningstoename van 69,1 V tot 71,6 V). De beste werkspanning zal liggen op dat punt waar de donkerstroom net niet sterk begint toe te nemen. Als dan een foton een elektron-gatpaar veroorzaakt ontstaat er een 'avalanche'.

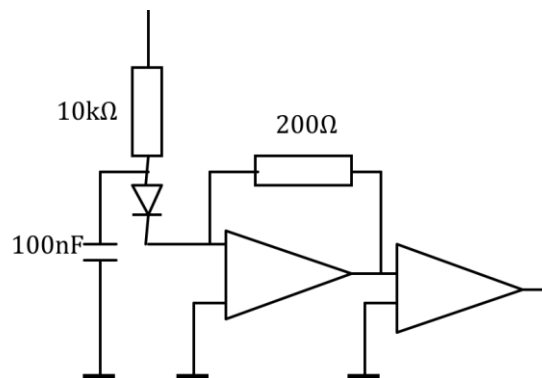
Soms vindt er ook spontaan een lawine plaats binnen een pixel, dit geeft dan een puls die dus niet veroorzaakt wordt door een foton. Dit is de zogenaamde 'dark count'. Hierbij gaat het om een statis-

tisch proces, waarbij meestal één pixel vuurt (zie sectie 3.6.3). De eerste experimenten werden gedaan zonder lichtbron, met het kastje in verduisteringsmateriaal gepakt. Dit bleek nodig i.v.m. de hoge gevoeligheid van de MPPC.

In het kastje is later ook een LED gebouwd, die met een pulsgenerator aangestuurd wordt. De pulsgenerator wordt ingesteld op zo kort mogelijke pulsen. Tevens wordt de spanning op de laagste waarde ingesteld waarbij de LED nog werkt. Op die manier hopen we pulsen te krijgen waarvan niet al te veel fotonen de MPPC zullen bereiken, zodat afzonderlijke fotonen waar te nemen zijn. De LED staat niet direct op de MPPC gericht. Als we gaan meten blijkt dat het signaal zo laag is dat versterking nodig is, dit was te verwachten volgens de theorie.

3.6.5 Aanpassing van de schakeling

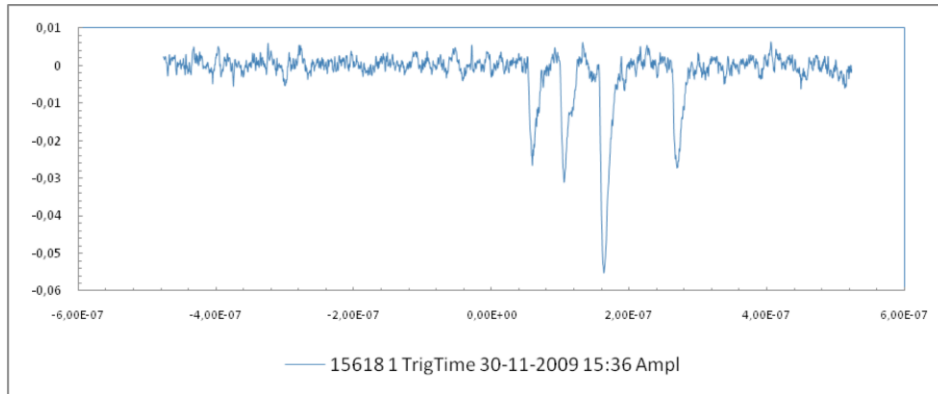
Gezien de te verwachten hoogte van de spanningpulsen bij enkele fotonen is versterking nodig, vóór de aansluiting op de coaxkabel. De afdeling elektronica verandert de schakeling in een heel net plaatje, met twee ingebouwde op-amps (Figuur 3.81).



Figuur 3.81: Versterker voor MPPC signaal met twee op-amps.

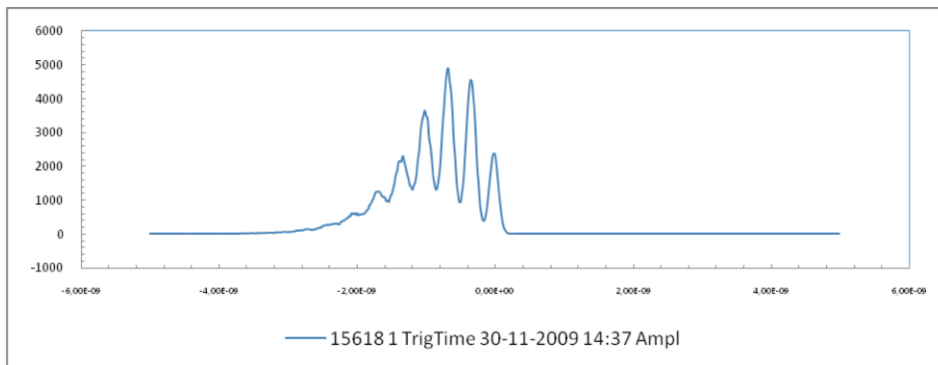
De eerste op-amp zorgt voor een stroom-spanningsomzetting (transimpedantieversterker), de tweede voor een spanningversterkingsfactor van 15,5. Omdat de versterker vlak achter de diode zit werkt alles veel beter. Door de compacte bouw is er minder hinder van HF stringen (in de eerste schakeling bleek de puls die aan de LED gegeven werd ook zichtbaar in het uitgangssignaal van de MPPC). Berekeningen geven nu aan dat gemeten signalen af kunnen komen van één of enkele fotonen en weer wordt een histogram gemaakt (Figuur 3.82). De pulsen die gemeten worden zijn nu korter. In het beeld van de pulsen van de MPPC is goed te zien dat er pulsen met verschillende oppervlakken en hoogten te zien zijn. Horizontaal is de tijd uitgezet in s. Er is telkens getriggerd op de puls van de LED. Dit is één voorbeeld van een signaal. Andere signalen hebben vergelijkbare eigenschappen. Er zijn 4 pieken te zien. Berekening geeft dat drie ervan door één foton per piek gemaakt is, de grote door twee fotonen. De lengte in de tijd van een puls klopt ook beter met de fabrieksopgave.

Op een LeCroy Waverunner 6030 oscilloscoop wordt een histogram gemaakt. Dit histogram laat zien dat van één tot zeven fotonen geteld worden. Uit de afstand van de fotonpieken (zie Figuur 3.83) wordt de versterking bepaald die goed overeenkomt met de specificaties ($6,7 \cdot 10^5$). Het histogram van deze signalen laat een verdeling in fotonen zien.



Figuur 3.82: MPPC-pulsen in de tijd gemeten met de nieuwe versterker.

Uit de afstand van de piekjes van de fotonen ($3,5 \cdot 10^{-10}$ Vs) met een weerstand van 200Ω en een versterkingsfactor van 15,5 van de tweede op-amp, is de versterkingsfactor van de MPPC te bepalen. Dit komt met $7,0 \cdot 10^5$ vrijwel exact overeen met de opgegeven waarde van de fabrikant. De meest rechtse piek is 'nul' (ruis). Op deelvraag 1: 'kunnen we eenvoudig fotonen tellen?' is het antwoord dus bevestigend.



Figuur 3.83: Uit de MPPC-pulsen wordt de fotonverdeling afgeleid.

'Is er ook voldoende energieresolutie te bereiken?' De energieresolutie van de detector bepaalt voor een deel hoe goed de analyse van een shower event is. Met een groter oppervlak zal de PMT in het voordeel zijn. Het is de vraag of andere factoren het uiteindelijke resultaat niet zodanig beïnvloeden dat die belangrijker zijn. Een vergelijking van de twee detectoren leert het volgende.

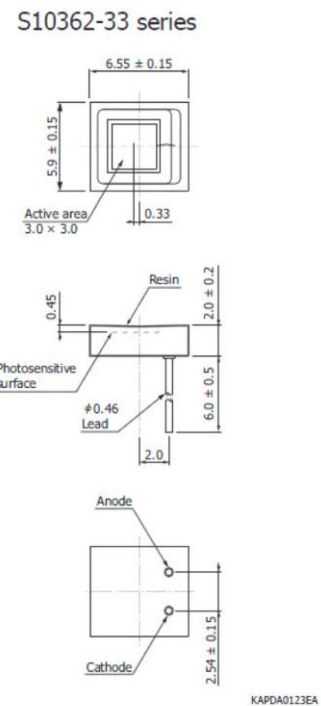
Op de PMT vallen (gemiddeld) zo'n 400 fotonen per event. Dit is uit te rekenen uit specificaties van de scintillator (zie verder) en de afmetingen ervan en uit gegevens van David. Dit resulteert in gemiddeld 112 foto-elektronen in de fotokathode. Het maximale verlies in het scintillatormateriaal bedraagt 3,7 MeV, dus de maximale resolutie zou dan zijn $3,7 \text{ MeV}/112 = 34 \text{ keV}$ op een energieverlies van 3,7 MeV in het scintillatormateriaal. We gaan er dan van uit dat je één foto-elektron verschil bij de kathode kunt waarnemen (dat lijkt me optimistisch). De oppervlakte van de een PMT is ongeveer 440 mm^2 , de MPPC is maar 1 mm^2 groot. In vergelijking met de ongeveer 440 mm^2 van een PMT-buis is dat klein. Hoewel de kwantumefficiëncy van de MPPC hoger is (0,7), lijkt het lastig de benodigde resolutie te bereiken.

De van Hamamatsu gekregen MPPC, S10362-33-100C (Figuur 3.84) is 9 mm^2 en haalt daarmee een hogere resolutie. We gaan rekenen aan de fotonenopbrengst met gespecificeerde gegevens van scintillatormateriaal [53], PMT en MPPC. Dit resulteert in een berekening van Jos Steijger [57] dat resultaten geeft die behoorlijk overeenkomen met wat ik gevonden heb met behulp van Knoll [56]. De resolutie van de MPPC is volgens deze berekening een factor 15 slechter dan die van de PMT. Met behulp van een simulatie zullen we moeten uitzoeken of dit te slecht is voor nuttig gebruik in de opstelling. De berekening verloopt als volgt. In Nal geeft 1 MeV energieverlies van een invallend muon ongeveer een opbrengst van $4,3 \cdot 10^4$ fotonen met een golflengte van gemiddeld 420 nm. Met een dikte van 2,07 cm (huidige batch gemeten) is het energieverlies ongeveer 3,7 MeV. De lichtopbrengst van BC-408 is 64% van anthraceen. Nal heeft ten opzichte van anthraceen een opbrengst van 230%. Dit geeft in de gebruikte scintillator een fotonenproductie van $64/230 \cdot 4,3 \cdot 10^4 \cdot 3,7$ (omrekenen Nal naar de scintillator BC-408).

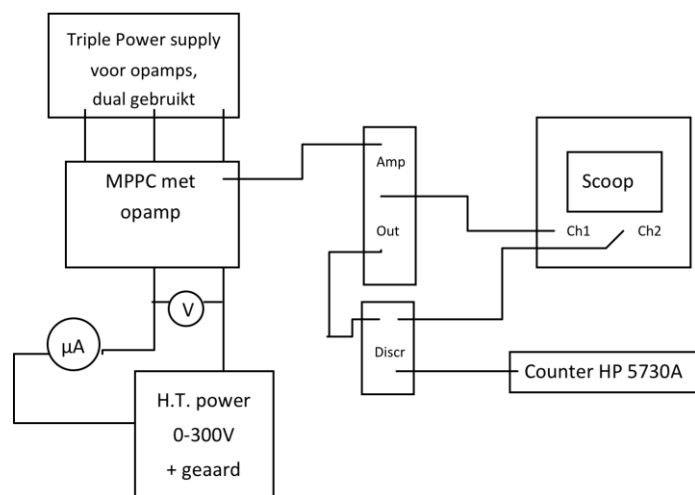
Transmissie naar uiteinden ongeveer 28% [57] geeft ongeveer $1,2 \cdot 10^4$ fotonen op een zijkant van de scintillator, ongeveer 120 fotonen per cm^2 . De kleine MPPC zou op zijn gunstigst ongeveer 1 foton per event ontvangen (dus geen bruikbare resolutie), de grote ongeveer 10 waar gemiddeld 6 pixels door zullen 'vuren'. We concluderen dat de grotere MPPC nog mogelijkheden bezit.

3.6.6 Metingen aan MPPC S10362-33-100C

Bij kamertemperatuur is voor verschillende werkspanningen van de diode de donkerstroom gemeten (Figuur 3.85), bij elke waarde van de werkspanning is een serie gemeten van de dark-count als functie van de drempelspanning.

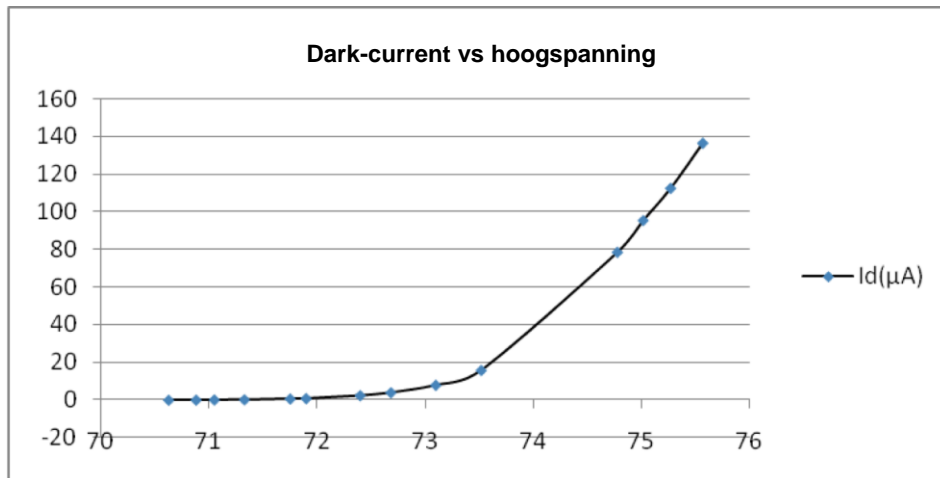


Figuur 3.84: Hamamatsu MPPC.



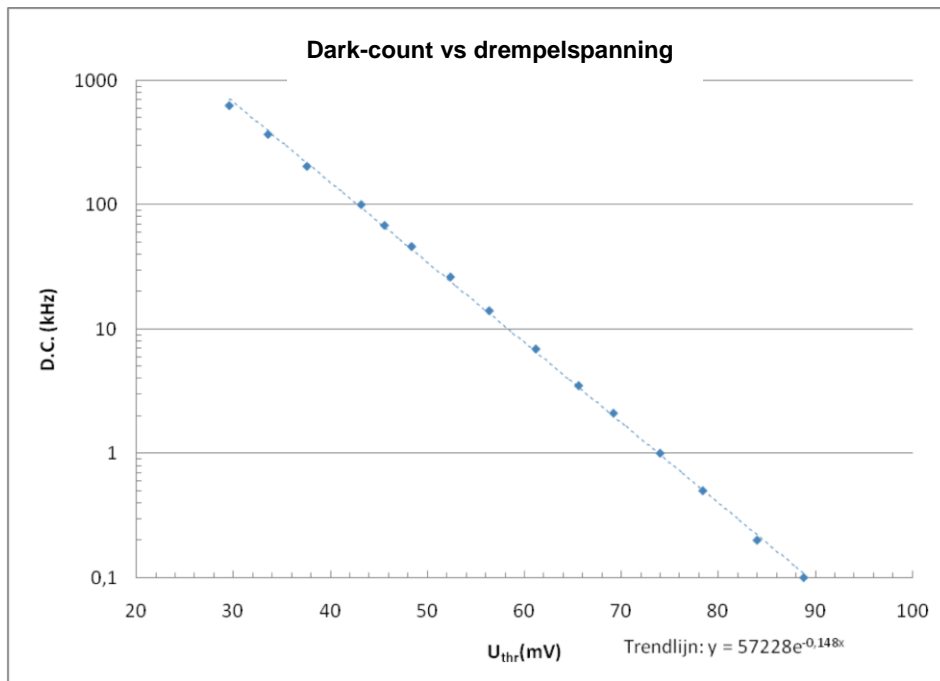
Figuur 3.85: Meetopstelling voor het analyseren van de MPPCs.

De donkerstroom door de schakeling wordt gecorrigeerd voor de (donker)stroom door de voltmeter (ingangsimpedantie 10 M Ω). Die gecorrigeerde stroom wordt uitgezet in grafieken. Dat geeft een grafiek voor de donkerstroom zoals weergegeven in Figuur 3.86.



Figuur 3.86: Donkerstroom (μ A) in de MPPC als functie van de hoogspanning (V) gemeten bij een vaste drempelwaarde.

Ook wordt de donkertelling als functie van de drempelspanning bepaald. De trend van die metingen lijkt 'typisch' een vallende exponentiële functie (zie Figuur 3.87, bij een hoogspanning van 70,814 V).

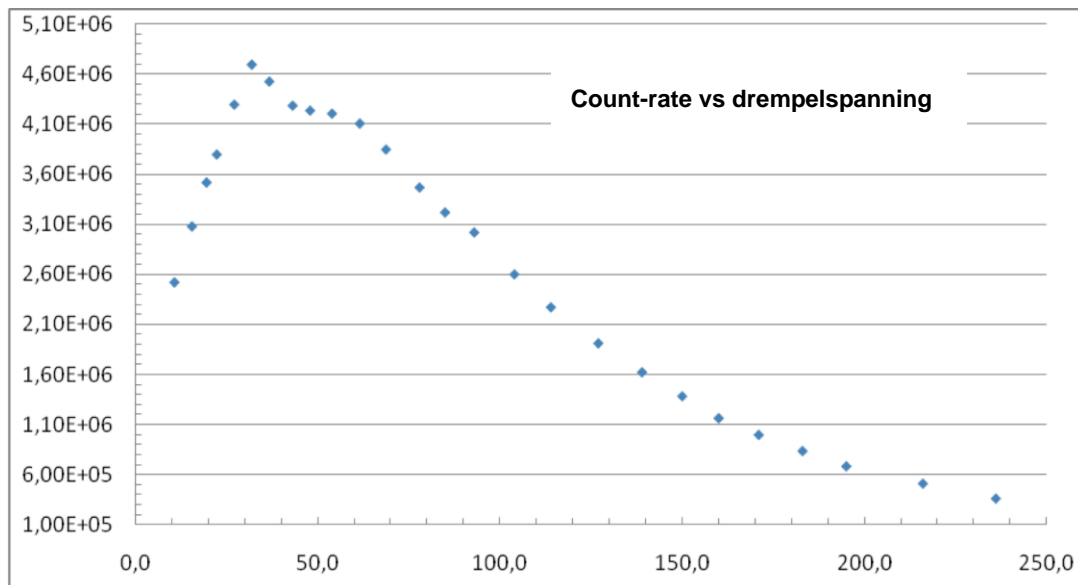


Figuur 3.87: De dark-count (kHz) gemeten als functie van de drempelspanning (mV) bij een vaste hoogspanning van 70,814 V.

We hebben gemeten voor spanningen tussen 70,562 V en 71,213 V. De discriminator kan niet lager worden ingesteld dan op een drempel van ongeveer 30 mV. Om ook bij lagere drempels te kunnen meten zoeken we een andere discriminator voor de volgende keer.

3.6.7 Temperatuur invloed

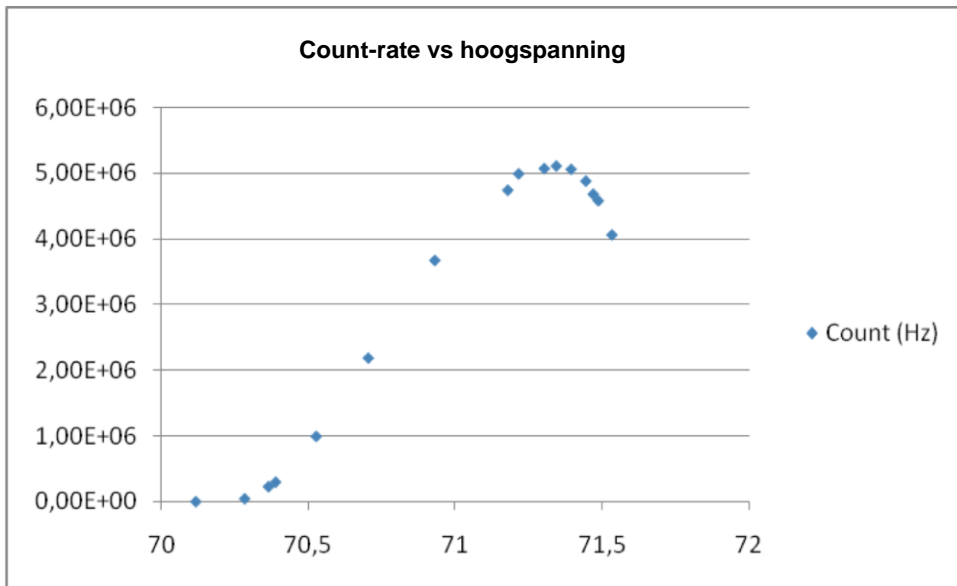
Vanaf 1 februari 2010 worden de metingen voortgezet in de klimaatkast. De kast wordt lichtdicht gemaakt en op lichtdichtheid getest. We houden nu temperatuur en vochtigheid in de hand. We meten bij 18°C en bij 10°C. We gebruiken een LeCroy 428F versterker, Nikhef HIV discriminator en LRS 622C coïncidentie unit. Onder een drempelspanning van 30 mV neemt de count-rate weer af (Figuur 3.88), terwijl je meer verwacht. De count-rate is gemeten bij een hoogspanning van 70,925 V en uitgezet tegen de drempelspanning.



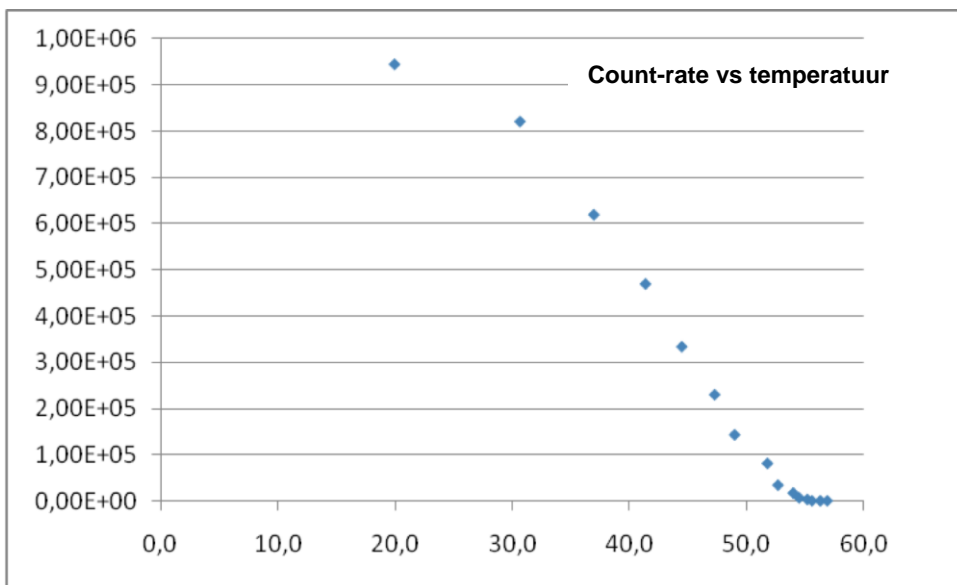
Figuur 3.88: Bij een hoogspanning van 70,925 wordt de count-rate gegeven als functie van de drempelspanning.

Het blijkt dat bij veranderende temperatuur de offset verandert. Bij nader inzien blijken ook spanning en count-rate invloed op de offset te hebben. Bij veranderende offset is de ingestelde drempel niet meer de werkelijke drempel en veranderen de resultaten. Hierdoor zijn de tellingen bij lage drempels niet goed. Het blijkt belangrijk de offset goed constant te houden. Bij verdere metingen houden we de offset van de versterker constant en meten hem op de oscilloscoop. Zo blijven we uit de elektronische ruis. Er wordt een aantal metingen gedaan bij verschillende temperaturen. De verzadiging van de vorige keer wordt niet meer terug gezien. Bij verschillende hoogspanningen wordt gemeten; de lijnen volgen mooi een exponentiële trend.

Vervolgens wordt bij verschillende (constante) offsetspanningen, dark-rate en dark-current gemeten. Er blijkt een plateau in de dark-rate te zitten. Bij hoge spanningen loopt de rate niet meer op, neemt zelfs wat af. Dit gebied ligt boven het gebied waarin we willen werken. De spanning moet wel nauwkeurig afgeregeld worden; het gebied waar het verschijnsel optreedt, ligt tussen 70 en 71,5 Volt (bij 20 °C). Onder 70 V werkt de diode niet, boven de 71,5 duikt het plateau weer omlaag. Plateaus worden als functie van de hoogspanning gemeten voor drempels van 19,8 mV tot 55,7 mV. In Figuur 3.89 wordt het 'typische' gedrag van de count-rate gegeven als functie van de hoogspanning bij een drempel van 19,8 mV bij kamertemperatuur. Ik heb de temperatuur laten oplopen tot 60 °C (Figuur 3.90).



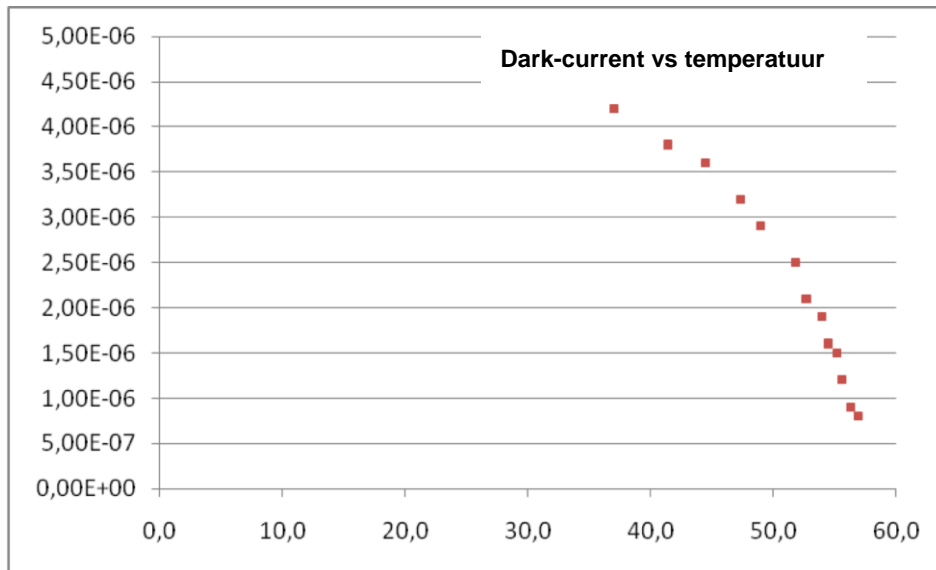
Figuur 3.89: De count-rate (Hz) gemeten als functie van de hoogspanning (V) bij een vaste drempelspanning van 19,8 mV.



Figuur 3.90: De count-rate (Hz) gemeten als functie van de temperatuur (°C) bij een vaste hoogspanning.

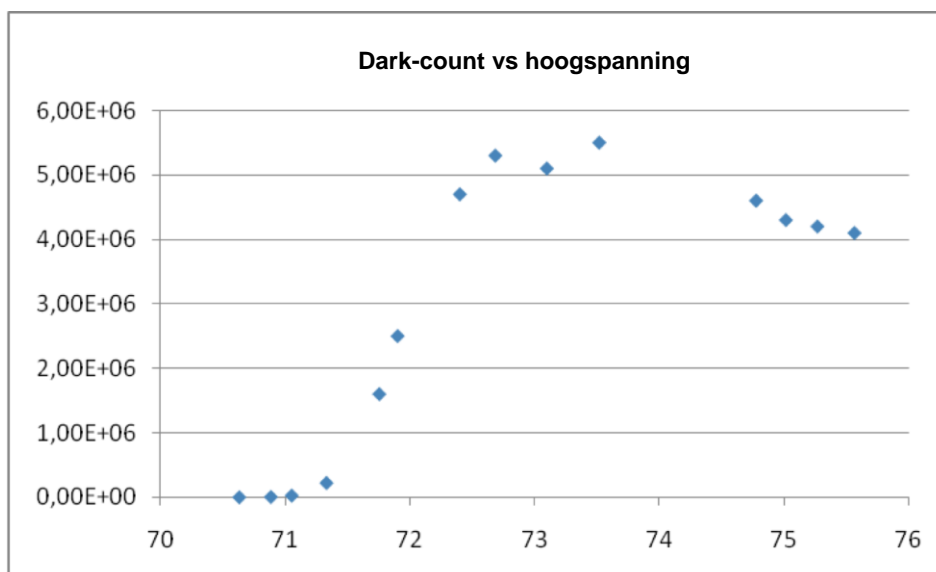
Bij stijgende temperatuur blijkt de stroom door de diode af te nemen (Figuur 3.91) evenals de donkertelling. De diode staat dan niet meer in het goede werkpunt. De spanning over de diode moet verhoogd worden om hem te laten werken. Dan neemt stroom en donkertelling ook weer toe.

Het gedrag bij hogere temperaturen is vergelijkbaar met dat bij 20 °C. De spanning waarbij de dark-count begint op te lopen ligt wel hoger en de maximale waarde van de dark-count ligt hoger. Er is gemeten in een gebied van -20 °C tot 60 °C. In dit gebied lijkt de MPPC volgens verwachting te reageren. De dark-count ligt hoog. Naar verwachting kan die omlaag gebracht worden door met twee MPPCs te meten en coïncidenties te meten. Verwachting is dat de dark-count dan daalt (telt immers alleen als beide diodes 'vuren') en lichtpulsen duidelijker te zien zijn.

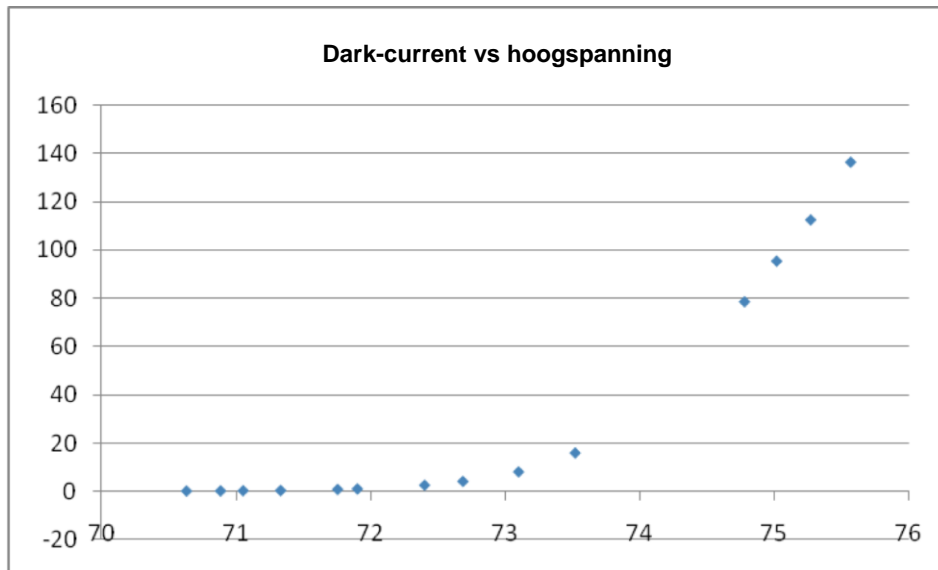


Figuur 3.91: De dark-current (A) gemeten als functie van de temperatuur (°C) bij een vaste hoogspanning.

Er worden twee identieke schakelingen gebouwd waaraan donkerstroom, donkertelling en reageren op lichtpulsen in coïncidentie gemeten worden. Beide MPPCs geven hun signaal geven door aan een discriminator. De twee discriminatoren worden aangesloten op de ingang van een AND-poort. De AND-poort geeft zijn pulsen af aan de teller en triggert de oscilloscoop. De tweede MPPC (ook gekregen van Hamamatsu) lijkt wat gevoeliger en heeft een iets hogere spanning nodig (71,01 V tegen 70,94 V). Hij lijkt zich in eerste instantie ongeveer gelijk te gedragen als de eerste, op een wat onrustiger gedrag bij hogere voedingsspanningen en een wat anders oplopende donkerstroom (minder scherpe knik in grafiek) na. Later blijkt er een fout in de elektronica voor deze MPPC te zitten. In Figuur 3.92 (dark-count vs hoogspanning) en Figuur 3.93 (dark-current vs hoogspanning) dan ook alleen de grafieken voor MPPC 1.



Figuur 3.92: De dark-count (Hz) gemeten als functie van de hoogspanning (V) bij een vaste drempelspanning.



Figuur 3.93: De dark-current (μA) gemeten als functie van de hoogspanning (V) bij een vaste drempelspanning.

3.6.8 Coïncidenties

Bij het meten aan coïncidenties worden beide schakelingen door dezelfde hoogspanning gevoed. Het kleine verschil in de werkspanning van de MPPCs wordt opgevangen door enkele Si-diodes in serie te zetten met de voeding van de MPPC die de laagste spanning nodig heeft. Dit levert bij de lage werkstroom (een paar) tienden van Volts op en lijkt genoeg. Wat proberen geeft dat 5 diodes in serie zetten werkt.

Het meten van coïncidenties verlaagt de dark-count behoorlijk, hoewel berekeningen aan count-rates van beiden en pulsbreedte van de discriminatoren een factor 2 kleinere count-rate zouden geven. Als $f_1 = 4,69 \text{ MHz}$ en $f_2 = 3,4 \text{ kHz}$ (gemeten waarden) geeft dat (onder de aanname dat de pulsen willekeurig in de tijd zijn verdeeld) met een gemiddelde breedte van de discriminatorpuls van 20 ns een verwachte coïncidentiefrequentie van $3,4 \cdot 10^3 \cdot 4,69 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-9} = 3,2 \cdot 10^2 \text{ Hz}$. We meten een frequentie van $5,2 \cdot 10^2 \text{ Hz}$. Dit is wat te hoog. Het lijkt nog niet iets om de alarmklok over te luiden.

Na reparatie, geeft het meten van coïncidenties nu een lagere donkertelling (dark-count) en een count-rate van lichtpulsen die goed overeenkomt met dat wat de pulsgenerator geeft. Gezien het feit dat de diodes zo gevoelig zijn heb ik geprobeerd de diodes aan scintillatormateriaal te koppelen. Beide diodes zijn in afzonderlijke kastjes gebouwd met aansluitingen die passen op de glasvezels van bestaande scintillatorplaatjes die voor calibratie van PMTs gebruikt worden.

Deze plaatjes werden blootgesteld aan een Ruthenium-bron, die elektronen tot $3,5 \text{ MeV}$ uitzendt. In eerste instantie werden twee photomultiplier buizen (PM 2615 en PM 2431) gebruikt om de respons van de scintillator te meten. De scintillatorplaatjes hebben de afmetingen $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. Er lopen 6 vezels door, die het licht geleiden. De PMTs reageren daarop, het blijkt lastig coïncidenties te meten. Het blijkt dat het verplaatsen van de bron over de plaat veel verschil maakt. De scintillatoren werken niet goed. Er blijkt ook verschil tussen de scintillatoren onderling. Het meten van coïncidenties blijkt bemoeilijkt te worden door de opbouw van de detector. De gebruikte detectoren hebben ook PVC-

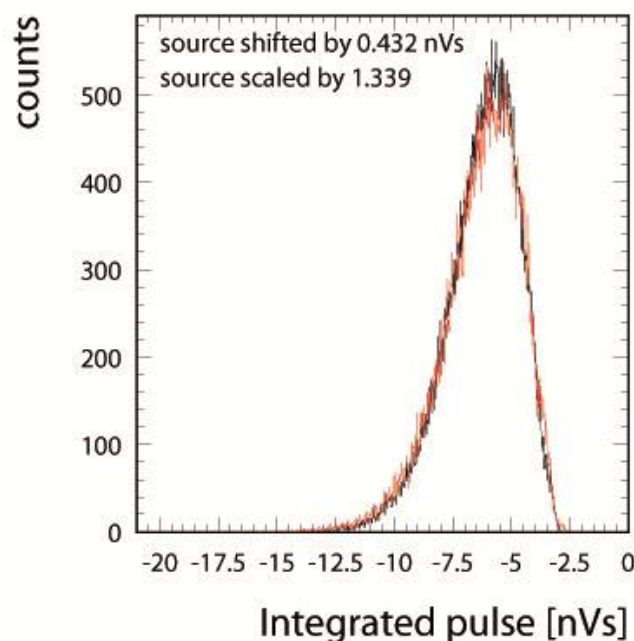
plaatjes en Al-folie om het detectormateriaal zitten. Dit maakt dat de straling diep genoeg doordringt (gecontroleerd met Geigerteller). De Geigerteller laat zien dat er wel wat straling doordringt, maar wat weinig. Genoeg evenwel om een paar 100 Hz coïncidenties te kunnen maken. De scintillators zijn echter erg inefficiënt (e.p.s ongeveer 0,1% voor coïncidenties dus $e.p.s^2 = 10^{-6}$). Bij het gebruik van twee detectoren boven elkaar is dus niet met coïncidenties te meten.

Hoewel ik er niet veel van verwacht, sluit ik toch de MPPC aan op een detector. Bij het meten aan de simpelste detector (een plaatje van 20 bij 3 cm met één vezel) blijkt de MPPC te reageren op de aanwezigheid van de bron. Dit betekent dat het licht van het scintillatiemateriaal gedetecteerd kan worden. Het is in eerste instantie een verhoging van de telling, waarbij de signaal/ruisverhouding tamelijk bedrevend is.

Op zijn best is de verhoging van het signaal ongeveer 20 kHz op een donkertelling van 650 kHz. De resultaten zijn uiteindelijk reproduceerbaar voor beide MPPCs en beide detectoren. Hierbij blijkt het plaatsen van de bron op het midden van een detector het beste resultaat te geven. Omdat de plaatjes die nu gebruikt worden dunner zijn, wordt nog een keer geprobeerd met coïncidenties te meten. Dit lukt niet.

Een aantal dagen worden alle drie de MPPCs helemaal doorgemeten met en zonder bron. Ook wordt geprobeerd een spectrum te maken en uitgebreidere metingen aan de pulsen te doen. Bij de 1x1 zijn de spectra met en zonder bron niet verschillend, de tellingen wel. Bij de 3x3 is het spectrum op het oog anders. Uit de metingen aan de pulsen blijkt het volgende:

- De offset varieert; bij de 3x3 is die $10,3 \pm 0,6$ mV, bij de 1x1 is die $4,7 \pm 0,6$ mV.
- De τ van de dalende flank van de 3x3 is 42 ± 9 ns, bij de 1x1 is dat $6,7 \pm 0,8$ ns.

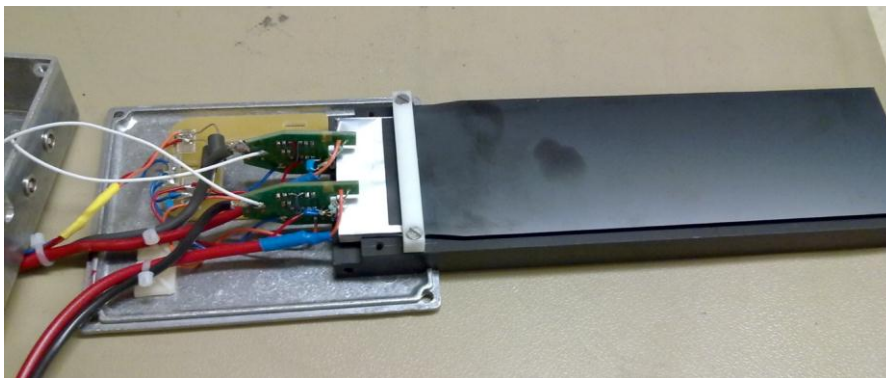


Figuur 3.94: Integralen met en zonder bron komen overeen (pulsen geïntegreerd over de tijd, gemeten met de '3x3' sensor).

Als rekening gehouden wordt met de variërende offset, is het spectrum van de 3x3 met bron niet wezenlijk anders dan zonder. Jos toont aan dat het spectrum met bron iets verschoven is (door andere offset) en iets hoger. Als je dat gaat verrekenen, dan komen beide grafieken overeen (Figuur 3.94).

Het is aannemelijk dat de opbrengst van de scintillator zo laag is dat de pulsen veroorzaakt door de bron slechts één foton per event bevatten waardoor deze niet te onderscheiden is van dark-count. Dit is zowel bij de 3x3 als bij de 1x1 het geval omdat de vezel waaraan de MPPC gekoppeld is maar een diameter van 1 mm heeft. Bij de grotere MPPC wordt dan een groot deel van de oppervlakte niet effectief gebruikt, terwijl die wel dark-counts veroorzaakt.

Om de werking van de MPPC te optimaliseren worden uitgebreidere metingen gedaan aan de sterkte van het signaal bij verschillende drempels (thresholds) en voedingsspanningen. Hierbij wordt telkens gemeten met en zonder bron, met een vaste drempel en een verandering van de voeding in zeer kleine stapjes. De bedoeling is een optimaal werkpunt te vinden, zowel wat betreft voeding als drempel. Het blijkt dat de optimale waarde voor het signaal op 70,9V ligt voor de 3x3 - vrij dicht bij de waarde opgegeven door de fabriek -. De drempel voor 1 p.e. ligt op ongeveer 25 mV. Voor de 1x1 liggen de waarden ook dicht bij dat wat Hamamatsu opgeeft.



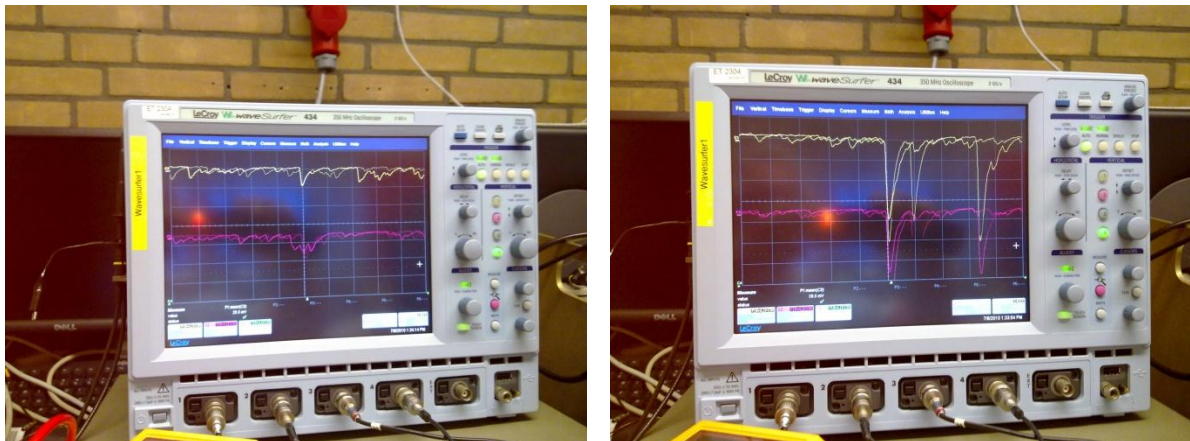
Figuur 3.95: Opbouw van de coïncidentieschakeling met links de twee MPPCs gemonteerd op de (lichtdicht afgesloten) scintillator (rechts).

Het is daarna de bedoeling nog te gaan meten aan één scintillator met twee MPPCs, hiervoor is een speciale opstelling ontworpen. Op foto in Figuur 3.33 is de opstelling in aanbouw te zien. Hierbij is de scintillator op een zwarte basis gemonteerd en de twee MPPC-schakelingen ernaast. Door de schakelingen te verschuiven en te fixeren met een nylon schroef zijn de diodes uit te richten zodat ze tegen het zijvlak van de scintillator zitten. De scintillator is 5 mm dik, dus het volledige oppervlak van de diode wordt benut. Beide schakelingen krijgen een gemeenschappelijke voeding van de versterkers en een eigen hoogspanningsaansluiting.

3.6.9 Metingen aan opstelling met coïncidentie

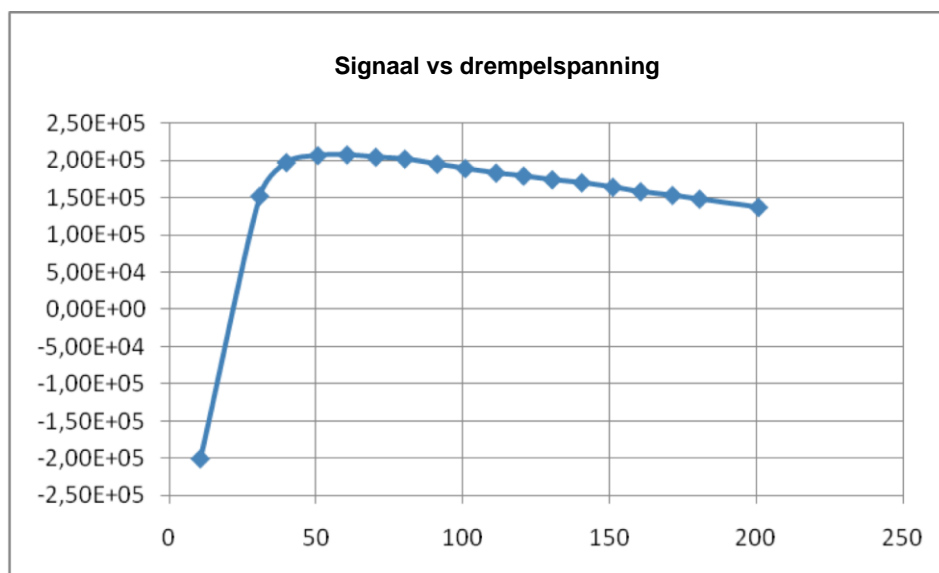
Beide MPPC schakelingen worden aangesloten op een discriminator. De uitgangen van de discriminatoren worden aangesloten op een AND-poort. De teller wordt aangesloten aan de uitgang van de AND-poort, evenals kanaal 3 van de oscilloscoop. De signalen van beide schakelingen worden zichtbaar gemaakt op de oscilloscoop, waarbij getriggerd wordt op coïncidentie. In Figuur 3.96 worden os-

cilloscoopbeelden getoond met metingen zonder (links) en met (rechts) radioactieve bron. Duidelijk is te zien dat de pulsen met bron veel hoger zijn dan zonder.



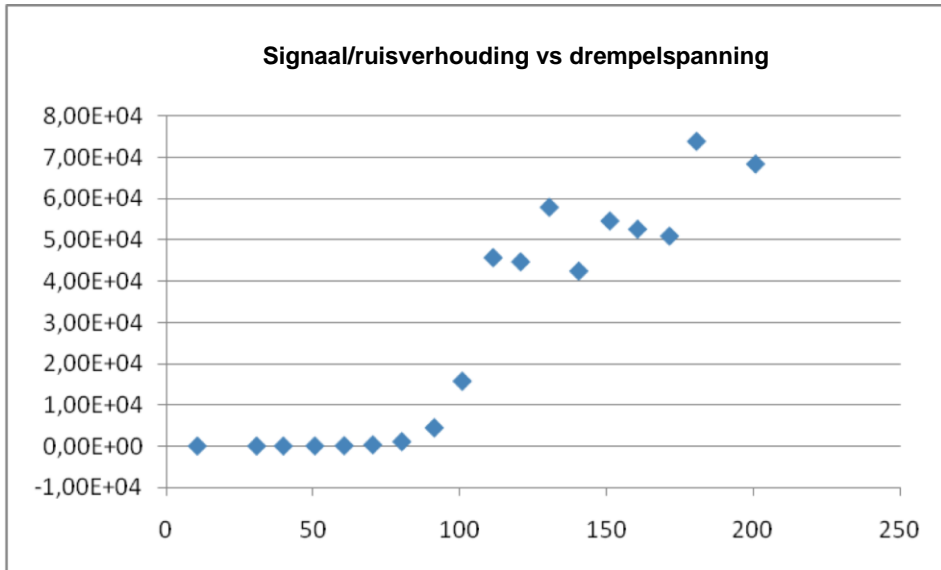
Figuur 3.96: Opnamen van oscilloscoopbeelden in de coïncidentieschakeling . Links zonder en rechts met radioactieve bron.

Vervolgens wordt bij een hoogspanning van 71,147 V (voor beide MPPCs) gemeten hoe het signaal afhangt van de drempelspanning. De grafiek in Figuur 3.97 laat de telsnelheid als functie van de drempelspanning met de radioactieve bron zien. De negatieve frequentie bij lage drempelspanning wordt veroorzaakt door de verandering van de offset als de bron erbij komt. Dan is bij een lage drempelspanning de telling te laag, omdat de grootte van de drempelspanning dan onder de offsetwaarde ligt.

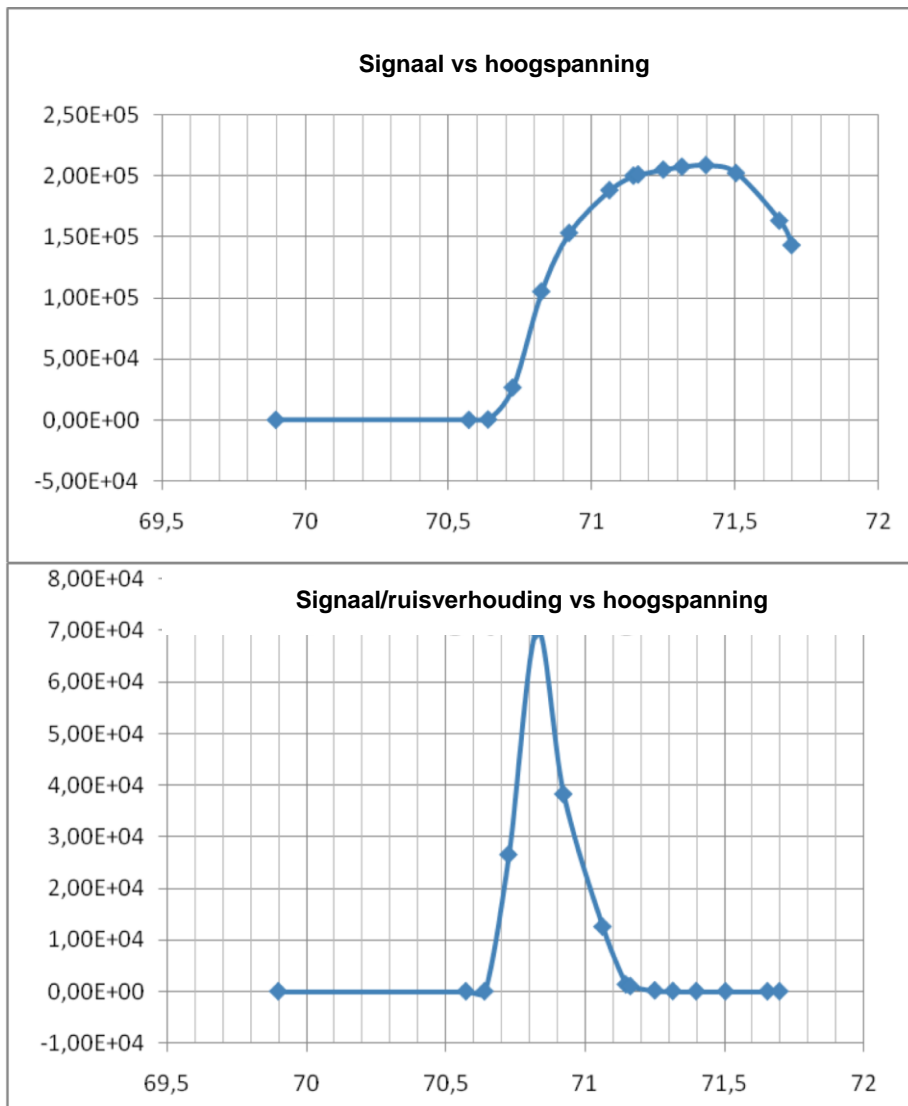


Figuur 3.97: Telsnelheid (Hz) van de coïncidentieschakeling met radioactieve bron als functie van de drempelspanning (mV).

Een hogere drempel geeft wel een aanzienlijk betere signaal/ruis verhouding, maar zorgt er ook voor dat je een deel van het signaal weggooit. Met een drempel van 80 mV krijg je een signaal/ruisverhouding van $10^3 : 1$ en een maximaal signaal (zie Figuur 3.98).



Figuur 3.98: Signaal/ruisverhouding als functie van de drempelspanning (mV).

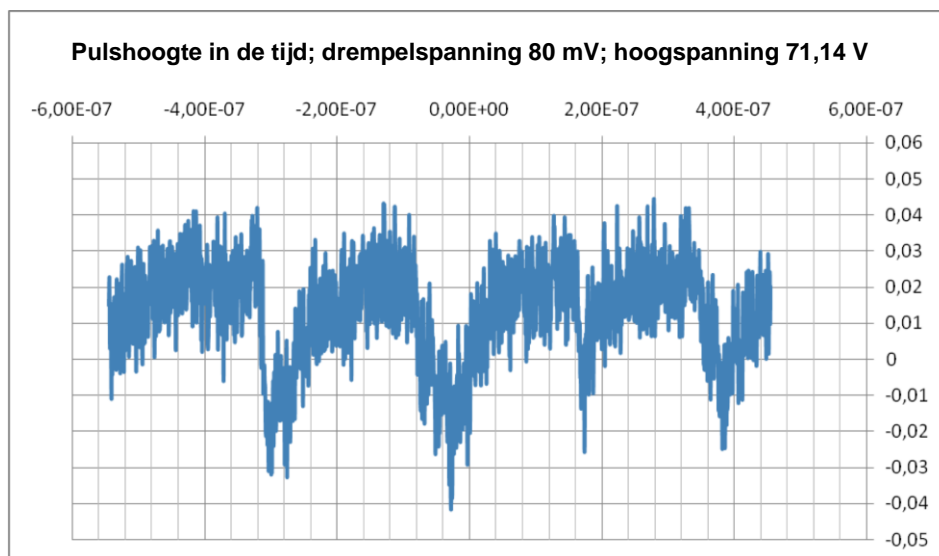


Figuur 3.99: Telsnelheid in Hz (boven) en signaal/ruisverhouding bij een drempel van 80 mV als functie van de hoogspanning (V) met radioactieve bron.

Vervolgens is bij die drempel van 80 mV de hoogspanning gevarieerd. Hiermee zijn de grafieken in Figuur 3.99 verkregen. Hieruit valt af te leiden dat de beste signaal/ruisverhouding bij een voedingspanning van 70.8 Volt bereikt wordt, terwijl het signaal maximaal is bij 71,4 Volt. Buiten dit gebied instellen heeft weinig zin. Nu het signaal fors is, zien we voor de eerste keer ook een verschil tussen de stroom door de schakeling mét en zonder bron. Dat verschil is tussen 3 en 6 μA , afhankelijk van de spanning.

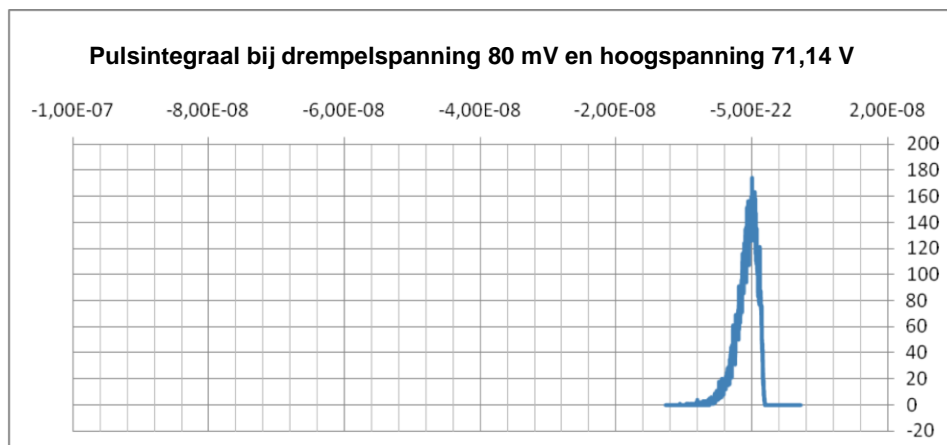
3.6.10 Afsluitende metingen

Met de Waverunner zijn vervolgens diverse traces vastgelegd. Het histogram in Figuur 3.36 is opgenomen bij een hoogspanning van 71,14 Volt en de eerder bepaalde 'optimale' drempelspanning van 80 mV zonder radioactieve bron. Dit histogram geeft de uitgangsspanning in de tijd (trace).

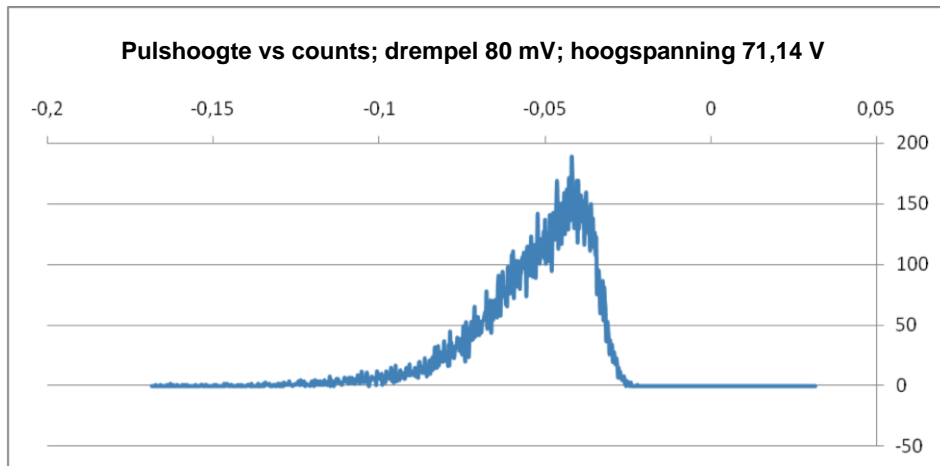


Figuur 3.100: Typische ruissignalen in de tijd (trace) bij 'standaard' instellingen.

Onder dezelfde condities geeft het volgende histogram (Figuur 3.101) de integraal over het uitgangssignaal in de tijd (Vsec in 50Ω) bij een telfrequentie van $1,45 \cdot 10^5$ Hz. Ook is een histogram gemaakt



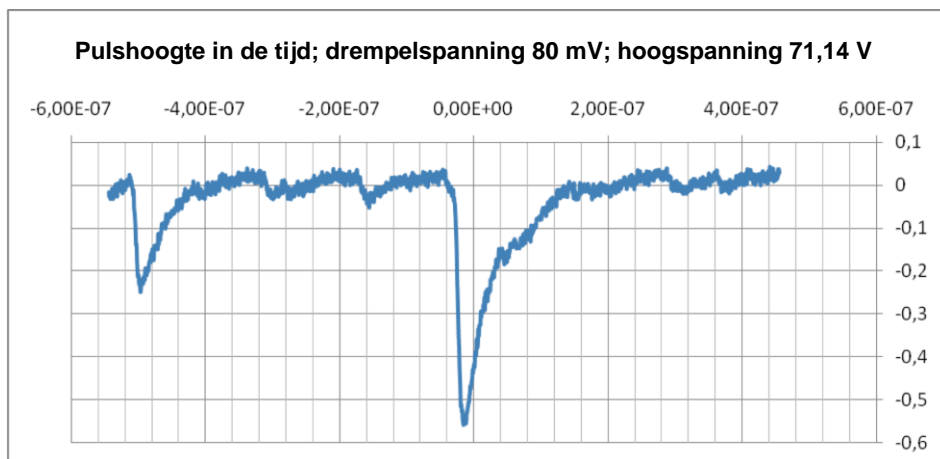
Figuur 3.101: Histogram van pulsintegralen gemeten bij een drempelspanning van ~ 0 mVolt en een hoogspanning van 71,14 Volt.



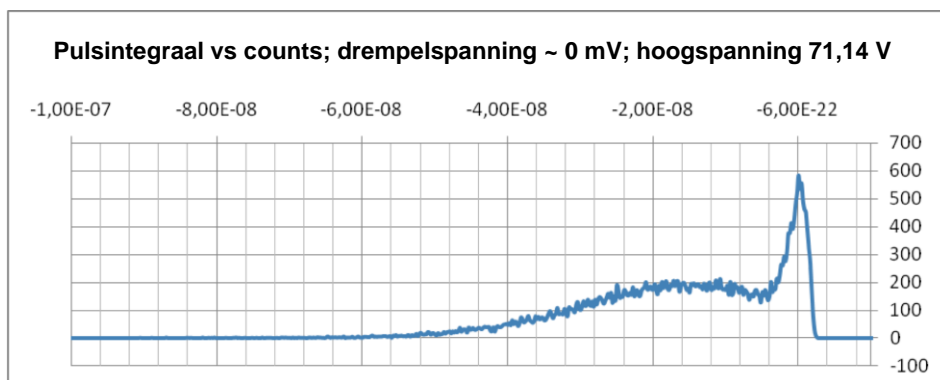
Figuur 3.102: Histogram van pulshoogten (V) vanaf een drempelspanning van 80 mVolt en met een hoogspanning van 71,14 Volt.

van de pulsgrootte (Figuur 3.102).

De metingen zijn vervolgens herhaald met een radioactieve bron. De vorm van de pulsen is weergegeven in Figuur 3.103. Het signaal (met waarden tot meer dan 500 mV) komt duidelijk boven de ruis (< 50 mV) uit. De τ is van dezelfde orde van grootte als bij eerder gemeten signalen. Voor de twee hier zichtbare pieken is de τ ongeveer 48ns.



Figuur 3.103: Typische signalen (trace) t.g.v. de radioactieve bron.

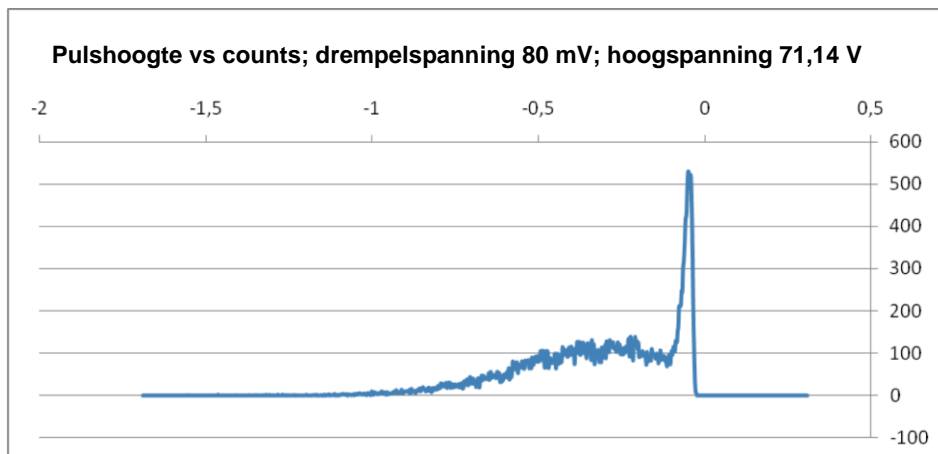


Figuur 3.104: Histogram van pulsintegralen gemeten bij een drempelspanning van ~ 0 mVolt en een hoogspanning van 71,14 Volt; met bron.

De verdeling van de integralen over de pulsen in de tijd ziet er met bron duidelijk anders uit dan de metingen verkregen zonder bron (Figuur 3.101).

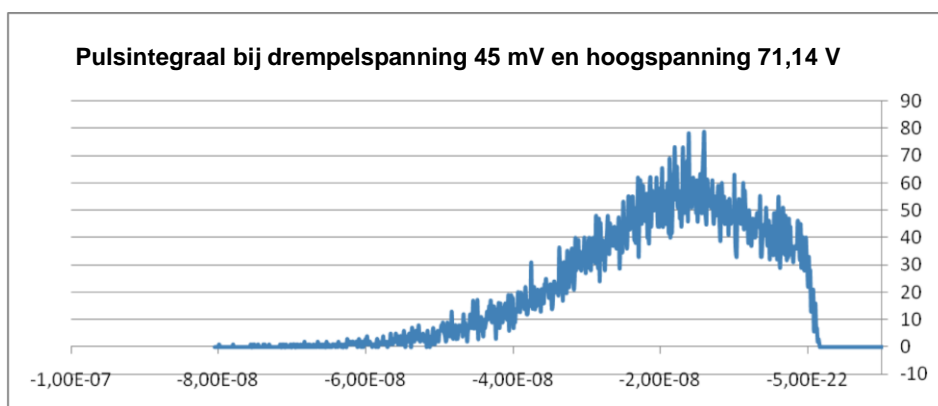
Vervolgens meten we de integraal over deze pulsen in de tijd waarbij we eerst meten zonder een drempelspanning aan te leggen (Figuur 3.104). Omdat de drempel nog laag is, zie je rechts de piek van de ruis (overeenkomend de piek in de grafiek zonder bron in Figuur 3.101) en links het spectrum veroorzaakt door de signalen van de bron. De horizontale schaal is hetzelfde als bij het eerdere histogram zonder bron.

In Figuur 3.105 is het pulshoogte histogram weergegeven weer gemeten met radioactieve bron, maar nu dus met een drempelspanning van 80 mV; de grootste pulsen bereiken waarden van ~ 1 Volt.



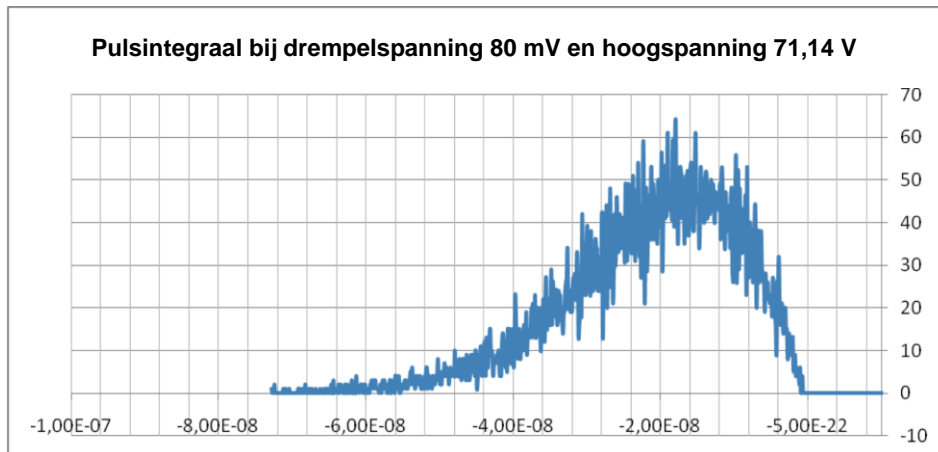
Figuur 3.105: Histogram van pulshoogten (V) vanaf een drempelspanning van 80 mVolt en met een hoogspanning van 71,14 Volt; met bron.

Vervolgens leggen we een drempel aan van 45 mV en worden de metingen herhaald. Het resultaat in Figuur 3.106 laat zien dat de ruisbijdrage aan de pulsintegraal sterk gereduceerd is en dat het signaal t.g.v. de bron domineert.



Figuur 3.106: Histogram van pulsintegralen gemeten bij een drempelspanning van 45 mVolt en een hoogspanning van 71,14 Volt; met bron.

Verhogen we nu de drempel naar 80 mV, dan is de donkertelling vrijwel volledig verdwenen. De telfrequentie reduceert zonder bron tot $1,8 \cdot 10^2$ Hz terwijl met bron de telfrequentie drie orden van grootte hoger ligt: $2,06 \cdot 10^5$ Hz. De signalen van de bron domineren het beeld volledig (zie Figuur 3.107).



Figuur 3.107: Histogram van pulsintegralen gemeten bij een drempelspanning van 80 mVolt en een hoogspanning van 71,14 Volt; met bron.

3.6.11 Conclusie

Aan de hand van de metingen kunnen volgende conclusies gepresenteerd worden:

- De MPPC is redelijk eenvoudig geschikt te maken voor het tellen van fotonen. Hierbij is de 1x1 een stuk minder gevoelig, maar hij geeft een scherper spectrum. De τ van de 1x1 is, vanwege de kleinere capaciteit kleiner. De 1x1 is dus beter geschikt voor grotere lichtsterktes en snellere respons.
- De MPPCs zijn bruikbaar tot ongeveer 60 °C. Hierbij verloopt de ideale hoogspanning wel. De hoogspanning is af te regelen met behulp van de donkerstroom. Als de donkerstroom door de diode op bijvoorbeeld 10 μA afgeregeld wordt, zal de diode bruikbaar blijven. Het verdient echter wel de voorkeur de MPPC te koelen.
- De voedingsspanning heeft een bruikbaar gebied van ongeveer 1,0 V rond de door de fabriek aangeraden spanning. Bij een spanning van 1 V boven of onder de door de fabriek aanbevolen spanning levert een onaanvaardbare verslechtering op. Bij meer dan 1 V onder de aanbevolen spanning 'Geigert' de MPPC niet meer. Bij meer dan 1 V boven de aanbevolen spanning wordt de donkertelling te groot en worden de donkerpulsen te hoog.
- Bij het gebruik van een drempelspanning van 45 mV is de donkertelling een stuk verlaagd. De MPPCs zijn dan in staat zeer zwakke lichtsignalen te meten.
- Met MPPCs in coïncidentie geschakeld kan de donkertelling verder teruggebracht worden, tot een zeer aanvaardbaar niveau.
- Het blijkt dat we erg gevoelig zijn voor offset. Die offset kan echter bij het gebruik van HiSPARC kastjes per event worden bepaald en verrekend. Wel is het belangrijk de offset zo laag mogelijk te houden.
- De optische koppeling van MPPCs aan scintillatormateriaal gaat het best als de MPPCs direct tegen de scintillator geplaatst worden. Er is geen tussenstof gebruikt, maar de koppeling is prima. De bruikbaarheid van de scintillators uit ZEUS blijkt slecht. De efficiency is laag en de

fotonen opbrengst zeer slecht. Deze scintillators zijn voor dit soort experimenten niet bruikbaar. Ook uit experimenten met PMTs blijkt dat.

- De mechanische koppeling aan de scintillator is eenvoudig en stevig. Het ontwerp is simpel maar doeltreffend.
- De response snelheid lijkt lager dan met een PMT. De stijgtijden zijn wel redelijk kort (6 ns), maar de dalende flank heeft een grotere τ . Het lijkt me dat de MPPCs daardoor niet onbruikbaar worden.
- Met het plaatsen van twee MPPCs per scintillator en het gebruik van MPPCs in coïncidentie is de signaal/ruisverhouding en het energiespectrum zodanig dat aan scintillatorpulsen gemeten kan worden. Er komen dan bruikbare pulsen uit. De maximale waarde van de oppervlakte onder de pulsen is rond de 60 nVs (uit grafieken te zien); 60 nVs over 200 Ohm geeft een stroom van 300 pAs. Met versterking van de op-amp van 15,5 was dat dus 19 pC door de MPPC gegeven. Delen we dat door de elektronlading en de versterkingsfactor van de MPPC ($2,4 \cdot 10^6$) dan levert dat 54 fotonen voor de hoogste pulsen. Dit is meer dan verwacht. De top van de grafiek ligt op 16 fotonen. Het is logisch dat we geen fotonen verdeling zien bij deze waarden. Het is wel duidelijk dat er voor deze pulsen een redelijke energieresolutie is. Als het maximale energieverlies 3,5 MeV is (de maximale energie van de bèta's) is de resolutie dus ongeveer 75 keV.
- Gezien de hoogte van de pulsen (enkele honderden mV) lijkt het me mogelijk één ander wel te koppelen aan de huidige HISPARC elektronica.

3.6.12 Suggesties voor het vervolg

Met de huidige opstelling kunnen nog diverse experimenten/metingen gedaan worden:

- Tussen de bron en de scintillator kan de afstand vergroot worden om de telfrequentie omlaag te brengen. Ook kan er met extra laagjes absorptiemateriaal gewerkt worden, of een bron die minder energierijke deeltjes produceert. Omdat de MPPCs tot nu toe gevoelig genoeg zijn geweest, kan dan bepaald worden hoe ze reageren als er minder licht is. Dan kunnen waarschijnlijk ook verdelingen in fotonen gemeten worden.
- Het scintillatorplaatje kan natuurlijk ook getroffen worden door cosmics. Dit is te onderzoeken door coïncidenties te meten van het signaal van het plaatje met dat van een bestaande opstelling.
- Koppelen van de MPPCs aan de HiSPARC elektronica. Als de drempel op een waarde van 80 mV gesteld wordt, kunnen beide MPPCs elk aan een eigen ingang geschakeld worden. De kastjes kunnen dan coïncidenties meten met een radioactieve bron. Hiervoor kan de huidige opstelling gebruikt worden. Als de bron te actief is voor de kastjes (te veel tellingen/s) kan de afstand van de bron naar de scintillator gewijzigd worden of met een tussenstof gewerkt worden.

- De MPPCs koppelen aan een fishtail van een bestaande opstelling. Hiervoor zou het eind van de fishtail met een dunner stripje gekoppeld kunnen worden aan de MPPCs.

Inmiddels zijn er verschillende typen MPPCs beschikbaar waarmee in de toekomst vergelijkbare metingen uitgevoerd kunnen worden:

- MPPCs zijn ook te koop in een array van 4x1 (4 x 1 bij 1 mm) 2x2 (4 x 3 bij 3 mm) en 4x4 (16 x 3 bij 3 mm). Deze zijn als één MPPC of allemaal afzonderlijk uit te lezen. De 4X1 en de 2x2 zijn monolithisch uitgevoerd en hebben dus geen loze ruimte tussen de MPPCs.
- Er zijn ook thermo-elektrisch gekoelde MPPCs te koop, waarvan de temperatuur tot op -30 °C gehouden kan worden bij een buitentemperatuur van 25 °C. Hierdoor neemt de donkertelling spectaculair af. Voorlopig is alleen een 1x1 MPPC verkrijgbaar in gekoelde uitvoering.
- Voordat er echt gebruik gemaakt kan worden van de MPPCs is er nog wat werk nodig.

Samenvattend, inmiddels zijn er verschillende typen MPPCs beschikbaar waarmee in de toekomst vergelijkbare metingen uitgevoerd kunnen worden. De donkertelling kan gedrukt worden door te meten met behulp van coïncidenties en door de temperatuur in de hand te houden. De elektronica is in eigen beheer te maken.

3.6.13 Dankwoord

Rest mij nog te bedanken: Jos Steijger voor zijn actief en deskundig meedenken en stimuleren, Wim Gotink voor zijn bereidheid altijd snel weer iets nieuws elektronisch te maken, de werkplaats voor het vaak even tussendoor verzinnen en maken van een nieuw stukje opstelling en de collega LiOs voor de plezierige samenwerking.

3.7 Signaalanalyse scintillator/lichtgeleider/fotobuis combinatie



Figuur 3.108: Machiel Vegting - Vechtstede College Weesp [58] -.

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 Bèta-coördinator.

3.7.1 Onderzoeksopdracht

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. Voor de experimenten werd lood gebruikt.

3.7.2 Introductie

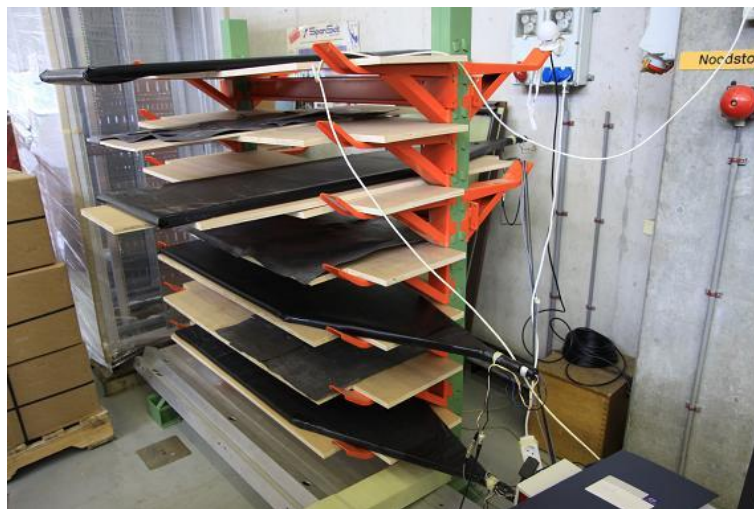
In onze omgeving is altijd kosmische straling aanwezig. Wat wij natuurlijke achtergrondstraling noemen is echter heel fundamenteel en de term is dan ook eerder misleidend. De samenstelling van de achtergrondstraling is echter moeilijk te bepalen. De realisatie dat deze straling voortdurend door ons heen 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 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). Vorig jaar (2008-2009) heb ik 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 3.109).



Figuur 3.109: 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° ten opzichte van elkaar gedraaid. De trigger rate schommelde rond de 7.5 Hz. Dit kon door de LaVIEW software verwerkt worden.

De scintillatieplaten worden ondersteund m.b.v. een stalen frame waarop 7 multiplex platen met een dikte van 0.8 cm 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 direct gekoppeld aan een PC. De data worden op de PC ingelezen en vervolgens naar de centrale database bij Nikhef gestuurd.

Vorig jaar (2008-2009) heeft docent Arjan Vriens een FLUKA simulatie gemaakt van deze opstelling (zie verslag 2009). Een van zijn resultaten was dat in het dak van de werkplaats duidelijk secundair geproduceerde elektronen geproduceerd worden (Leraar in Onderzoek Hoogenergetische Kosmische

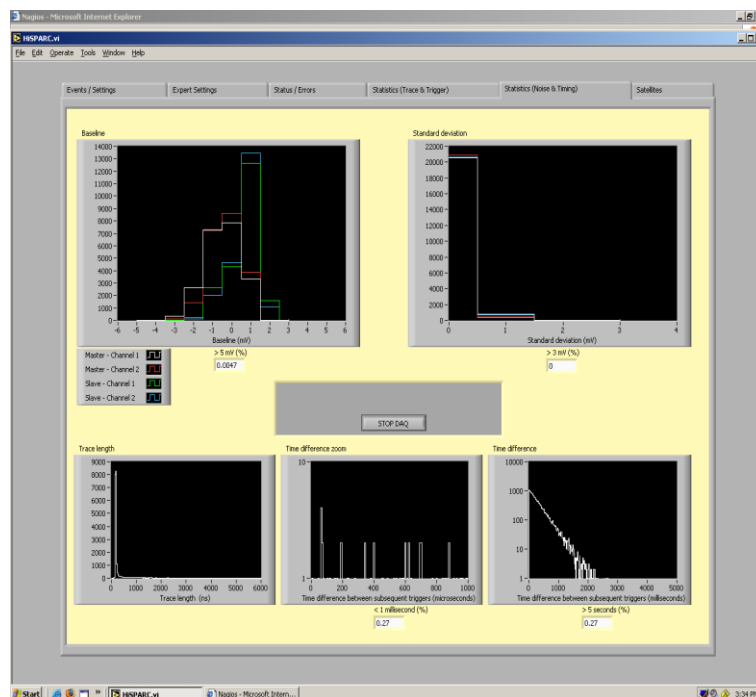
straling 5 oktober 2009 blz. 33 e.v.). Verder geeft hij aan dat er in het lood duidelijk meer secundaire elektronen geproduceerd worden en dan met name in de hogere energieën.

Het experiment bestaat uit vier sets metingen. Ik heb tussen de platen lood geplaatst. Dit lood wordt ondersteund door extra multiplex platen. Ik heb het lood tussen de platen 1 en 2 geplaatst. De dikte van het lood was 1,2 cm. De nummering van de platen is van boven naar beneden. Dus plaat 1 ligt bovenaan, dan komt het lood en vervolgens plaat 2 en plaat 3 en vervolgens plaat 4.

3.7.3 Signalen

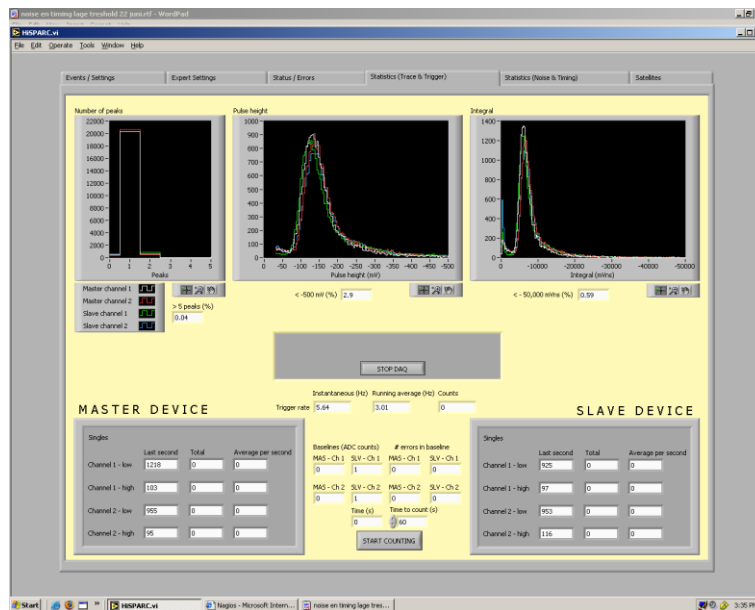
De HiSPARC elektronica bezat firmware versie 14. De trigger werd zodanig ingesteld dat alle vier platen een signaal binnen een vast gedefinieerd tijdvenster ($1.5 \mu\text{s}$) moesten geven. Ieder signaal moest bovendien de laagste aangelegde drempel (-40 mV) overstijgen.

Het linker histogram boven in Figuur 3.110 laat zien dat de baseline van alle vier fotooversterkerbuis-signalen een net gedrag vertoont. De spreiding op deze distributies is klein (hoogstens enkele mV, zie histogram 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 de distributie links onder) die naar de database geschreven moet worden. Het histogram uiterst rechts onder laat zien dat het tijdverschil tussen opeenvolgende triggers zich netjes gedraagt; inzoomen op zeer korte tijdverschillen tussen de triggers (middelste histogram) laat zien dat het systeem zonder waarneembare dode tijd opereerde.



Figuur 3.110: 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 tijdverschil 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.

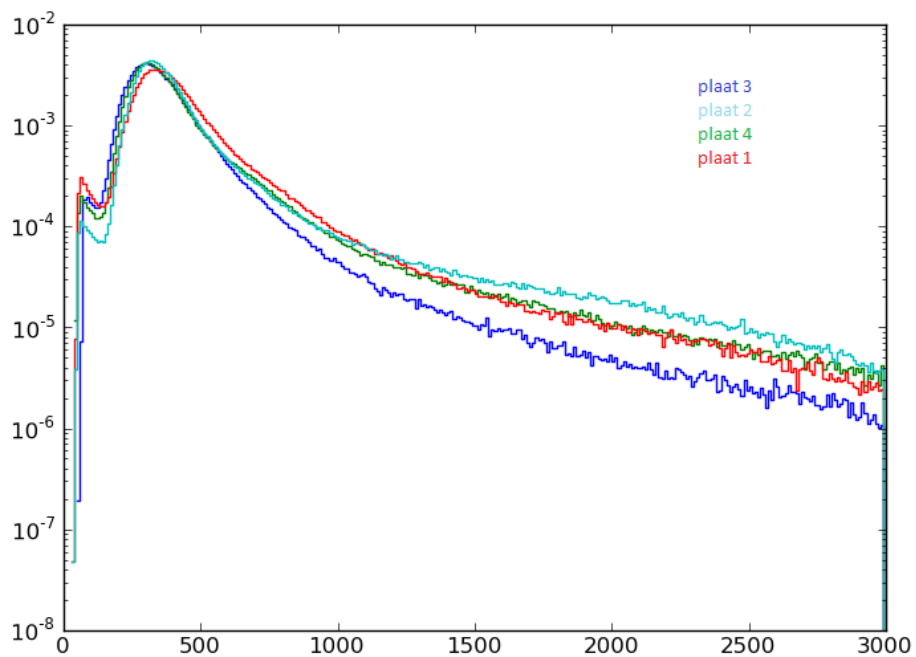
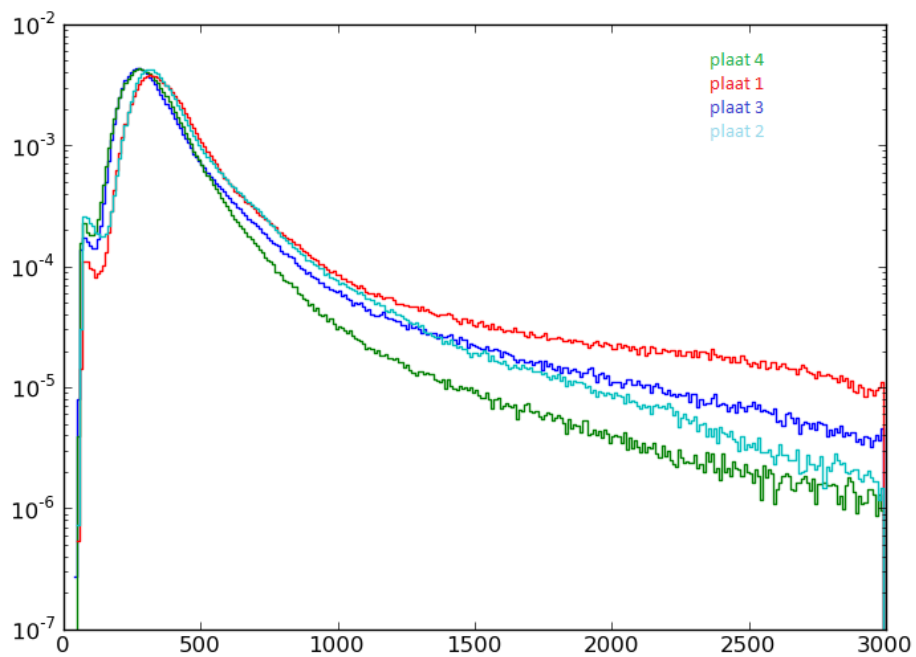


Figuur 3.111: Op de bovenste rij: het aantal 'signalen' per event, de pulshoogte en de integraal over de signalen welke de drempel passeren. Onderaan worden de individuele telsnelheden weergegeven.

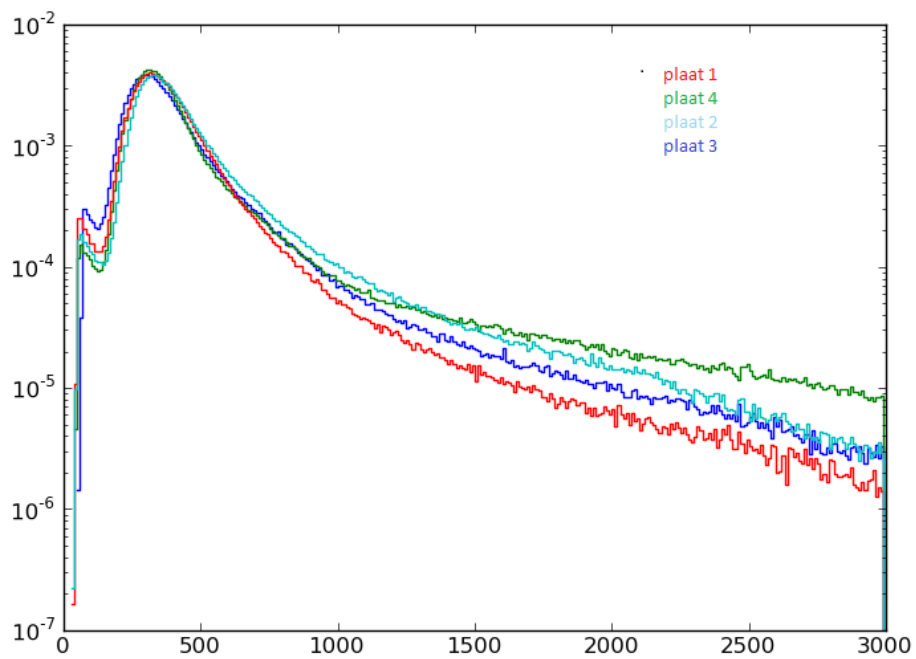
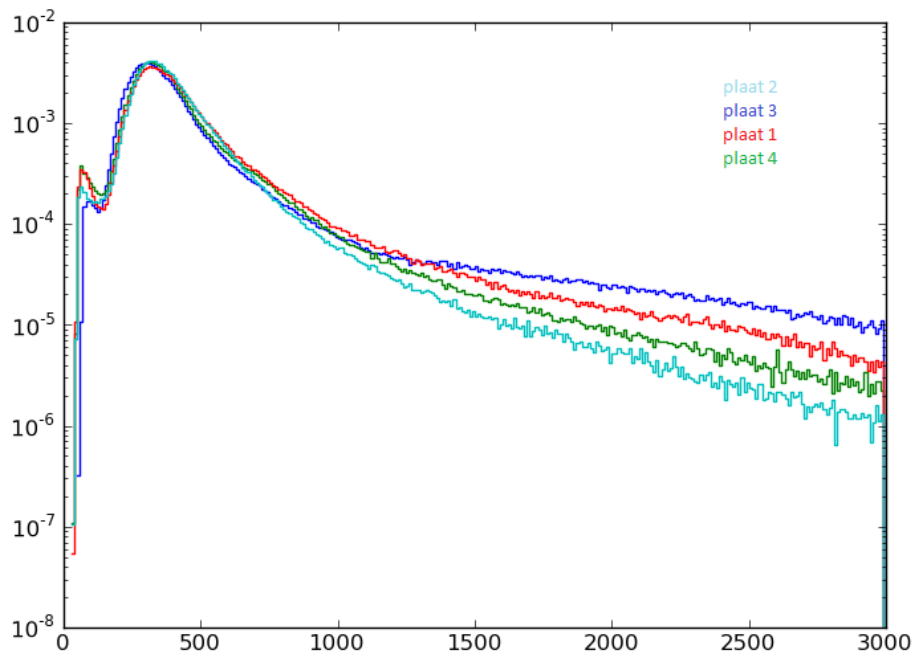
Het histogram links boven in Figuur 3.111 registreert het aantal pieken (multipliciteit) dat bij iedere trigger bepaald wordt. Voor alle vier de scintillatoren geldt dat de signalen gedomineerd worden door een enkele puls; de kans dat een tweede deeltje binnen een periode dat de data na een trigger genomen wordt een of meer van de scintillatoren penetreert, is blijkbaar klein. Het middelste histogram laat de pulshoogtedistributies 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.

3.7.4 De metingen

M.b.v. Pythonscripts zijn de data uit de database gelezen en is een eerste analyse gemaakt. In Figuur 3.112 - Figuur 3.113 wordt de pulshoogtedistributie gegeven voor metingen met lood. Iedere grafiek representeert een meting aan dezelfde opstelling, echter, steeds voor een andere volgorde van de scintillatoren. De volgorde is zo gekozen dat elke plaat op een van de vier posities gemeten kon worden. Het lood is tussen de bovenste twee scintillatoren geplaatst. In de grafieken is aangegeven wat de volgorde is van de platen. In de legenda staat welke kleur bij welke scintillator hoort. Langs de horizontale as staat de pulshoogte (mV) uit. Verticaal staat het aantal counts (logaritmische schaal). In het eerste plaatje is bijvoorbeeld de volgorde 4132 met tussen 4 en 1 de laag lood.



Figuur 3.112: Pulshoogte histogrammen met het aantal counts langs de verticale as en de pulshoogte (in mV) langs de horizontale as. De distributie in de bovenste figuur is het resultaat van metingen met lood direct boven scintillator 1, terwijl uit de metingen onder eenduidig afgeleid kan worden dat scintillator 2 direct onder het lood geplaatst is.



Figuur 3.113: Pulshoogte histogrammen met het aantal counts langs de verticale as en de pulshoogte (in mV) langs de horizontale as. De distributie in de bovenste figuur is het resultaat van metingen met lood direct boven scintillator 3, terwijl uit de metingen onder eenduidig afgeleid kan worden dat scintillator 4 direct onder het lood geplaatst is.

3.7.5 Conclusie

Ik heb op vier platen getriggerd. 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 ik hierdoor exclusief muonen geselecteerd heb en mogelijke andere deeltjes die de platen penetreren (elektronen, fotonen), uitsluiten. In de resultaten is duidelijk te zien dat in de staart van de bovenste plaat de minste deeltjes gedetecteerd worden. In de plaat die er direct onder ligt en dus ook het dichtst is bij de looddikte van 12 mm zijn met name in de hogere energieën duidelijk meer deeltjes. Om uit sluiten of de gemeten variaties plaatafhankelijk is, is elke plaat in elke positie gelegd en zijn er dus meerdere sets van metingen. Er is geen merkbare plaatafhankelijkheid. Uit de al eerder aangehaalde simulatie van Arjan bleek dat er inderdaad meer secundair geproduceerde elektronen met een hogere energie geproduceerd worden in het lood. Dit wordt bevestigd door dit experiment.

4. Conclusie

4.1 Evaluatie en vooruitblik

Afgelopen jaar hebben docenten uit het voorgezet onderwijs in Amsterdam, Groningen en Nijmegen weer in de keuken van het wetenschappelijk bedrijf kunnen kijken. De diverse onderzoeksresultaten worden gepresenteerd in dit document (zie ook: [7]).

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

Het goed omlijnde kader en het deelnemen aan een gemeenschappelijk project, heeft ook geleid tot veelvuldig overleg tussen deelnemers en begeleiders. Frequente bijeenkomsten in Utrecht bij het FOM bureau hebben naar aanleiding van de door de deelnemers gepresenteerde voortgangsrapporten, uitgebreide en inspirerende discussies opgeleverd. Docenten hebben elkaar dan ook vaak getroffen als 'sparring partners'; vraagstukken zijn voor het voetlicht gebracht en besproken.

In Amsterdam, Groningen en Nijmegen zijn eigenschappen van individuele detectoren binnen een HiSPARC opstelling bestudeerd met dit jaar de nadruk op signaalvorming en externe (atmosferische) invloeden. Daarnaast is een project gestart om te onderzoeken of moderne halfgeleider technologie een (praktisch en goedkoop) alternatief zou kunnen bieden voor PMTs.

Ook is een aanzet gegeven om de wiskundige achtergrond van lawine-ontwikkeling en lawine-reconstructie beter te begrijpen. In een eerste analyse is onderzocht met welke randvoorwaarden rekening gehouden moet worden om bijvoorbeeld het centrum van een lawine uit experimentele gegevens te kunnen bepalen.

Volledig nieuw dit jaar is een bijdrage aan de ontwikkeling van modern voortgezet 'exact' middelbaar onderwijs met als doel docenten te faciliteren en de 'betere' leerling te 'prikkelen'. Het materiaal dat hiervoor ontwikkeld wordt geeft direct aansluiting bij eerder gepresenteerde NLT en NiNa modules.

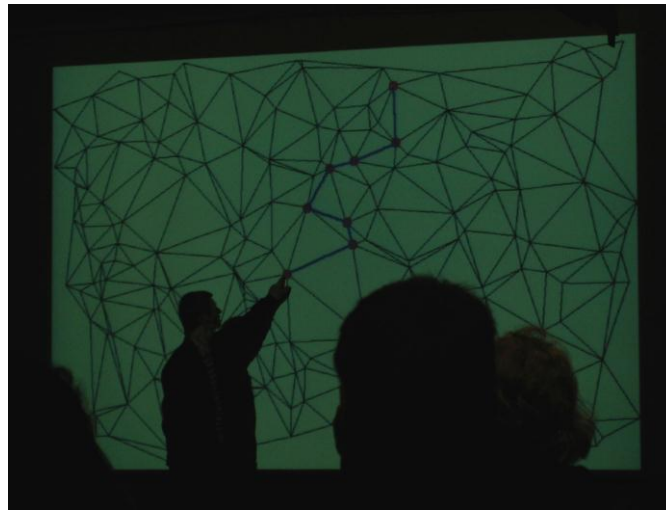
De resultaten van afgelopen jaar illustreren wederom dat wetenschappelijk onderzoek bedrijven een uitdagende onderneming is; zeker voor wie het geen alledaagse activiteit is.

De projecten die in dit rapport gepresenteerd worden zullen komend jaar wederom de basis vormen voor het wetenschappelijke werk dat een nieuwe groep docenten uit gaat voeren. Ieder jaar komen we zo ook tot een beter begrip van alle mogelijke aspecten die een rol spelen om een juiste duiding aan de meetresultaten van de HiSPARC opstellingen te geven. Dit brengt ons dichterbij het wetenschappelijk doel van het project; een beter begrip van oorsprong en aard van kosmische straling...

4.2 HiSPARC leerlingensymposium 2010

Op 28 april 2010 werd het HiSPARC leerlingensymposium georganiseerd. Dit jaarlijkse symposium geeft leerlingen de kans om het werk dat zij hebben gedaan m.b.t. HiSPARC te presenteren. Ook is het een gelegenheid voor betrokkenen om met elkaar van gedachten te wisselen over zaken als educatie, hardware en software van HiSPARC. Gastlocatie voor het symposium was het University Col-

lege Utrecht. De organisatie van het symposium was in handen van Filipe Freire (UCU) en Surya Bonam (HiSPARC). Het programma werd 's middags geopend met een voordracht door Prof. Dr. Vincent Icke (zie Figuur 4.1).



Figuur 4.1: Prof. Dr. Vincent Icke geeft een presentatie over 'radiation hydrodynamics'.

Na een boeiende voordracht werd de groep deelnemers in tweeën gesplitst. Terwijl een groep hun profielwerkstuk met als onderwerp 'kosmische straling' in de vorm van posters, film en PowerPoint presenteerde, ging de andere groep aan de slag met het verwerken van de HiSPARC data. De presentaties werden door een jury (Filipe Freire, David Fokkema, Floor Terra, Casper van Dam - prijswinnaar 2009 -, Bob van Eijk en Jan Willem van Holten) op hun inhoud en uitvoering beoordeeld (Figuur 4.2).



Figuur 4.2: De jury voelt een van de deelnemers aan de tand.

Matthijs Kuik en Jacek Smit, twee leerlingen van het Coornhert Lyceum in Haarlem, wonnen met hun presentatie een reis naar CERN in Genève, Zwitserland (Figuur 4.3).



Figuur 4.3: De winnende presentatie van Jacek en Matthijs.

Inmiddels zijn Matthijs en Jacek naar CERN geweest en hebben zij onder begeleiding van twee Nikhef medewerkers (Gerjan Bobbink en David Fokkema) een bezoek gebracht aan de grootste deeltjesversneller van de wereld (zie ook Appendix D), de Large Hadron Collider (LHC).

In een 'hands-on' sessie werden de leerlingen uitgedaagd met een geselecteerde set van HiSPARC data welke zij moesten bewerken en interpreteren (Figuur 4.4).



Figuur 4.4: 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 RouteNet software

Het RouteNet streeft ernaar om de samenhang van kennis op een intuïtieve, interactieve manier weer te geven. In eerste instantie werd gedacht aan een 'plattegrond' waarin de diverse kennisgebieden naast elkaar liggen. In de praktijk is de samenhang van kennis echter veel ingewikkelder. Dit zou via een mindmap weer te geven zijn. De software voor een interactieve mindmap is echter vrij ingewikkeld. Er is daarom gekozen voor een tabel waarin de cellen door een verkleurende achtergrond aan elkaar gekoppeld worden. Deze cellen hoeven nu niet meer naast elkaar te liggen, wat de opzet veel flexibeler maakt.

Omdat het RouteNet via internet benaderd moet kunnen worden, is er gekozen om dit via een HTML/JavaScript/StyleSheet aanpak te doen. In het HTML-bestand is de informatie beschreven. Het JavaScript-bestand regelt de verkleuring van de cellen in de tabel. De kleuren van de cellen in de tabel zijn als klassen in het StyleSheet-bestand vastgelegd. Hier is ook de vormgeving van de cel en de links beschreven.

Hieronder is de broncode van het bestand 'index.html' weergegeven. Zoals in <head> te zien is wordt er gebruik gemaakt van twee extra bestanden: 'routenet.css' en 'highlight.js'.

In het bestand index.html wordt de informatie beschreven. Deze staat in een tabel (<table>). Iedere cel in de tabel (<td>) bevat een aantal attributen, zie de commentaar regels aan het begin van <body>. Deze attributen bevatten de informatie voor het bestand highlight.js.

Een eerste test is uitgevoerd door een Beta-versie binnen een beperkte kring openbaar te maken. Hier bleken geen problemen te zijn. De software draait onder Windows™, Mac-OS™ en Linux. Daarnaast werkt het geheel ook op diverse smartphones. Het lesmateriaal is direct beschikbaar onder:

<http://www.hisparc.nl/docent-student/lesmateriaal/routenetpad/>

index.html

```
<?xml version="1.0" encoding="iso-8859-1"?>
<!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD XHTML 1.0 Transitional//EN"
  "http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-transitional.dtd">
<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml">

<head>
  <meta http-equiv="content-type" content="text/html; charset=iso-8859-1" />
  <title>Het routenet</title>
  <meta name="generator" content="Amaya, see http://www.w3.org/Amaya/" />
  <meta name="author" content="N.G. Schultheiss" />
  <link rel="stylesheet" type="text/css" media="screen" href="/routenet.css" />
  <script type="text/javascript" src="/highlight.js">
</script>

</head>
<body class="nietGekozen">
<!-- Iedere cel (<td>) bevat de attributen 'id' en 'title', eventueel is 'title' leeg. -->
<!-- Het attribuut 'id' bevat de naam van de instantie, bijvoorbeeld: 'kl3'. -->
<!-- Het attribuut 'title' bevat de namen van de hierop volgende instanties, -->
<!-- bijvoorbeeld: 'spg,lzn,hml,kl4'. -->
<table border="0">
  <tbody>
    <tr>
      <td rowspan="4" id="kl3" title='spg,lzn,hml,kl4' class="nietGekozen"
        onmouseover="selecteer('kl3');return true">
```

```

onmouseout="deselecteer('kl3');return true">
Derde klas
</td>
<td id="spg" title='prs,lzn' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('spg');return true"
onmouseout="deselecteer('spg');return true">
<a href="/.spiegels.pdf">Spiegels</a>
</td>
<td id="prs" title='lzs' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('prs');return true"
onmouseout="deselecteer('prs');return true">
<a href="/.ParaboolSpiegel.pdf">Parabolische spiegels</a>
</td>
<td colspan="2" />
</tr>
<tr>
<td id="lzn" title='lzs,tls' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('lzn');return true"
onmouseout="deselecteer('lzn');return true">
<a href="/.Lenzen.pdf">Lenzen</a>
</td>
<td id="lzs" title='tls' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('lzs');return true"
onmouseout="deselecteer('lzs');return true">
<a href="/.LenzenSlijpen.pdf">Lenzen slijpen</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2" id="tls" title='mtl,PDe' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('tls');return true"
onmouseout="deselecteer('tls');return true">
<a href="/.Telescopen.pdf">Telescopen</a>
</td>
<td rowspan="2" id="mtl" title='rtl,exh,PAs' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('mtl');return true"
onmouseout="deselecteer('mtl');return true">
<a href="/.constructie.html">Meten met telescopen</a>
</td>
<td rowspan="3" id="rtl" title='PAs' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('rtl');return true"
onmouseout="deselecteer('rtl');return true">
<a href="/.constructie.html">Radiotelescopen</a>
</td>
<td rowspan="3" id='PAs' title="" class='nietGekozen'>
<a href="/.constructie.html">Astronomisch<br /> profielwerkstuk</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td id="hml" title='hll' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('hml');return true"
onmouseout="deselecteer('hml');return true">
<a href="/.DeHemel.pdf">De hemel</a>
</td>
<td id="hll" title='mtl' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('hll');return true"
onmouseout="deselecteer('hll');return true">
<a href="/.HetHeelal.pdf">Het heelal</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td rowspan="5" id="kl4" title='zon,vdw,bts,SE,kl5' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('kl4');return true"
onmouseout="deselecteer('kl4');return true">
Vierde klas
</td>
<td rowspan="2" id="zon" title='brg,znw' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('zon');return true"
onmouseout="deselecteer('zon');return true">
<a href="/.DeZon.pdf">De Zon</a>
</td>

```

```

<td class="nietGekozen" title='exh' id="brg"
onmouseover="selecteer('brg');return true"
onmouseout="deselecteer('brg');return true">
<a href="/DeBroglie.pdf">de Broglie</a>
</td>
<td colspan="1" id="exh" title='rtl,PAs' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('exh');return true"
onmouseout="deselecteer('exh');return true">
<a href="/UitdijendHeelal.pdf">Het uitdijend heelal</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="1" id="znw" title='kms' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('znw');return true"
onmouseout="deselecteer('znw');return true">
<a href="/constructie.html">Zonnewind</a>
</td>
<td colspan="2" rowspan="2" id="kms" title='tsj,cmp,PKS' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('kms');return true"
onmouseout="deselecteer('kms');return true">
<a href="/CosmischeStraling.pdf">Kosmische straling</a>
</td>
<td rowspan="4" id="PKS" title="" class='nietGekozen'>
<a href="/constructie.html">Kosmische straling<br /> profielwerkstuk</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="1" id="vdw" title='wil' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('vdw');return true"
onmouseout="deselecteer('vdw');return true">
<a href="/VanDerWaals.pdf">van der Waals</a>
</td>
<td colspan="1" id="wil" title='kms' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('wil');return true"
onmouseout="deselecteer('wil');return true">
<a href="/constructie.html">Wilson</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td id="SE" title='ON' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('SE');return true"
onmouseout="deselecteer('SE');return true">
<a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_1_1_sterevolutie.pdf">
Stereolutie
</a>
</td>
<td id="ON" title='BR' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('ON');return true"
onmouseout="deselecteer('ON');return true">
<a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_1_2_onderzoek.pdf">
Onderzoek
</a>
</td>
<td id="BR" title='ED' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('BR');return true"
onmouseout="deselecteer('BR');return true">
<a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_1_3_bronnen.pdf">
Bronnen
</a>
</td>
<td rowspan="3" id="tsj" title='PKS,PDe' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('tsj');return true"
onmouseout="deselecteer('tsj');return true">
<a href="/Tsjerenkov.pdf">Tsjerenkov</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2" id="bts" title='cmp' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('bts');return true"
onmouseout="deselecteer('bts');return true">

```

```

    <a href="/botsen.pdf">Botsingen</a>
  </td>
  <td rowspan="2" id="cmp" title='flr,PKS' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('cmp');return true"
    onmouseout="deselecteer('cmp');return true">
    <a href="/Compton.pdf">Compton</a>
  </td>
</tr>
<tr>
  <td rowspan="4" id="kl5" title='kl6,mam,ED,dct,stm' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('kl5');return true"
    onmouseout="deselecteer('kl5');return true">
    Vijfde klas
  </td>
  <td id="mam" title='rlt' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('mam');return true"
    onmouseout="deselecteer('mam');return true">
    <a href="/MichelsonMorley.pdf">Michelson en Morley</a>
  </td>
  <td id="rlt" title='cmp' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('rlt');return true"
    onmouseout="deselecteer('rlt');return true">
    <a href="/Relativiteit.pdf">Relativiteit</a>
  </td>
  <td rowspan="2" id="PDe" title="" class='nietGekozen'>
    <a href="/constructie.html">Detector<br /> profielwerkstuk</a>
  </td>
</tr>
<tr>
  <td colspan="2" id="dct" title='flr' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('dct');return true"
    onmouseout="deselecteer('dct');return true">
    <a href="/Detectoren.pdf">Detectoren</a>
  </td>
  <td colspan="2" id="flr" title='PDe' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('flr');return true"
    onmouseout="deselecteer('flr');return true">
    <a href="/constructie.html">Fluorisentie</a>
  </td>
</tr>
<tr>
  <td id="ED" title='MV' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('ED');return true"
    onmouseout="deselecteer('ED');return true">
    <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_2_1_elem_deeltjes.pdf">
      Elementaire deeltjes
    </a>
  </td>
  <td id="MV" title='AS' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('MV');return true"
    onmouseout="deselecteer('MV');return true"><a
    href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_2_2_muonverval.pdf">
      Muon-verval
    </a><br />
    <a href="/MuonVervalCoach.pdf">Simulatie </a> </td>
  <td id="AS" title='DE' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('AS');return true"
    onmouseout="deselecteer('AS');return true">
    <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_2_3_shower.pdf">
      Airshowers
    </a>
  </td>
</tr>
<tr>
  <td colspan="2" id="PED" title="" class='nietGekozen'>
    <a href="/constructie.html">Elementaire deeltjes<br /> profielwerkstuk</a>
  </td>
</tr>
<tr>
  <td colspan="2" id="stm" title='PED' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('stm');return true"

```

```

onmouseout="deselecteer('stm');return true">
<a href="/Standaardmodel.pdf">
  Standaardmodel
</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td rowspan="3" id="kl6" title='din,DE' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('kl6');return true"
onmouseout="deselecteer('kl6');return true">
  Zesde klas
</td>
<td id="din" title='dvw' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('dvw');return true"
onmouseout="deselecteer('din');return true">
  <a href="/DataInvoer.pdf">Data invoer</a>
</td>
<td id="dvw" title='PCo' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('dvw');return true"
onmouseout="deselecteer('dvw');return true">
  <a href="/constructie.html">Data verwerken</a>
</td>
<td colspan="2"></td>
<td rowspan="3" id="PCo" title=" class='nietGekozen'>
  <a href="/constructie.html">Correlatie<br /> profielwerkstuk</a>
</td>
</tr>
<tr>
<td id="DE" title='DB' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('DE');return true"
onmouseout="deselecteer('DE');return true">
  <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_1_detector.pdf">
    Detector
  </a>
</td>
<td id="DB" title='DT' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('DB');return true"
onmouseout="deselecteer('DB');return true">
  <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_2_detector_bouwen.pdf">
    Detector bouwen
  </a>
</td>
<td id="DT" title='DS' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('DT');return true"
onmouseout="deselecteer('DT');return true">
  <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_3_detector_testen.pdf">
    Detector testen
  </a>
</td>
<td id="DS" title='DI' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('DS');return true"
onmouseout="deselecteer('DS');return true">
  <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_4_detectiestation.pdf">
    Detectiestation
  </a>
</td>
</tr>
<tr>
<td id="DI" title='DN,PDe' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('DI');return true"
onmouseout="deselecteer('DI');return true">
  <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_5_detstat_instal.pdf">
    Detectiestation<br /> installeren
  </a>
</td>
<td id="DN" title='RD' class="nietGekozen"
onmouseover="selecteer('DN');return true"
onmouseout="deselecteer('DN');return true">
  <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_6_detectienetwerk.pdf">
    Detectienetwerk

```

```

    </a>
  </td>
  <td id="RD" title='EP,PKS' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('RD');return true"
    onmouseout="deselecteer('RD');return true">
    <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_7_richting_pd.pdf">
      Richting<br /> primair deeltje
    </a>
  </td>
  <td id="EP" title='PKS' class="nietGekozen"
    onmouseover="selecteer('EP');return true"
    onmouseout="deselecteer('EP');return true">
    <a href="http://www.phys.uu.nl/~kortland/hisparc/HiSparc_1_3_8_energie_pd.pdf">
      Energie<br /> primair deeltje
    </a>
  </td>
</tr>
</tbody>
</table>
</body>
</html>

```

Hieronder is de broncode van highlight.js weergegeven. Dit bestand wijst een klasse toe aan cellen van de tabel in het bestand index.html. Zoals aangegeven wordt, is de functie 'maaklijst(id)' niet recursief. Dit was eleganter geweest, de beschreven oplossing leidde echter sneller tot een resultaat.

highlight.js

```

// Auteur: N.G. Schultheiss
// Dit programma stuurt de css-klassen '.vervolg0', 'vervolg1', 'vervolg2', 'vervolg3' en 'nietGekozen' aan.
var klasA = new Array();
var klasB = new Array();
var klasC = new Array();
var klasD = new Array();

// Met deze functie zijn de klassen te kiezen.
function selecteer(id){
  maakLijst(id);
  schrijfLijst(id, 'gekozen');
}

// Met deze functie zijn de klassen weer op 'nietGekozen' te zetten.
function deselecteer(id){
  maakLijst(id);
  schrijfLijst(id, 'nietGekozen');
}
// Helaas niet als recursief programma.
function maakLijst(id){
  var elementA=document.getElementById(id);
  var colA=elementA.getAttribute("title");
  if(colA!=""){
    var attr="
    for(i=0; i<=colA.length; i++){
      if((colA.substr(i,1)==' ')||(i==colA.length)){
        klasA.push(attr);
        var elementB=document.getElementById(attr);
        attr="
        var colB=elementB.getAttribute("title");
        if(colB!=""){
          attr="
          for (j=0; j<=colB.length; j++){
            if((colB.substr(j,1)==' ')||(j==colB.length)){
              klasB.push(attr);
              var elementC=document.getElementById(attr);
              attr="
              var colC=elementC.getAttribute("title");
              if(colC!=""){

```



```

    attr="";
    for (k=0; k<=colC.length; k++){
        if((colC.substr(k,1)=='')||(k==colC.length)){
            klasC.push(attr);
            var elementD=document.getElementById(attr);
            attr="";
            var colD=elementD.getAttribute("title");
            if(colD!=""){
                attr="";
                for (l=0; l<=colD.length; l++){
                    if((colD.substr(l,1)=='')||(l==colD.length)){
                        klasD.push(attr);
                        attr="";
                    }
                    else attr=attr+colD.substr(l,1);
                }
            }
            attr="";
        }
        else attr=attr+colC.substr(k,1);
    }
    attr="";
}
else attr=attr+colB.substr(j,1);
}
}
else attr=attr+colA.substr(i,1);
}
}
}

```

// Het verwerken van de informatie.

```

function schrijfLijst(id, actie){
    var attr;
    var element;
    if(actie!='nietGekozen'){
        for(k=0; klasD.length>0;){
            attr=klasD.pop()
            element=document.getElementById(attr);
            element.setAttribute('class', 'vervolg4');
            element.setAttribute('className', 'vervolg4');
        }
        for(k=0; klasC.length>0;){
            attr=klasC.pop()
            element=document.getElementById(attr);
            element.setAttribute('class', 'vervolg3');
            element.setAttribute('className', 'vervolg3');
        }
        for(k=0; klasB.length>0;){
            attr=klasB.pop()
            element=document.getElementById(attr);
            element.setAttribute('class', 'vervolg2');
            element.setAttribute('className', 'vervolg2');
        }
        for(k=0; klasA.length>0;){
            attr=klasA.pop()
            element=document.getElementById(attr);
            element.setAttribute('class', 'vervolg1');
            element.setAttribute('className', 'vervolg1');
        }
        element=document.getElementById(id);
        element.setAttribute('class', 'vervolg0');
        element.setAttribute('className', 'vervolg0');
    }
    else{
        for(k=0; klasD.length>0;){
            attr=klasD.pop()
            element=document.getElementById(attr);

```

```

element.setAttribute('class', 'nietGekozen');
element.setAttribute('className', 'nietGekozen');
}
for(k=0; klasC.length>0;){
attr=klasC.pop()
element=document.getElementById(attr);
element.setAttribute('class', 'nietGekozen');
element.setAttribute('className', 'nietGekozen');
}
for(k=0; klasB.length>0;){
attr=klasB.pop()
element=document.getElementById(attr);
element.setAttribute('class', 'nietGekozen');
element.setAttribute('className', 'nietGekozen');
}
for(k=0; klasA.length>0;){
attr=klasA.pop()
element=document.getElementById(attr);
element.setAttribute('class', 'nietGekozen');
element.setAttribute('className', 'nietGekozen');
}
element=document.getElementById(id);
element.setAttribute('class', 'nietGekozen');
element.setAttribute('className', 'nietGekozen');
}
}

```

Hieronder is de broncode van routenet.css weergegeven. Dit bestand regelt de vormgeving van de tabel in het bestand index.html.

routenet.css

```

td {
vertical-align:middle;
text-align:center;
}
.vervolg0 {
background-color: #dddfff;
}
.vervolg1 {
background-color: #ccccee;
}
.vervolg2 {
background-color: #bbbbed;
}
.vervolg3 {
background-color: #aaaacc;
}
.vervolg4 {
background-color: #a0a0c0;
}
.nietGekozen {
background-color: #9999bb;
}
A:link {text-decoration: none; color: black}
A:visited {text-decoration: none; color: black}
A:active {text-decoration: none; color: black}
A:hover {text-decoration: none; color: blue}

```

Appendix B Script <langaufun>

<langaufun> is een script waarmee een fit aan de MPV data gedaan kan worden. De fitprocedure met een convolutie van Landau- en Gaussdistributies wordt beschreven in sectie 3.4.9.

```
Double_t langaufun(Double_t *x, Double_t *par) {

//Fit parameters:
//par[0]=Width (scale) parameter of Landau density
//par[1]=Most Probable (MP, location) parameter of Landau density
//par[2]=Total area (integral -inf to inf, normalization constant)
//par[3]=Width (sigma) of convoluted Gaussian function
//par[4]=height Gaus2
//par[5]=location centre gaus2
//par[6]=width Gaus2
//In the Landau distribution (represented by the CERNLIB approximation),
//the maximum is located at x=-0.22278298 with the location parameter=0.
//This shift is corrected within this function, so that the actual
//maximum is identical to the MP parameter.

// Numeric constants
Double_t invsq2pi = 0.3989422804014; // (2 pi)^(-1/2)
Double_t mpshift = -0.22278298; // Landau maximum location

// Control constants
Double_t np = 100.0; // number of convolution steps
Double_t sc = 5.0; // convolution extends to +-sc Gaussian sigmas

// Variables
Double_t xx;
Double_t mpc,mpc2;
Double_t fland,fland2;
Double_t fg;
Double_t sum = 0.0;
Double_t xlow,xupp;
Double_t step;
Double_t i;

// MP shift correction
mpc = par[1] - mpshift * par[0];
mpc2 = par[8] - mpshift * par[7];

// Range of convolution integral
xlow = x[0] - sc * par[3];
xupp = x[0] + sc * par[3];

step = (xupp-xlow) / np;

// Convolution integral of Landau and Gaussian by sum
for(i=1.0; i<=np/2; i++) {
xx = xlow + (i-.5) * step;
fland = par[2] *TMath::Landau(xx,mpc,par[0]) / par[0];
fg = par[4]*TMath::Gaus(xx,par[5],par[6]);
fland2 = par[9]*TMath::Landau(xx,mpc2,par[7]) / par[7];
sum += (fland+fg+fland2)* TMath::Gaus(x[0],xx,par[3]);

xx = xupp - (i-.5) * step;
fland = par[2]*TMath::Landau(xx,mpc,par[0]) / par[0];
fg = par[4]*TMath::Gaus(xx,par[5],par[6]);
fland2 = par[9]*TMath::Landau(xx,mpc2,par[7]) / par[7];
sum += (fland+fg+fland2) * TMath::Gaus(x[0],xx,par[3]);
}

return (step * sum * invsq2pi / par[3]);
}
```

Appendix C Convolutiefit MPV-waarden detector 7 (2004)

Met het script uit Appendix A is een convolutiefit (sectie 3.4.9) gemaakt aan de MPV-data uit 2004 van detectiestation 7. De parameters van de fit zijn hieronder getabelleerd.

Fitting 1...

```
FCN=72.4254 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 795 CALLS 796 TOTAL
EDM=7.41381e-08 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 Width 1.25365e-01 1.14642e-03 1.14010e-05 4.45931e-02
2 MP 9.38091e-01 4.51325e-04 1.87756e-05 3.52996e-02
3 Area 3.37042e+04 9.21773e+01 7.13666e-07 1.59551e+00
4 GSigma 1.76225e-01 1.35332e-03 6.25823e-06 1.33283e-01
5 Gaus2Height 1.49271e+00 1.41626e-02 7.32535e-07 6.87844e+00
6 Gaus2Centre 3.02321e-01 8.63953e-04 5.62895e-06 -1.23724e-01
7 Gaus2Width 8.19743e-02 7.71641e-04 2.06830e-06 -4.99184e-01
```

Fitting 1 done

Fitting 2...

```
FCN=136.037 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 2046 CALLS 2047 TOTAL
EDM=7.78904e-05 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 3.5 per cent
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 Width 1.45506e-01 1.03263e-03 3.25545e-04 2.18786e+00
2 MP 9.42503e-01 4.60344e-04 4.01027e-06 -5.19242e-01
3 Area 3.36093e+04 9.05644e+01 -6.95141e-06 1.23645e+02
4 GSigma 1.72379e-01 9.24541e-04 -9.23002e-05 3.07752e+00
5 Gaus2Height 2.47198e+00 2.53617e-02 2.25396e-06 4.76411e+01
6 Gaus2Centre 2.67342e-01 4.52971e-04 2.07388e-05 9.89309e+00
7 Gaus2Width 5.61300e-02 5.03450e-04 1.07608e-05 1.42329e+01
```

Fitting 2 done

```
FCN=16358.1 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 160 CALLS 161 TOTAL
EDM=2.18485e-08 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 2.1 per cent
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 Constant 1.34201e+04 4.39242e+01 -1.85732e-01 -4.39739e-06
2 MPV 2.26765e+00 1.95669e-03 1.02769e-07 1.01874e-01
3 Sigma 3.30283e-01 9.24330e-04 2.49924e-06 -1.77445e-01
```

```
FCN=17074.4 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 128 CALLS 129 TOTAL
EDM=1.66978e-06 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 2.2 per cent
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 Constant 1.14443e+04 4.12965e+01 1.23328e+00 -2.64469e-05
2 MPV 2.33377e+00 2.16154e-03 -3.58748e-05 8.94070e-01
3 Sigma 3.58651e-01 1.17337e-03 -2.24149e-05 -7.50802e+00
```

Op dezelfde wijze zijn de fitparameters gevonden voor de andere stations in de Nijmegen cluster. Met deze methode is een uniforme analyse uitgevoerd naar (het verloop van) de gemiddelde MPV-waarde van iedere scintillatie-opstelling, voor ieder station. Fitwaarden voor andere stations zijn beschikbaar.

Two leerlingen Coornhert Lyceum mogen naar deeltjesversneller Prijswinnaars niet bang voor zwart gat in Zwitserland

DOOR IVO LAAN

HAARLEM - Nee, ze zijn niet bang dat ze in een zwart gat terechtkomen, straks bij de deeltjesversneller. Leerlingen Jacek Smit en Matthijs Kuik van het Coornhert Lyceum mogen in juni een zeldzaam bezoek brengen aan het gigantische onderzoekscentrum in Zwitserland.

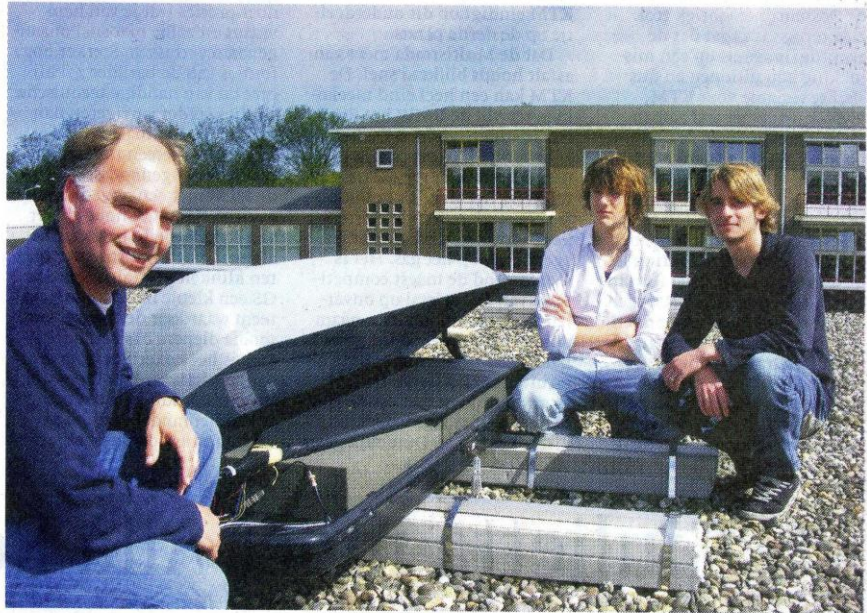
Het bezoek hebben ze gewonnen via een scholenproject Hisparc: High School Project on Astrophysics Research with Cosmics. Zo vormen de scholen een wetenschappelijk netwerk. Jacek en Matthijs hebben de prijs gewonnen met hun uitmuntende profielwerkstuk over kosmische straling.

Aan het Hisparc-project doet een aantal middelbare scholen mee, zoals het Coornhert. Jacek legt uit dat er op het dak van hun school platen liggen waarmee de kosmische straling wordt opgevangen. Het doel is om uit te vinden hoeveel straling er neerkomt en waar die vandaan komt. Voor leken een ingewikkeld verhaal. In het kort komt het er op neer dat er vanuit de ruimte minuscule deeltjes tegen de aarde botsen. Die zijn kleiner dan een atoom. We gaan even het dak op om de detectoren te bekijken. Zijn de leerlingen net op wintersport geweest? Nee, de platen zijn verwerkt in skiboxen om te voorkomen dat er licht bij komt.

Onder de bezielende leiding van leraar natuurkunde Erik Klesser gingen ze aan de slag met hun metingen.

Het werkstuk was een hele kluit. Jacek: „Voordat we er aan begonnen, snapten we er niks van. Pas toen we het gingen schrijven, vielen langzaam de kwartjes.” Hun leraar Klesser is trots op ze. „Ze hebben er ook een stukje relativiteitstheorie in verwerkt. Dat hoeven ze als havo-scholieren helemaal niet te doen want het is vwo-stof. En dus behoorlijk extra stof.”

Op 14 juni mogen de twee naar de deeltjesversneller in Zwitserland. Een tunnel met een omtrek van 27 kilometer waar protonen tegen elkaar worden gebotst om te zien welke energie er vrij komt. In het



Docent Erik Klesser, Matthijs Kuik en Jacek Smit bij een van de platen waarmee de kosmische straling wordt opgevangen op het dak van de school.

FOTO IVO LAAN

onderzoeksinstituut werken tientallen landen samen, het is de crème de la crème van de wetenschap. En Jacek en Matthijs. Jammer is dat ze de tunnel niet in mogen. Ze mogen alleen in de controlekamer komen. Op een dag vliegen ze op en neer naar Zwitserland.

Zwart gat

Het is best spannend, want niemand weet precies welke gevolgen het op elkaar botsen van de protonen heeft. Sommigen zeggen dat er wel eens een zwart gat zou kunnen ontstaan. Maar die angst is, logisch gereedeneerd, niet aanwezig, benadrukt Klesser. Maar ja, niemand weet het zeker. Klesser: „Dat is waar.”

Gaan de twee door in de natuurkunde? Jacek niet, want die wil informatica gaan doen maar Matthijs weet het nog niet. „Ik ga eerst elektrotechniek doen en daarna zie ik wel.”

Natuurkunde is een tijdlang niet echt een populair vak geweest. Daar hoopt het Coornhert verandering in te brengen.



De deeltjesversneller in Zwitserland waar de twee leerlingen op bezoek gaan.

ARCHIEFFOTO

Klesser: „Onze school staat vooral bekend als cultuurschool met veel muziek. Maar we hebben nu een experiment met natuurkunde in de eerste klas. Daardoor hopen we er voor te

zorgen dat leerlingen het vak in de tweede klas sneller en beter oppikken want we merkten dat vooral het rekenwerk nogal eens problemen opleverde. Nu hebben ze een jaar langer.”

Coornhertleerlingen naar Zwitserland geweest

Deeltjesversneller leerzamer dan verwacht

DOOR IVO LAAN

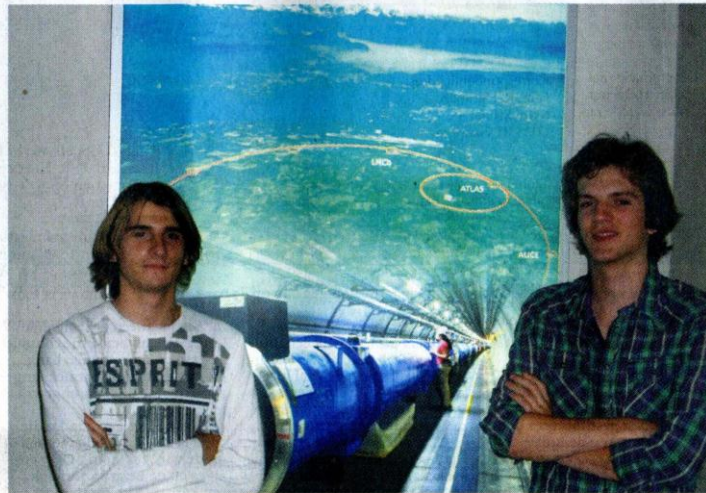
HAARLEM - Leerlingen Jacek Smit en Matthijs Kuik van het Coornhert Lyceum zijn weer veilig thuis. Bij hun bezoek aan de deeltjesversneller in Zwitserland zijn ze niet in een zwart gat beland.

De twee mochten naar de deeltjesversneller nadat ze een prijs hadden gewonnen met hun profielwerkstuk over kosmische straling. Ze moesten vroeg op om op één dag heen en terug te vliegen naar Zwitserland.

Met de taxi naar het mega-onderzoekscentrum waar verschillende landen samenwerken om meer te weten te komen van de elementaire deeltjes. Van de buitenkant zag het onderzoekscentrum er niet heel spectaculair uit, vertelt Jacek. „Je zou niet zeggen dat het er staat als je er voor staat.”

Een Nederlandse wetenschapper nam de twee op sleeptouw bij de rondleiding. „Eerst gingen we naar een grote hal waar de buizen worden gemaakt. Het zag er uit als een werkplaats voor auto's.”

Het enige jammere was dat ze niet in de tunnel mochten. Maar ze kregen wel een presentatie te zien. Ook kregen ze te



Jacek Smit en Matthijs Kuik voor een foto van de deeltjesversneller.

EIGEN FOTO

horen waarom het vorig jaar mis ging met de 27 kilometer lange deeltjesversneller. „Heel interessant.” Er ontstond een

lek in de magneten waardoor vloeibaar helium wegstroomde. Het project lag een jaar stil. „Ze hadden fouten gemaakt met de

montage.” Een dure, hele dure fout. „Nogal ja.”

Er moest natuurlijk ook gelucht worden in een van de

vier restaurants in het onderzoekscentrum waar 6500 wetenschappers uit tachtig landen samenwerken. Daarna snel door naar de computerruimte. Dat was best indrukwekkend, vertelt Jacek die zelf verder wil in de IT na zijn havo-examen. „Dat is een ruimte van veertig bij zestig meter met ontzettend veel computers en servers. Ik bleef maar vragen stellen. Zoals hoeveel opslagcapaciteit er is. Ze wisten dat niet eens: maar heel veel!”

Grafieken

Daarna naar nog een controlekamer van een grote magneet, de Atlas, die trouwens is gebouwd door Nederlanders. „Ook daar weer gigantisch veel computers. Wat daar op te zien is? Allemaal grafieken van wat er gebeurt als er deeltjes botsen. We kregen daar uitleg van een Nederlandse. Op zich was het wel goed te begrijpen.”

Leerzamer

Het bezoek was nuttiger dan verwacht, zegt de Coornhertleerling. „Ik had eerst zoiets van 'ik zie het wel', maar al met al was het wel leerzamer dan verwacht.”

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.hisparc.nl/docent-student/de-fysica/achtergrond-informatie-wetenschappelijk/>
- [8] <http://www.desy.de/>
- [9] <http://public.web.cern.ch/public/>
- [10] <http://www.fnal.gov/>
- [11] <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>
- [12] Pierre Auger Observatorium: <http://www.auger.org/>
- [13] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1936/hess-lecture.html
- [14] J. Horändel, Radboud Universiteit Nijmegen, interacademiaal college 2008.
- [15] J. Blümer et al., Prog. in Particle and Nuclear Physics (2009, in print).
- [16] 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.
- [17] P. Auger and R. Maze, Comptes rendus, Acad. Sci. 207 (1938) 228.
- [18] C. Timmermans et. al., Nederlands tijdschrift voor Natuurkunde, december 2004.
- [19] Bonhoeffer College, Castricum: <http://www.bonhoeffer.nl/>
- [20] T.K. Gaisser and T. Stanev, 'Review of Particle Physics', Phys. Lett., B667:1, 2008.
- [21] W.R. Leo, 'Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment', Springer-Verlag, 1987.
- [22] H. Bichsel, D.E. Groom and S.R. Klein, Review of particle physics, Phys. Lett. B667:1, 2008.
- [23] M.J. Berger et al. 'Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions', NIST Standard Reference Database 124, Last update 2005. Available from: <http://www.nist.gov/physlab/data/star/index.cfm>.
- [24] I.S. Jones et al. 'Ionization energy loss of muons in a plastic scintillator', J. Phys. A: Gen. Phys. 1, 1968.
- [25] J. Steijger, private communication (internal note), Nikhef, Amsterdam, 2010.
- [26] Specifications 9107SB photomultiplier: <http://www.electron-tubes.co.uk/pdf/9107B.pdf>
- [27] T. Pierog, D. Heck and J. Knapp, 'CORSIKA, an Air Shower Simulation Program', zie bijv. <http://www-ik.fzk.de/corsika/>
- [28] J.D. Haverhoek, 'Ultra High Energy Cosmic Ray Extensive Air Shower Simulations using CORSIKA'. Thesis, University of Leiden, 2006.
- [29] Zaanlands Lyceum, Zaandam: <http://portal.ovo-zaanstad.nl/sites/ZaanlandsLyceum>.

- [30] K. Kortland, Universiteit Utrecht private communication, Amsterdam (2010).
- [31] Oostvaarders College, Almere: <http://www.ovc.nl/>
- [32] Dr. Moller College, Waalwijk: <http://www.drmollercollege.nl/>
- [33] <http://root.cern.ch/drupal/>
- [34] M. Nagano & A. A. Watson, Rev. of Mod. Phys. 72 (2000), 689 – 732.
- [35] <http://hisparc.hef.kun.nl/>
- [36] L. Landau, J. Physics (USSR) **8** (1944) 201. Also: Collected Papers, D. ter Haar (Ed.), Pergamon Press, Oxford, 1965.
- [37] T. Davidek & R. Leitner, Parametrization of the muon response in the tile calorimeter, cdsweb.cern.ch/record/683578/files/tilecal-97-114.ps.g
- [38] 'Leraar in Onderzoek 2008/2009' (5 oktober 2009), sectie 3.3, 5 oktober 2009.
- [39] <http://www.jhu.edu/~signals/convolve/index.html>
- [40] Zernike College, Groningen: <http://www.zernike.nl/>.
- [41] 'Leraar in Onderzoek 2008/2009' , Dorrieth Pennink (analyse data Science Park Amsterdam), 5 oktober 2009.
- [42] 'Leraar in Onderzoek 2008/2009', Teun van Heesch en Sjaak Wolst (analyse data Nijmegen cluster), 5 oktober 2009.
- [43] 'Correlation between Barometric Pressure and Cosmic Ray Intensity', Ashley Batten and Teresa Kerr, Department of Physics, Marian High School, Omaha US, submitted 23-03-2001.
- [44] 'An educational study of the barometric effect of cosmic rays with a Geiger counter', Barbera Famoso, Paola La Rocca and Francesco Riggi, Department of Physics and Astronomy, Catania Italy. Physics Education 2005.
- [45] Moscou neutron monitor, via Google search: 'Moscou Neutron monitor'.
- [46] Adelaide muon telescoop, <http://www.physics.adelaide.edu.au/astrophysics/muon/index.html>.
- [47] Cosmic Ray Laboratory in Lodz, Forbush decrease op 17 sept 2000. <http://www.u.lodz.pl/english/e000917.html>.
- [48] HiSPARC site: www.hisparc.nl.
- [49] 'Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to-approach', W.R. Leo, second edition, Springer Verlag, ISBN 3-540-57280-5.
- [50] Documentatie firma Matsusada over de HPMC-2.2N-DSY PMT en High Voltage Power Supply.
- [51] 'Temperature dependence of spurious pulses in use of plastic scintillation detectors', Yasishi Kawada, Jun Ito and Qiu-Wei Wang. Elsevier, Applied Radiation and Isotopes, 2003.
- [52] Stedelijk Gymnasium Johan van Oldenbarnevelt, Amersfoort: <http://www.jvo.nl/>.
- [53] 'Premium Plastic Scintillators BC-400, BC-404, BC408, BC-412, BC-416' datasheet, Saint-Gobain Ceramics & Plastics Inc. <http://www.detectors.saint-gobain.com/>.
- [54] <http://www.electrontubes.com/>.

- [55] Hamamatsu MPPC (Multi pixel photon counter), S10362-11 series, S10362-33 series,
<http://sales.hamamatsu.com/en/products/solid-state-division/si-photodiode-series/mppc.php?src=hp>.
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/s10362-11series_kapd1022e05.pdf.
- [56] 'Radiation Detection and Measurement' in Scintillation Detector Principles, Glenn F. Knoll, John Wiley & Sons (1979), 239-26.
- [57] 'Transmissie', Jos Steijger private communication, Nikhef, Amsterdam (2010).
- [58] Vechtstede College, Weesp: <http://www.vechtstedecollege.nl/>