

# Het testen van de FOCAL

Jaap van Wijck  
Institute of Subatomic Physics - Universiteit Utrecht

Supervisor: G.J.L. Nooren

22 november 2012

# Inhoudsopgave

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theorie</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Elektromagnetische interacties . . . . .                   | 4         |
| 2.1.1    | Elektromagnetische showers . . . . .                       | 5         |
| 2.1.2    | Cherenkov straling . . . . .                               | 6         |
| 2.2      | Scintillatie detector . . . . .                            | 6         |
| 2.2.1    | Donkerstroom . . . . .                                     | 8         |
| 2.2.2    | Kosmische Straling . . . . .                               | 8         |
| 2.2.3    | Ruimtehoek . . . . .                                       | 9         |
| 2.3      | Elektromagnetische Calorimeter . . . . .                   | 10        |
| 2.4      | Gas Cherenkov detector . . . . .                           | 10        |
| <b>3</b> | <b>Kosmische stralingsdetectie</b>                         | <b>12</b> |
| 3.1      | Doelstelling . . . . .                                     | 12        |
| 3.2      | Opstelling . . . . .                                       | 12        |
| 3.3      | Methode . . . . .  | 13        |
| 3.4      | Resultaten . . . . .                                       | 14        |
| 3.4.1    | Bepaling van de optimale werkspanning . . . . .            | 14        |
| 3.4.2    | Bepaling kosmische muonflux . . . . .                      | 16        |
| 3.5      | Discussie . . . . .  | 16        |
| 3.5.1    | Systematische fouten . . . . .                             | 16        |
| 3.5.2    | Literatuurwaarde . . . . .                                 | 17        |
| 3.6      | Conclusie . . . . .  | 17        |
| <b>4</b> | <b>Bundeltest voorbereidingen</b>                          | <b>18</b> |
| 4.1      | Doelstelling . . . . .                                     | 18        |
| 4.2      | Bepaling van de uitlezing van de chips . . . . .           | 20        |
| 4.2.1    | Methode . . . . .  | 20        |
| 4.2.2    | Resultaten . . . . .                                       | 20        |
| 4.2.3    | Discussie . . . . .  | 21        |
| 4.2.4    | Conclusie . . . . .  | 24        |
| 4.3      | Kwaliteits- en gevoeligheidsbepalingen van chips . . . . . | 25        |
| 4.3.1    | Methode . . . . .  | 25        |
| 4.3.2    | Resultaten . . . . .                                       | 27        |
| 4.3.3    | Discussie . . . . .  | 30        |
| 4.3.4    | Conclusie . . . . .  | 30        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>Bundeltest</b>  | <b>31</b> |
| 5.1      | Doelstelling . . . . .   | 31        |
| 5.2      | Methode . . . . .  | 31        |
| 5.3      | Resultaten . . . . .   | 34        |
| 5.4      | Discussion . . . . .   | 37        |
|          | 5.4.1 Teveel coïncidenties . . . . .                           | 37        |
|          | 5.4.2 Dubbele coïncidenties . . . . .                          | 39        |
|          | 5.4.3 Verbeteringen . . . . .                                  | 39        |
| 5.5      | Conclusie . . . . .  | 39        |
|          | <b>Bijlage A Data coördinaten uitlezing chips</b>              | <b>40</b> |
|          | <b>Bijlage B Data kwaliteit en gevoeligheidsbepaling chips</b> | <b>41</b> |
|          | <b>Bijlage C PS bundeltest</b>                                 | <b>44</b> |
|          | C.1 Telsnelheden P fotomultipliër . . . . .                    | 44        |
|          | C.2 Triggerdata . . . . .                                      | 45        |

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

Tijdens dit bacheloronderzoek zijn verschillende onderdelen en eigenschappen bepaald en geoptimaliseerd van het prototype van de toekomstige *Forward Calorimeter*, ook wel de *FOCAL* genoemd. De *FOCAL* is een digitalelektromagnetische-sampeling-calorimeter die ontworpen is om in de *ALICE* detector in CERN opgenomen te worden.

Eerst zal de theorie worden besproken van elektromagnetische interacties en detectoren die betrekking hebben op dit onderzoek. Hierna zullen de drie deelonderzoeken worden behandeld. In het eerste deelonderzoek is de kosmische muonflux bepaald die door de detector gaat. Dit is gedaan door de coincidenties te bepalen tussen twee fotomultiplieers die boven en onder het prototype van de *FOCAL* zijn geplaatst. In het tweede onderzoek is geprobeerd om het functioneren van het prototype van de *FOCAL* te verbeteren. Hierbij is een coördinatenstelsel voor het dataverwerkingsprogramma bepaald. Daarnaast zijn de kwaliteit en gevoeligheid van 27 modules bepaald om een optimale rangschikking te vinden voor de mogelijke plaatsing van deze 27 modules in de detector. In het laatste onderzoek is het prototype van de *FOCAL* getest door deze in een deeltjesbundel te zetten van de *Proton Synchrotron* op *CERN*. Hiervan is de triggerdata geanalyseerd.

# Hoofdstuk 2

## Theorie

### 2.1 Elektromagnetische interacties

Geladen deeltjes die door materie gaan, verliezen energie en worden van richting veranderd. Dit is voornamelijk het gevolg van inelastische botsingen tussen inkomende deeltjes en atomaire elektronen van de materie en elastische verstrooiingen van inkomende deeltjes met de atoomkernen. Lichte geladen deeltjes, zoals elektronen en positronen verliezen daarnaast ook energie door het uitzenden van Cherenkov licht[2]. Daarom moet er een onderscheid worden gemaakt tussen lichte deeltjes, elektronen en positronen en zware deeltjes, pionen, muonen en protonen.

Het energieverlies van zware deeltjes wordt voornamelijk veroorzaakt door inelastische botsingen in de materie [2]. Bij dit soort botsingen wordt een gedeelte van de energie van een zwaar deeltje aan het atoom overgedragen. Hierdoor kan het atoom in een aangeslagen toestand komen of zelfs worden geïoniseerd. Hoewel de energieoverdracht per botsing verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de kinetische energie van het inkomend deeltje, zal er door vele botsingen een groot percentage van de kinetische energie worden geabsorbeerd door de materie. Elastische verstrooiingen komen minder vaak voor als elastische botsingen [2]. Ook is de energieoverdracht in detectoren vele malen kleiner, doordat de atomen in de materie vele malen zwaarder zijn dan de geladen zware deeltjes.

Het energieverlies van geladen deeltjes per weglengte kan kwantum mechanisch worden beschreven met behulp van de *Bethe-Bloch Formula*, weergegeven in de volgende uitdrukking [2]:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln\left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2}\right) - 2\beta^2 \right] \quad (2.1)$$

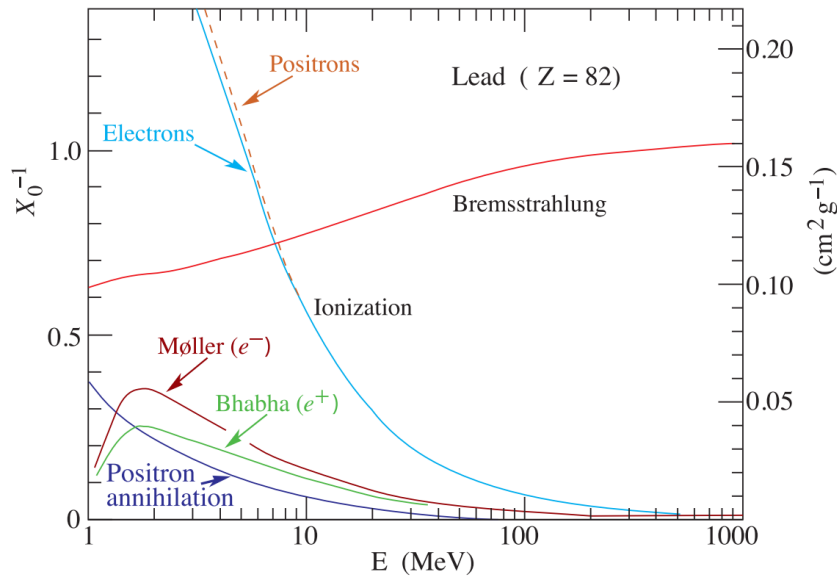
Hierin is  $E$  de energie,  $N_a$  het getal van *Avogadro*,  $r_e$  de elektron straal,  $m_e$  de elektron rustmassa,  $c$  de lichtsnelheid in vacuüm,  $\rho$  de dichtheid van het materiaal,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $v$  de snelheid van het deeltje,  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ ,  $W_{max}$  de maximaal overgedragen energie,  $I$  de gemiddelde excitatie energie,  $z$  de lading van het invallende deeltje,  $Z$  het atoomnummer van het invallende deeltje,  $A$  de atoom-

massa van het absorptie materiaal en  $x$  de afstand afgelegd door het geladen deeltje in materie. De maximale energie overdracht vindt plaats wanneer er zich een botsing voordoet waarbij het geladen deeltje secundaire ionisatie sporen achterlaat. Voor een inkomend deeltje met een massa  $M$  wordt de maximale overgedragen energie gegeven door [2]:

$$W_{max} = \frac{2m_e c^2 (\beta\gamma)^2}{1 + 2\frac{m_e}{M} \sqrt{1 + (\beta\gamma)^2} + \frac{m_e}{M}} \quad (2.2)$$

### 2.1.1 Elektromagnetische showers

Elektromagnetische showers ontstaan wanneer hoog energetische elektronen, positronen of fotonen een stuk materie binnendringen. Hoog energetische elektronen en positronen, die worden versneld, zullen *remstraling* uitzenden [11]. Hoog energetische fotonen kunnen *paarcreatie* veroorzaken, de creatie van een deeltje met zijn antideeltje [11]. De energieverliezen van elektronen en positronen bij verschillende energieën per stralingslengte worden weergegeven in figuur 2.1. De stralingslengte is gedefinieerd als de karakteristieke lengte, die doorlopen moet worden door een materiaal voordat de energie tot een factor  $1/e$  voor elektronen en positronen of een factor  $7/9$  voor fotonen is afgenomen [11].



Figuur 2.1: De fractie van het energie verlies per stralingslengte in lood als functie van de elektron of positron energie, naar 11.

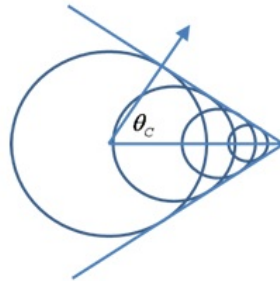
Zowel *remstraling* als *paarcreatie* kunnen cascades van interacties veroorzaken. Deze cascades zullen doorgaan totdat de gevormde deeltjes zo'n lage energie hebben gekregen dat deze worden geabsorbeerd door de atomen. Het aantal deeltjes gevormd in een shower gaat bij benadering lineair met de energie van het invallende deeltje [14].

### 2.1.2 Cherenkov straling

Wanneer een hoog energetisch geladen deeltje door een medium gaat met een snelheid die groter is dan de lichtsnelheid in het medium, zal het geladen deeltje straling uitzenden in de vorm van Cherenkov licht. De kritieke snelheid van een geladen deeltje dat Cherenkov straling uitzendt wordt gegeven door [2]:

$$v_{krit} = \frac{c}{n} \quad (2.3)$$

Hierin is  $n$  de brekingsindex van het medium en  $c$  de lichtsnelheid. Figuur 2.2 is een schematische weergave van de gevormde schokgolf. Hierin wordt de hoek  $\theta$  gegeven door  $\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}$ .

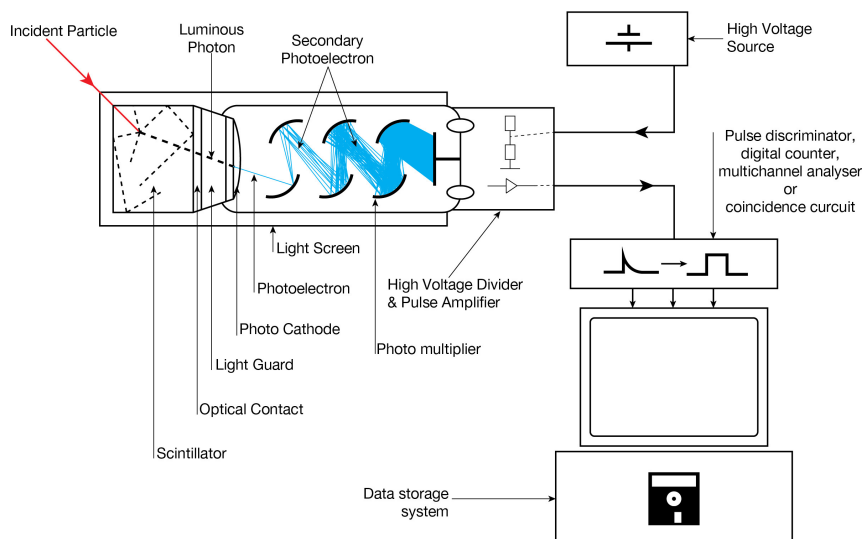


Figuur 2.2: Een schematische weergave van de schokgolven die worden gevormd wanneer een geladen deeltje sneller gaat dan de lichtsnelheid in het medium.

## 2.2 Scintillatie detector

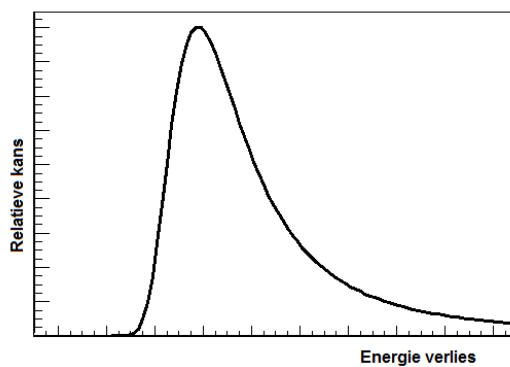
Een scintillatiedetector bestaat uit twee onderdelen, een scintillator en een fotomultipliër. Een scintillator is een materiaal waarin fotonen worden gecreeërd wanneer er een geladen deeltje doorheen gaat. De fotomultipliër detecteert fotonen en zet deze om in elektrische signalen. Een fotomultipliër bestaat uit een fotokathode, een focusrooster, een reeks van dynodes en een anode. Een fotokathode zet lichtsignalen via het foto-elektrisch effect om in elektrische signalen. Een focusrooster focust de vrijgekomen elektronen op de dynodes. De dynodes vermenigvuldigen het aantal vrijgekomen elektronen. Hierdoor wordt een stroom in de anode veroorzaakt. Figuur 2.3 is een schematische weergave van een scintillatiedetector.

De spanning die wordt gezet over een fotomultipliër bepaalt de *gain*[2], de toename in lading van de kathode naar de anode. De spanning over een fotomultipliër bepaalt hierdoor de sterkte van de uitgangssignalen die worden doorgegeven aan de discriminator. Niet ieder muon maakt evenveel fotonen in een scintillator. Deze fluctuaties worden veroorzaakt doordat niet ieder muon evenveel energie overdraagt aan de scintillator. De *Landau verdeling* wordt gebruikt om de fluctuaties in energieverliezen van geladen gedeeltjes in dunne



Figuur 2.3: Een schematische weergave van een scintillatiedetector, naar [1].

lagen materie te beschrijven [2]. Figuur 2.4 geeft een typisch voorbeeld van de *Landau verdeling*.



Figuur 2.4: Energie verliezen van geladen deeltjes in dunne lagen materie, beschreven door de *Landau verdeling*.

Vanaf een bepaalde gain zullen alle signalen afkomstig uit interacties met muonen gedetecteerd worden door de discriminator. Doordat de signalen afkomstig uit de ruis minder sterk zijn, zal vanaf een bepaalde spanning de telsnelheid constant moeten blijven. Wordt de spanning verder opgevoerd, dan zullen ruissignalen ook door de discriminator worden geteld. Het spanningsgebied waar de telsnelheid constant blijft bij veranderingen in de spanning wordt het *plateau* genoemd.

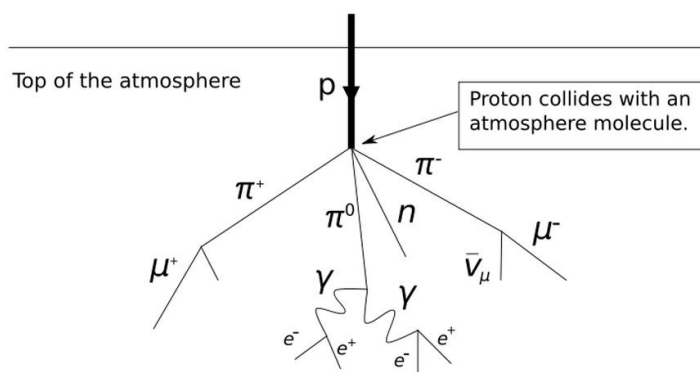


## 2.2.1 Donkerstroom

Een onbelichte fotomultiplier produceert een interne stroom. Deze stroom wordt ook wel donkerstroom of 'Dark current' genoemd [2]. De voornaamste oorzaak van donkerstroom is thermische emissies van de dynodes en de kathode.

## 2.2.2 Kosmische Straling

Muonen die het aardoppervlak bereiken worden in de atmosfeer gevormd doordat kosmische deeltjes botsen met atmosferische moleculen [3]. De interactie produceert een cascade van duizenden interacties. Figuur 2.5 is een voorbeeld van een interactie veroorzaakt door een kosmisch proton. In de cascaderactie komen onder andere muonen vrij.



Figuur 2.5: Een schematische weergave van het interactie en het verval proces van verschillende soorten pionen, veroorzaakt door een proton uit kosmische straling, naar [4]

Muonen die onder een hoek binnen vallen hebben een grotere weglengte afgelegd ten opzichte van muonen die verticaal binnen komen. De toename in weglengte schaaft met een factor  $\frac{1}{\cos(\theta)}$ . Muonen hebben een halfwaarde tijd van 2.2 microseconde. Dit komt neer op een  $c\tau$  van 660 m. Door de hoge snelheden van de muonen zullen relativistische effecten de weglengte verlengen. De relativistische energie van een muon wordt gegeven door [5]:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (\vec{p}c)^2} \quad (2.4)$$

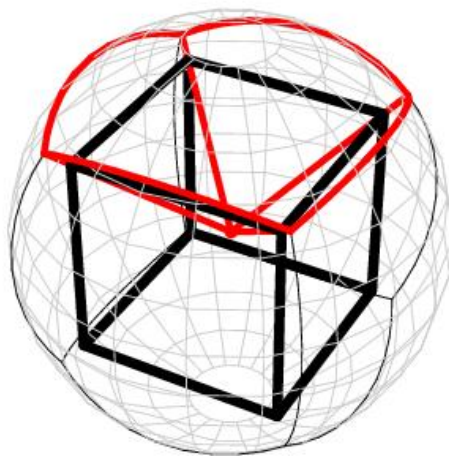
De tijdsdilatatie wordt gegeven door [5]:

$$t = \gamma \cdot t' \quad (2.5)$$

Hierin is  $\gamma$  gedefinieerd als in uitdrukking 2.3. Ter illustratie: een muon met een energie van 2 GeV heeft dus een weglengte van ongeveer 13,8 km.

### 2.2.3 Ruimtehoek

Bij de bepaling van het aantal muonen dat door een volume gaat, kan worden gekozen voor een opstelling met twee of meerdere scintilliedetectoren waarbij de scintillatoren parallel boven elkaar worden geplaatst. Uit coincidenties tussen beide scintillatoren kan vervolgens worden bepaald hoeveel muonen door dit volume zijn gegaan. Niet alle muonen vallen loodrecht op een scintillatiedetector. Daarom moet de ruimtehoek worden bepaald, waaronder muonen kunnen binnen vallen zodat deze door beide scintillatoren gaan, zie figuur 2.6.



Figuur 2.6: Een eenheidsbol om een kubus vormig object, naar [6].

Door de ruimtehoek te integreren over beide scintillatoroppervlakken kan het aantal coincidenties worden berekend. De literatuurwaarde van de verticale muonflux per steradiaal is  $I_v = 70 \pm 10,5 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ st}^{-1}$  [7]. De hoekafhankelijkheid van de muonflux wordt gegeven door:

$$I(\theta) = I_v \cos^2(\theta) \quad (2.6)$$

De totale flux per ruimtehoek wordt dus gegeven door:

$$J = \int_{\Omega} I(\theta) \cos \theta d\Omega \quad (2.7)$$

Hierin is de hoek  $\theta$  gedefinieerd als:  $\theta(x, y, h) = \arctan \frac{h}{\sqrt{x^2 + y^2}}$  en is  $\Omega$  de ruimtehoek. De ruimtehoek uitgedrukt in cartesische coördinaten wordt gegeven door [8]:

$$d\Omega = \int \hat{n} \cdot d\vec{a} = \int_S dx dy \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (2.8)$$

De totale muonflux per scintillator kan worden berekend door uitdrukkingen (2.7) en (2.9) te substitueren in (2.8) tot de volgende uitdrukking [9]:

$$J = I_v \int \int_S dx dy \frac{z^2(x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^3} \quad (2.9)$$

Om de coïncidenties te bepalen tussen beide scintillatoren moet (2.10) worden aangepast en moet er vervolgens geïntegreerd worden over het tweede scintillatoroppervlak. De coïncidenties worden beschreven in de volgende uitdrukking:

$$J = I_v \int_0^{l_1-x_2} dx_1 \int_0^{b_1-y_2} dy_1 \int_0^{l_2} dx_2 \int_0^b dy_2 \frac{z^2(x_1^2 + y_1^2)}{(x_1^2 + y_1^2 + z^2)^3} \quad (2.10)$$

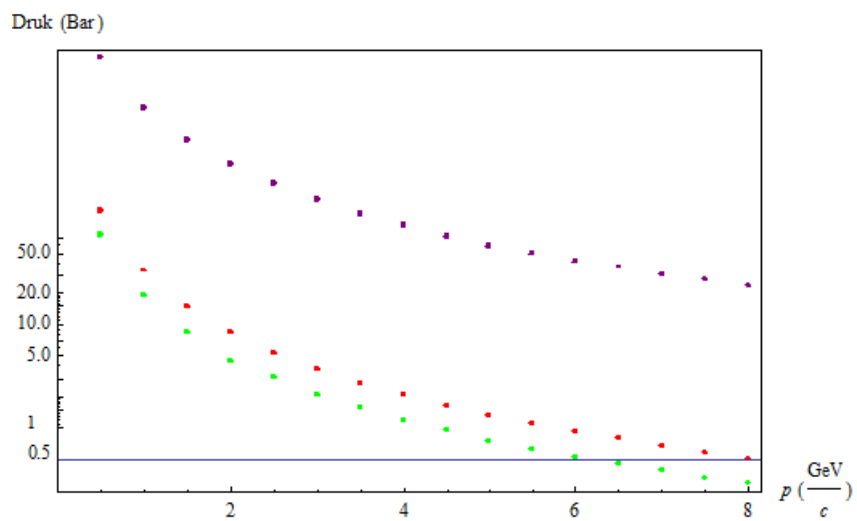
De integratie grenzen  $l_{1,2}$  en  $b_{1,2}$  zijn respectievelijk de afmetingen van beide scintillator oppervlakken.

## 2.3 Elektromagnetische Calorimeter

Een elektromagnetische calorimeter is een detector die de kinetische energie en positie van geladen deeltjes bepaalt door middel van absorptie. In het absorptieproces worden de zo genoemde 'showers' van deeltjes gecreeërd uit cascades van interacties. Elk geladen deeltje dat wordt geabsorbeerd of verstrooid maakt fotonen in het absorptiemateriaal. Hierdoor is de hoeveelheid vrijgekomen fotonen een maat voor de energie van het deeltje. Er zijn twee type calorimeters, *homogene-* en *sampling-calorimeters*. Homogene calorimeters maken gebruik van één enkel materiaal voor de absorptie van deeltjes en de signaalgeneratie. Bij sampling-calorimeters zijn de absorptie en de signaalgeneratie processen gescheiden. Dit soort calorimeters zijn opgebouwd uit verschillende lagen. Elke laag bevat een stuk absorptiemateriaal met een hoge Z-waarde en een detectie-laag. Voor een analoge-sampling-calorimeter kan de detectie-laag een scintillatiedetector zijn, voor een digitale sampling calorimeter kan deze detectie-laag bijvoorbeeld bestaan uit halfgeleidende chips.

## 2.4 Gas Cherenkov detector

Een gas Cherenkov detector bestaat uit een gasbuis en een fotomultipliër. De productie van Cherenkov licht vindt plaats in de gasbuis. De fotomultipliër detecteert en versterkt de vrijgekomen signalen. De lichtsnelheid in het gas kan worden aangepast door de dichtheid van het gas te veranderen, aangezien de brekingsindex vrijwel lineair schaal met de dichtheid van het gas. Doordat verschillende geladen deeltjes, zoals muonen, protonen, pionen en elektronen een verschillende snelheid hebben bij gelijke impuls, kan de gas Cherenkov detector zo worden ingesteld dat deze bijvoorbeeld alleen elektronen telt. Figuur 2.7 geeft de kritieke druk weer van lucht voor de productie van Cherenkov straling door verschillende geladen deeltjes. Ter illustratie, bij een druk van 0.5 bar zullen tot een impuls van 6.5 GeV/c alleen elektronen Cherenkov straling veroorzaken.



Figuur 2.7: De kritieke drukken voor het uitzenden van Cherenkovgas in lucht bij verschillende impulsen van elektronen (blauw), muonen (groen), pionen (rood) en protonen (paars).

## Hoofdstuk 3

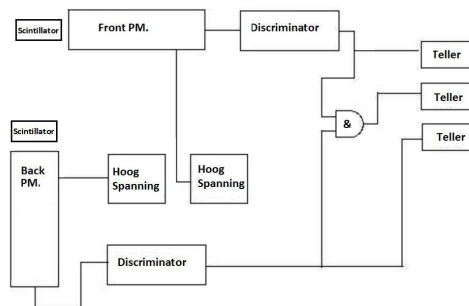
# Kosmische stralingsdetectie

### 3.1 Doelstelling

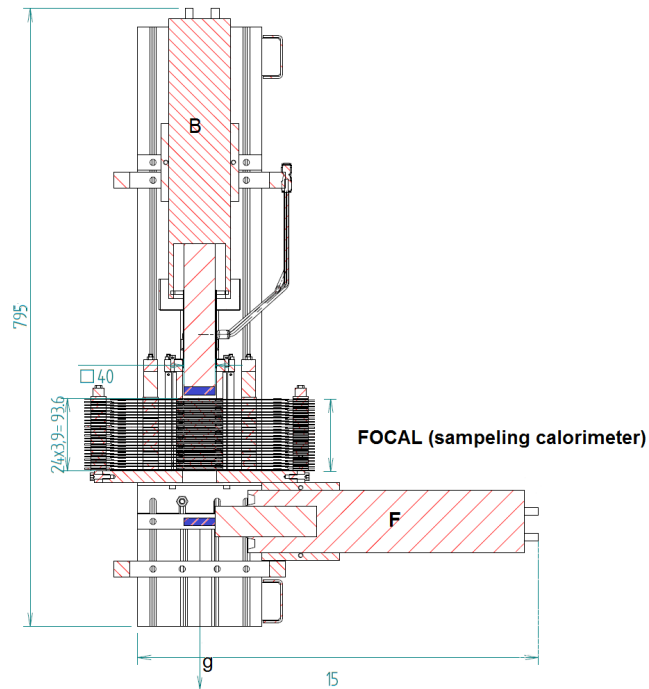
De scintillatiedetectoren in het frame van de prototype van de detector zijn bedoeld voor het verkrijgen van triggerinformatie. Ook kunnen scintillatiedetectoren worden gebruikt voor de bepaling van het aantal hoog energetische kosmische muonen dat door het prototype gaat wanneer deze niet in een deeltjes bundel staat. In dit hoofdstuk wordt deze kosmische muonflux die door het prototype gaat experimenteel bepaald en vergeleken met de literatuurwaarde. Om dit te kunnen bepalen zijn eerst de optimale werkspanningen van beide fotomultiplieers bepaald.

### 3.2 Opstelling

Figuur 3.1 geeft een schematische weergave van de schakeling van de gebruikte instrumenten. Figuur 3.2 geeft een schematische weergave van de opstelling. Op beide fotomultiplieers is hoogspanning gezet. De drempelwaarde van de Front- en Back-discriminator is op -30 mV gezet. In het vervolg zal de *Front scintillatiedetector* worden aangeduid met 'F' en de *Back scintillatiedetector* worden met 'B'. In zowel F als de B zit een scintillator met de afmetingen  $40 \cdot 40 \cdot 10 \text{ mm}^3$ .



Figuur 3.1: Een schematische weergave van de gebruikte opstelling.



Figuur 3.2: Een schematische weergave van de gebruikte opstelling. De zwaartekracht staat naar beneden gericht.

### 3.3 Methode

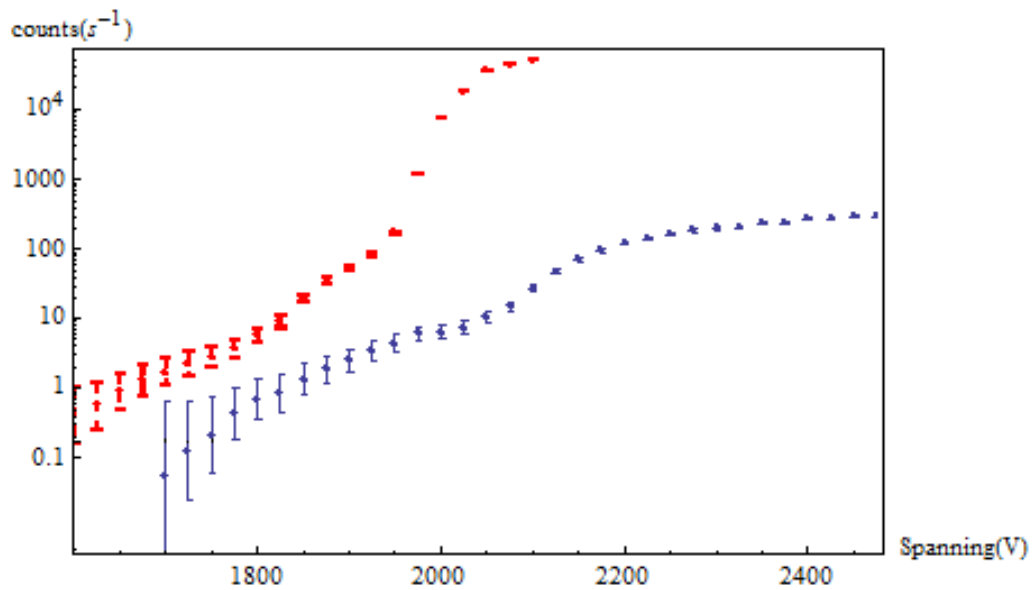
Als eerste is het bereik van beide fotomultipliers bepaald door na te gaan hoe het aantal counts veranderde bij verschillende spanningen. Dit is gedaan door 30 s bij verschillende spanningen tussen 1600 V en 2100 V te meten. Vervolgens zijn de spanningsgebieden, waarin de telsnelheid nagenoeg constant bleef bij veranderingen in spanning, opnieuw gemeten. De herhalingsmetingen binnen deze spanningsgebieden zijn gedaan door 1200 s te meten met tussenstappen van 10 V. Ook zijn de uitgangssignalen van zowel de F als de B bij gebieden waar de telsnelheid nagenoeg constant bleef, met een oscilloscoop geanalyseerd om te zien of de uitgangssignalen interne reflecties bevatten.

Voor de bepaling van de kosmische muonflux door het prototype van de detector zijn de coïncidenties tussen de F en de B bepaald. De F en B zijn hiervoor op hun optimale werkspanning gezet en hebben gedurende 9000 s het aantal coïncidenties gemeten. Om de effecten van veranderingen in de spanning op de gemeten flux te bepalen is deze meting herhaald bij verschillende spanningen binnen de plateaus van de F en de B.

## 3.4 Resultaten

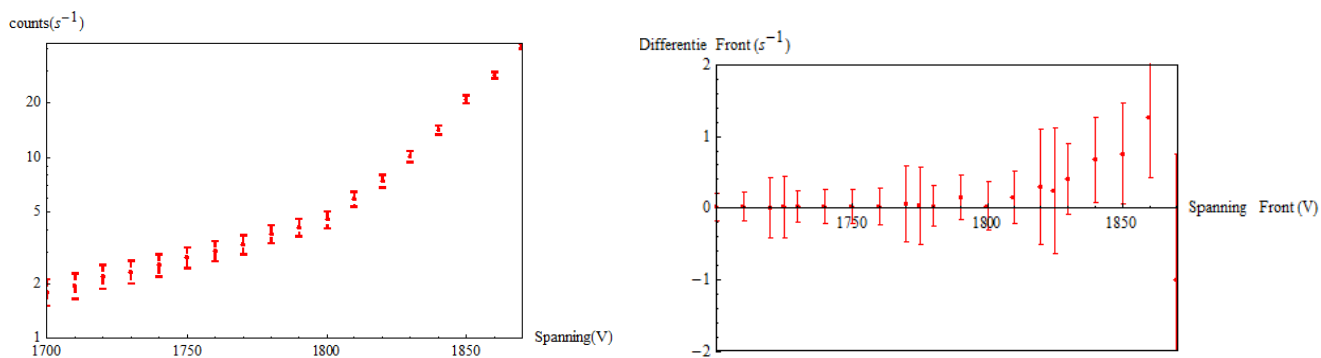
### 3.4.1 Bepaling van de optimale werkspanning

Figuur 3.3 geeft de telsnelheidsmetingen van de F en de B weer. Voor de F ligt een gebied waar de telsnelheid nagenoeg constant blijft bij spanningsveranderingen tussen de 1700 V en de 1800 V. Voor de B ligt zo'n gebied tussen de 1800 V en de 1900 V en tussen de 1970 V en de 2030 V. Aan de hand van een analyse van de uitgangssignalen met een oscilloscoop bleek het spanningsgebied tussen de 1970 V en de 2030 V van de B veel reflecties te bevatten, die de telsnelheid sterk beïnvloedden.

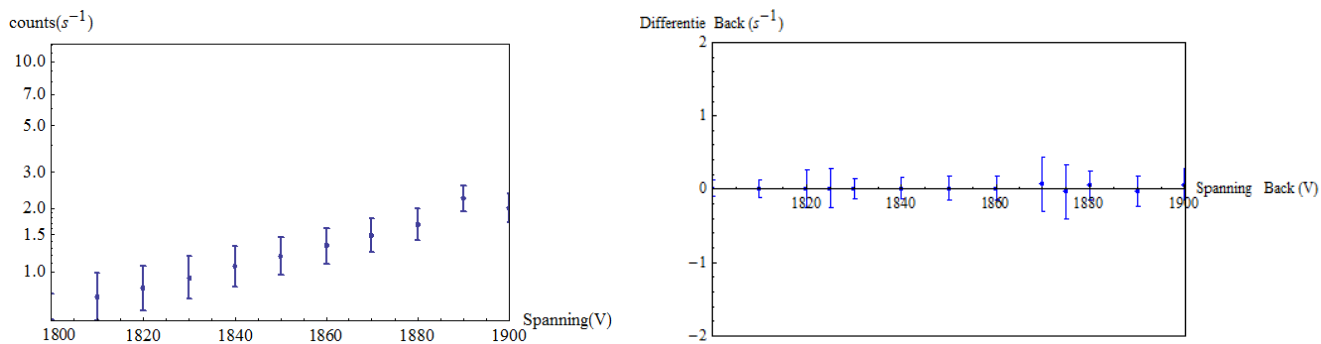


Figuur 3.3: Telsnelheden van de F detector (rood, gestreepte lijn) en telsnelheden van de B detector (blauw, doorgetrokken lijn).

Figuur 3.4 en 4.5 geven de plateaus weer van de F en B met de bijbehorende differenties ( $\Delta\text{Counts}/\Delta\text{Spanning}$ ). Hieruit blijkt dat de optimale gevonden werkspanning voor de F 1750 V is, voor de B is deze 1850 V.



Figuur 3.4: Links telsnelheden van de F in zijn plateau, de metingsduur voor elk meetpunt is 1200 s. Rechts de differentie van alle telsnelheden van de F.



Figuur 3.5: Links telsnelheden van de B in zijn plateau, de metingsduur voor elk meetpunt is 1200 s. Rechts de differentie van alle telsnelheden van de B.



### 3.4.2 Bepaling kosmische muonflux

Tabel 3.1 geeft het aantal getelde coïncidenties weer bij verschillende spanningen. Het gemeten aantal coïncidenties blijft nagenoeg constant binnen de plateaus van zowel de F als de B.

Tabel 3.1: Het aantal coïncidenties (Hz) bij spanningen (V) rond de plateaus. Horizontaal de spanningen op de F fotomultiplier, verticaal de spanningen op de B fotomultiplier.

| Spanning (V) | 1720              | 1740              | 1750              | 1760              | 1780              |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1820         | $0.018 \pm 0.004$ |                   | $0.023 \pm 0.004$ |                   | $0.028 \pm 0.005$ |
| 1840         |                   | $0.022 \pm 0.004$ | $0.018 \pm 0.004$ | $0.019 \pm 0.004$ |                   |
| 1850         | $0.016 \pm 0.004$ | $0.020 \pm 0.004$ | $0.021 \pm 0.004$ | $0.020 \pm 0.004$ | $0.031 \pm 0.005$ |
| 1860         |                   | $0.021 \pm 0.004$ | $0.020 \pm 0.004$ | $0.023 \pm 0.004$ |                   |
| 1880         | $0.028 \pm 0.005$ |                   | $0.029 \pm 0.005$ |                   | $0.033 \pm 0.005$ |

## 3.5 Discussie

### 3.5.1 Systematische fouten

De oppervlakken van de scintillatoren in de F en de B hebben dezelfde grootte. Daardoor is de verwachting dat beide scintillatiedetectoren bij hun optimale werkspanning een gelijke telsnelheid moeten hebben. Dit is niet het geval. De muonflux op zeeniveau is  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  [11]. Dit komt neer op een flux per scintillatoroppervlak van 4 muonen per minuut. De telsnelheden van zowel de F als de B in respectievelijk figuur 3.4 en 3.5 laten zien dat ook in de plateaus de telsnelheden gedomineerd worden door donkerstroom afkomstig uit thermische emissies. Dit wijst erop dat de gebruikte spanningen op de F en de B te hoog zijn.

Beide fotomultipliers tellen fotonen. Deze kunnen zowel afkomstig zijn van interacties van de scintillator met muonen als van achtergrond fotonen (ruis). Als in beide detectoren op het zelfde moment een foton versterkt en gedetecteerd wordt, kunnen beide signalen veroorzaakt zijn door een interactie tussen de scintillator en een muon. Er is echter een kans dat een ruissignaal in zowel de F als de B als een coïncidentie wordt gezien. Deze kans wordt groter naarmate de spanning op de fotomultipliers wordt opgevoerd, aangezien de telsnelheid toeneemt bij het verhogen van de spanning. Het verband tussen toevalscoïncidenties en de frequentie van de tellers wordt gegeven in uitdrukking 3.1.

$$P(\text{"toevalscoïncidentie"}) = (\sigma \cdot f_F \cdot f_B) \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Hierin is  $\sigma$  de standaardpuls grootte van de uitgangssignalen van de discriminators,  $P$  de kans op een toevalscoïncidentie en  $f_{F,B}$  zijn respectievelijk de telsnelheden per seconde van de F- en B-discriminator. De F-discriminator geeft een standaardpuls af met een breedte van 60 ns, de B-discriminator geeft een standaardpuls af met een breedte van 80 ns. Voor de spanningen in het gemeten bereik is te zien dat de extra onzekerheid door toevalscoïncidenties erg laag is. In deze onzekerheid zit een maximale overschatting van 12.5 % doordat

voor de lengte van  $\sigma$  de grootste waarde is genomen van beide standaard pulsen.

Tabel 3.2: Kans op toevalscoïncidentie bij plateaus F en B detector. Horizontaal de spanning op de F fotomultiplier, verticaal de spanning op de B fotomultiplier.

| Spanning (V) | 1720                | 1740                | 1750                | 1760                | 1780                |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1820         | $1.4 \cdot 10^{-7}$ | $1.7 \cdot 10^{-7}$ | $1.9 \cdot 10^{-7}$ | $2.0 \cdot 10^{-7}$ | $2.5 \cdot 10^{-6}$ |
| 1840         | $1.9 \cdot 10^{-7}$ | $2.2 \cdot 10^{-7}$ | $2.4 \cdot 10^{-6}$ | $2.7 \cdot 10^{-6}$ | $3.3 \cdot 10^{-6}$ |
| 1850         | $2.1 \cdot 10^{-7}$ | $2.4 \cdot 10^{-6}$ | $2.7 \cdot 10^{-6}$ | $2.9 \cdot 10^{-6}$ | $3.6 \cdot 10^{-6}$ |
| 1860         | $2.3 \cdot 10^{-7}$ | $2.7 \cdot 10^{-6}$ | $2.9 \cdot 10^{-6}$ | $3.2 \cdot 10^{-6}$ | $4.0 \cdot 10^{-6}$ |
| 1880         | $3.0 \cdot 10^{-7}$ | $3.4 \cdot 10^{-6}$ | $3.7 \cdot 10^{-6}$ | $4.1 \cdot 10^{-6}$ | $5.0 \cdot 10^{-6}$ |

### 3.5.2 Literatuurwaarde

De kosmische muonflux wordt gegeven door uitdrukking 2.5. In zowel F als de B zit een stuk scintillator met de afmetingen  $40 \cdot 40 \cdot 10 \text{ mm}^3$ . De literatuurwaarde voor de muonflux is  $70 \pm 10.5 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Het aantal muonen dat gemiddeld per minuut door de F en de B scintillator gaat is bepaald met uitdrukking 2.8. Doordat uitdrukking 2.8 te gecompliceerd is om met de hand en zelfs met de computer exact op te lossen is deze benaderd als een Riemannsom. De benaderde literatuurwaarde van de muonflux voor de gebruikte opstelling is  $0.016 \pm 0.002 \text{ (stat.)} \pm 0.002 \text{ (syst.) Hz}$ .

De literatuur waarde wijkt significant af van de experimenteel bepaalde waarde. Kijkend naar de effecten van toevalscoïncidenties op het totaal aantal gemeten coïncidenties kan worden aangenomen, dat in het gemeten spanningsbereik, de toevalscoïncidenties niet een waarneembaar verschil in telsnelheid kunnen veroorzaken. Waarom de literatuurwaarde significant afwijkt van de experimenteel bepaalde waarde is hierom onbekend.

## 3.6 Conclusie

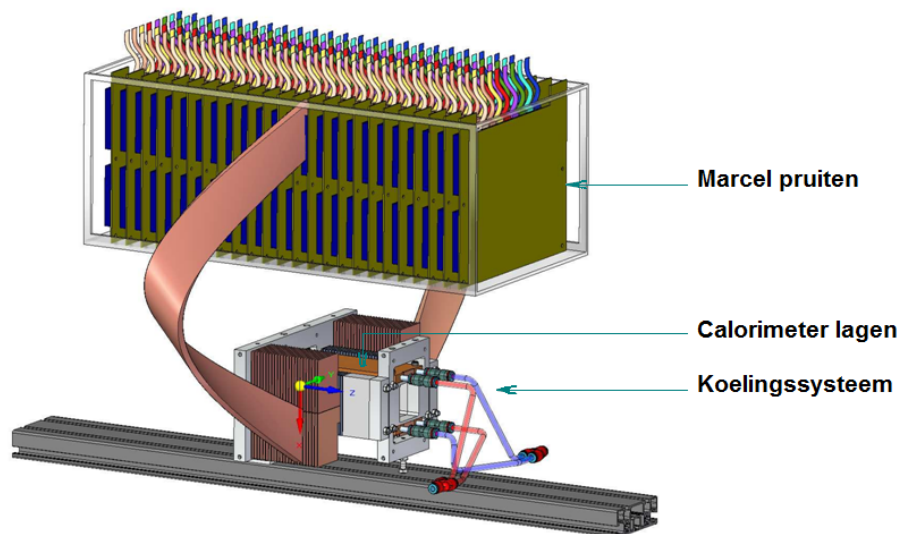
De gemeten muonflux bij de gebruikte instellingen (een spanning van 1750 V op de Front-fotomultiplier en 1850 V op de Back-fotomultiplier) is  $2.1 \cdot 10^{-2} \pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ (stat.)} \pm 2.7 \cdot 10^{-7} \text{ (syst.) Hz}$ .

## Hoofdstuk 4

# Bundeltest voorbereidingen

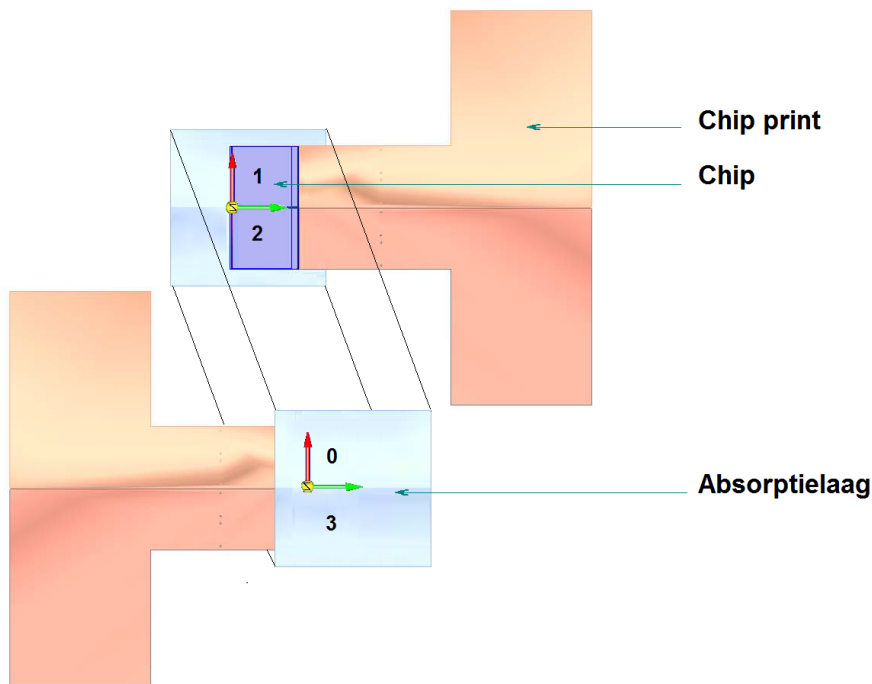
### 4.1 Doelstelling

De geteste calorimeter is een prototype voor een digitale elektromagnetische sampling calorimeter die gebruikt moet gaan worden in ALICE op CERN. Dit prototype is weergegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1: Een schematische weergave van het prototype van de *FOCAL*.

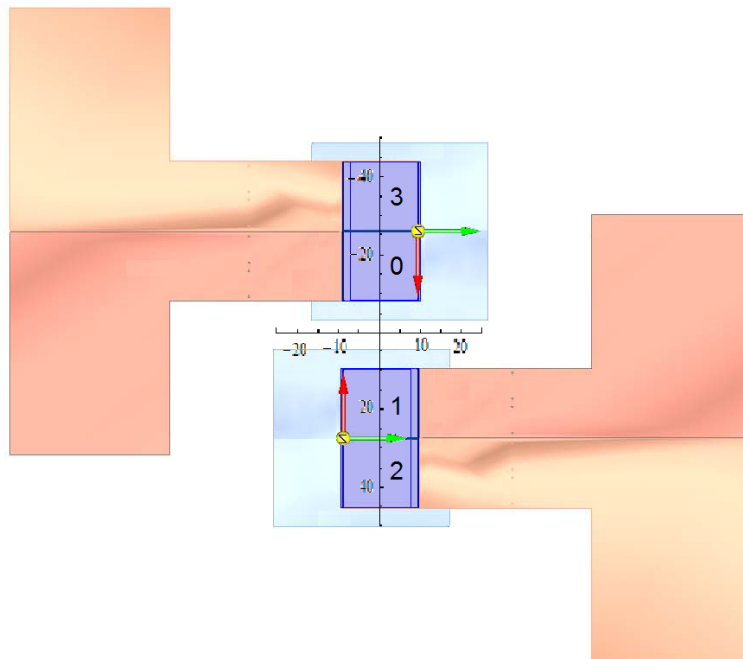
Het prototype bestaat uit vierentwintig lagen. Elke laag is opgebouwd uit twee modules. Elke module bevat een stuk wolfram en twee halfgeleidende siliciumchips. De gebruikte siliciumchips zijn van het type *PHASE2/MIMOSA23* en bevatten elk 640 bij 640 pixels. De twee modules van één laag zijn op elkaar geplaatst zoals in figuur 4.2 wordt weergegeven. Er zijn twee type modules, deze verschillen alleen in de dikte van de chips die erop zitten. De modules van één laag zijn van hetzelfde type.



Figuur 4.2: Een schematische weergave van de plaatsing van de modules van één laag van het prototype van de detector. De twee donkerblauwe vierkanten op een module zijn de chips. De lichtblauwe vierkanten zijn de absorptielagen. De groene en rode pijl geven respectievelijk de fysieke positieve  $x$ - en  $y$ -as aan.

Er zullen twee aspecten van het prototype van de detector worden bepaald en getest om de werking van het verwerkingsprogramma en het prototype te optimaliseren.

- Elke chip kent aan elke pixel een *bit*- en *line-nummer* toe. Een verwerkingsprogramma leest deze pixeldata van elke chip in en voegt de data van alle vier de chips van een laag samen. Het coördinatenstelsel van dit verwerkingsprogramma is onbekend. Dit coördinatenstelsel moet bepaald worden. Hiervoor dient eerst de uitlezingrichting van de chips worden bepaald.
- In het prototype van de detector, gebruikt bij de tests in DESY bevonden zich 19 lagen chips, terwijl er ruimte is voor 24 lagen in het prototype. Om alle lagen vol te krijgen met modules zullen verschillende modules getest worden op hun kwaliteit en gevoeligheid zodat er een rangschikking kan worden gemaakt voor de plaatsing van de verschillende modules.



Figuur 4.3: Een schematische weergave van de testopstelling van de modules. De twee donkerblauwe vierkanten op een module zijn de chips. De lichtblauwe vierkanten zijn de absorptielagen. De groene pijlen geven de positieve x-richting aan. De rode pijlen geven de positieve y-richting aan. Het assenstelsel is van de mechanische arm.

## 4.2 Bepaling van de uitlezing van de chips

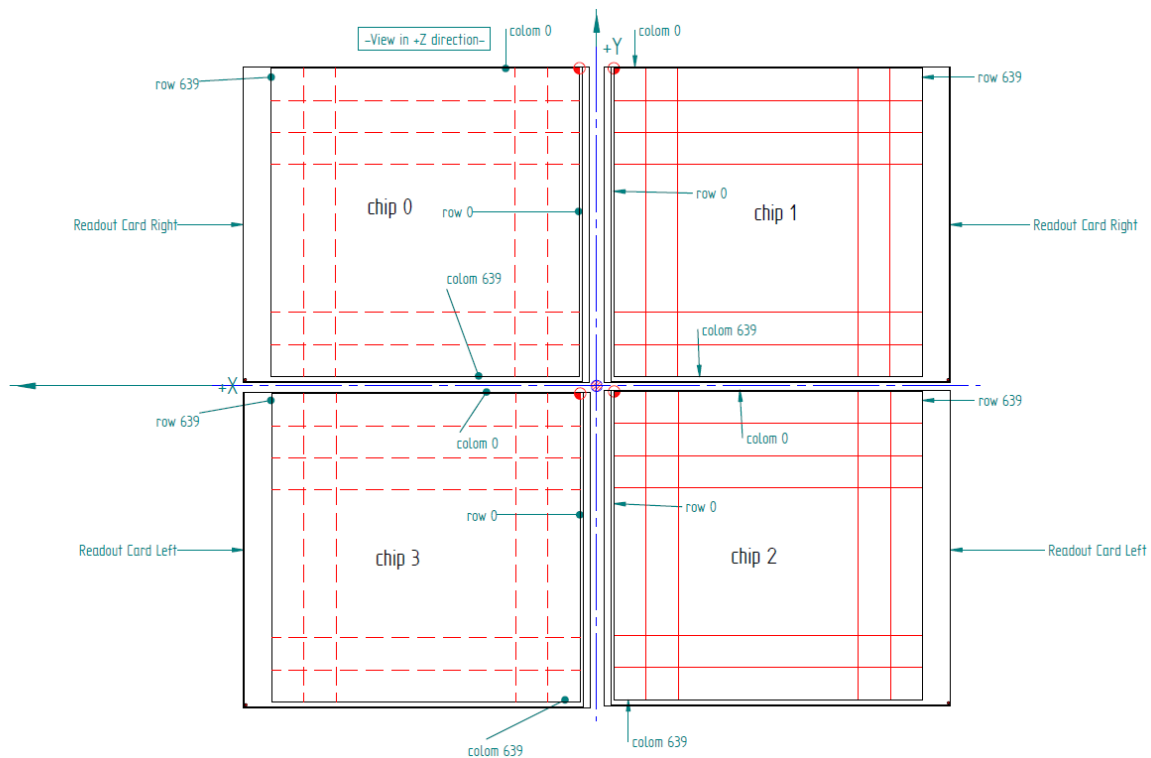
### 4.2.1 Methode

Zoals in figuur 4.2 is weergegeven, zijn de modules van één laag met de chips naar elkaar toe geplaatst. Deze configuratie van de modules is niet praktisch bij het testen van de uitlezingsrichting, aangezien een van de twee modules met de absorptielaag naar boven ligt. Daarom is gebruik gemaakt van de testopstelling die wordt weergegeven in figuur 4.3. De module met chip 0 en 3 is eerst om de x-as geroteerd en vervolgens boven chips 1 en 2 geplaatst.

De testopstelling bevond zich in een verduisterde box. Voor de testopstelling is een op afstand bestuurbare mechanische arm geplaatst waaraan een LED was bevestigd. De LED scheen loodrecht op de chips. Voor het testen van elke chip is de LED systematisch op 4 punten van elke chip gericht.

### 4.2.2 Resultaten

De gemeten *bit-* en *line-nummers* met de bijbehorende coördinaten uit de testopstelling staan weergegeven in tabel A.1 van appendix A. Er zijn in totaal 16 punten gemeten, 4 punten op elke chip. Door vervolgens de bepaalde coördinatenstelsels van chips 0 en 3 te roteren, zodat de coördinatenstelsels



Figuur 4.4: Een schematische weergave van de chipposities in het prototype van de detector. De pijlen met *colom* en *row* geven de richting aan van uitlezing. De roodgekleurde hoekpunten met een rode cirkel eromheen markeren het hoekpunt met bit-line-nummer (0,0).

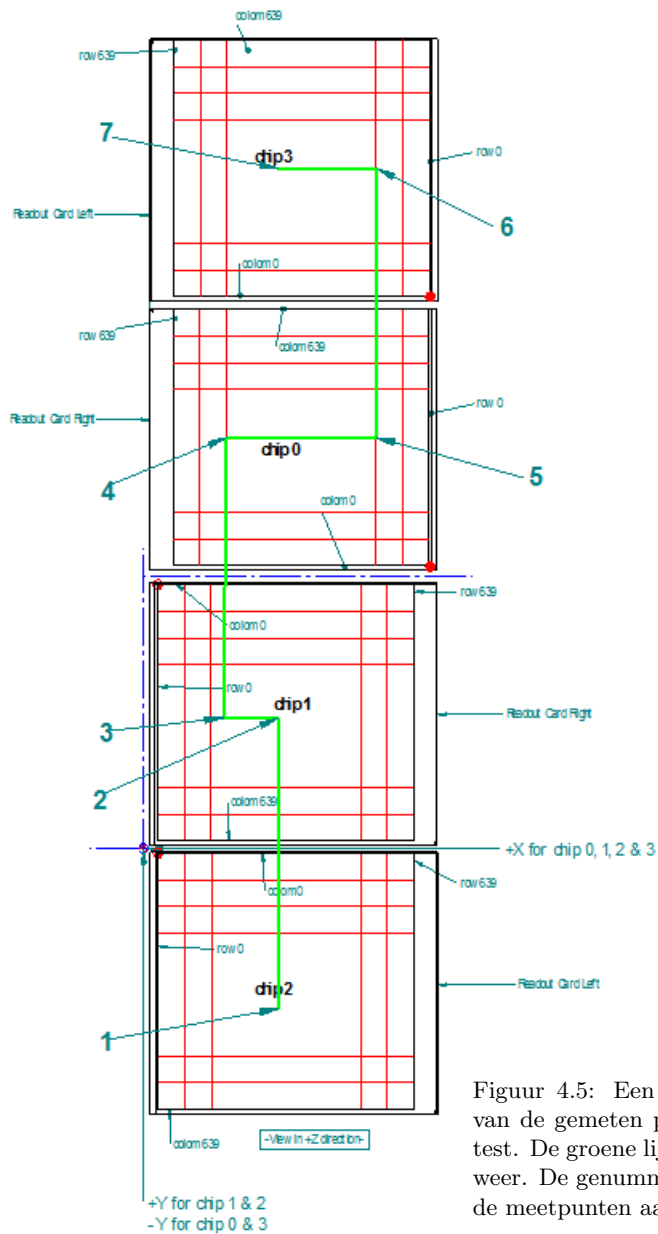
van deze chips weer gelijk zijn aan de coördinatenstelsels van de chips uit figuur 4.1, is afgeleid wat de ligging van de *bit-* en *line-nummers* is van de chips in de detectoropstelling. Een schematische weergave hiervan wordt weergegeven in figuur 4.4.

### 4.2.3 Discussie

#### Controle meting

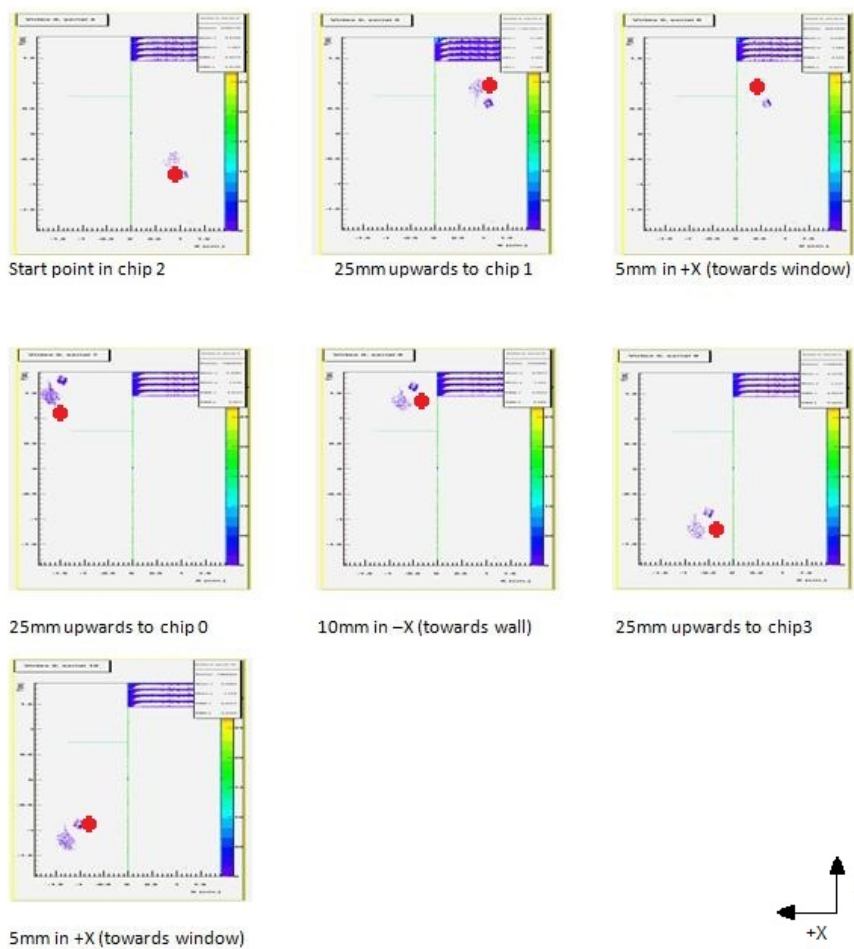
Nadat het verwerkingsprogramma gecorrigeerd is zullen fysieke veranderingen in de positie van de LED correct worden weergegeven door het programma. Om dit te testen zijn zeven punten gemeten die verspreid zijn over de vier chips in de testopstelling. Het pad van de gemeten punten, gevolgd voor de controlemeting, is weergegeven in figuur 4.5.

Figuur 4.6 geeft de resultaten weer van de controletest. Elke grafiek is een samenstelling van de vier chips. De zwaartekracht staat naar beneden gericht. Chip 0 wordt linksboven ingelezen, chip 3 linksonder, chip 1 rechtsboven en chip 2 rechtsonder. De twee blauwe vlekken die van positie veranderen in de



Figuur 4.5: Een schematische weergave van de gemeten punten van de controletest. De groene lijn geeft de gevolgde weg weer. De genummerde hoekpunten geven de meetpunten aan.

### LED test



Figuur 4.6: Een visuele weergave van de uitlezing van de vier chips. Over de horizontale as is van elke grafiek het bit-nummer uitgezet en over de verticale-as het lijnnummer. In de grafieken zijn de rode punten de voorspelde waarden en de blauwe de gemeten waarden.



verschillende grafieken worden veroorzaakt door het licht uitgezonden door de LED. De reden dat er twee blauwe vlekken in elke grafiek zitten komt doordat het licht van de LED deels gereflecteerd wordt door de houder. Het rode punt in elke grafiek is de voorspelde positie van de LED vlek. Chips 1 en 2 zitten vast in één module en chips 0 en 3 ook. De resultaten van beide zijn vervolgens samengevoegd. Hierdoor is langs de rand een verhoogde intensiteit gemeten. Dit is de groene lijn die in elke grafiek van (0,2.5) tot (0,-2.5) loopt. Het grote paarse gedeelte rechtsboven in elke grafiek wordt veroorzaakt door een defect in de gebruikte chip.

De fysieke verplaatsingen van de LED op de testopstelling configuratie komen na de correctie van het verwerkingsprogramma met elkaar overeen met de voorspellingen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het coördinatenstelsel van het verwerkingsprogramma overeenkomt met de fysieke coördinaten van de chips.

Bij het uitvoeren van de metingen waren twee factoren niet ideaal. Allereerst waren er synchronisatieproblemen bij de chips. Niet alle chips bleken op hetzelfde moment data te nemen. Dit heeft geen invloed op de resultaten gehad, aangezien het moment van data nemen niet relevant is voor positiebepalingen. Ten tweede was één van de chips gedeeltelijk beschadigd. In figuur 4.6 is duidelijk te zien dat een derde van de chip op chip positie 1 beschadigd is. Dit heeft geen invloed gehad op de metingen, omdat de meetpunten buiten dit oppervlak zijn gekozen.

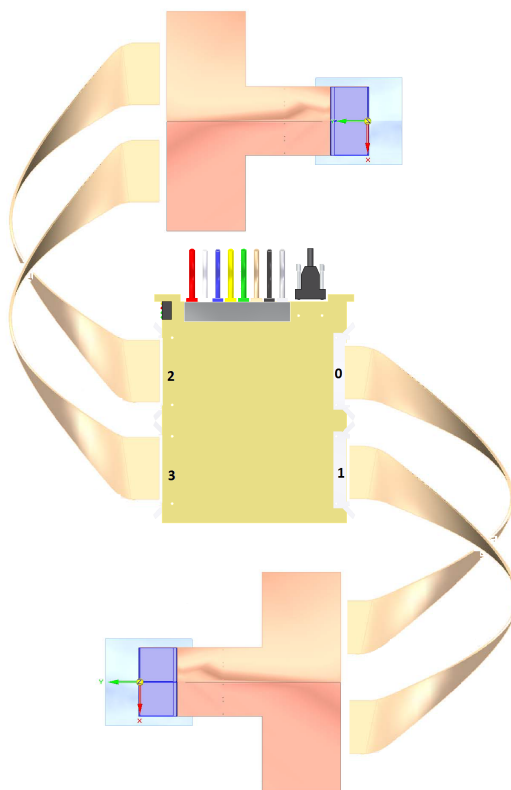
#### 4.2.4 Conclusie

Indien het coördinatenstelsel wordt gebruikt zoals gedefinieerd in figuur 4.4, zit line-bit-nummer (0,0) van chips 0 en 3 rechtsboven op de chips en van chips 1 en 2 linksboven. De line-nummers nemen toe voor alle chips in de richting van de negatieve y-as. De bit-nummers voor chips 0 en 3 nemen toe over de positieve x-as en voor chips 1 en 2 over de negatieve x-as. De corresponderende coördinaten van de chip 1 worden gegeven door  $(\frac{2}{640} \textit{bit}, \frac{2(640-\textit{line})}{640})$ , van chip 2 worden gegeven door  $(\frac{2}{640} \textit{bit}, \frac{-2}{640} \textit{line})$ , van chip 3 worden gegeven door  $(\frac{-2}{640} \textit{bit}, \frac{-2}{640} \textit{line})$  en van chip 0 worden gegeven door  $(\frac{-2}{640} \textit{bit}, \frac{2(640-\textit{line})}{640})$ . Hierin staan *bit* en *line* respectievelijk voor de *bit*- en *line* nummers van de pixels op de chips.

## 4.3 Kwaliteits- en gevoeligheidsbepalingen van chips

### 4.3.1 Methode

Voor de kwaliteits- en gevoeligheidsbepalingen van de chips zijn van alle modules die niet in de detector waren opgenomen pedestal runs gemaakt. De gebruikte opstelling is weergegeven in figuur 4.7. Tijdens de tests bevond de opstelling zich in een verduisterde box.



Figuur 4.7: Een schematische weergave van de gebruikte opstelling. Aan poorten 0 en 1 van de testprint is de te testen module bevestigd. Aan poorten 2 en 3 is een werkende module bevestigd. Bovenaan de testprint zijn signaalkabels bevestigd.

Om de synchronisatie van de chips te testen zijn deze samen met een goed functionerende module aan de testprint bevestigd. Aan poorten 0 en 1 van de testopstelling zijn telkens de test modules bevestigd. Aan poorten 2 en 3 bevond zich een goed werkende module. Op één van de chips van de goed werkende module is gesynchroniseerd. Het synchroniseren werd gedaan door gebruik te maken van het programma *Mimosa*. Dit programma synchroniseert alle chips en zet deze op de juiste drempelwaarde.

## Kwaliteitsbepaling

Elke chip is getest op synchronisatieproblemen. Dit is gedaan door na te gaan of het programma *MIMOSA* de chips kan synchroniseren met een goed werkende module. Op het moment dat de chips niet op de testmodule kunnen synchroniseren wordt de volledige spanning van de opstelling gehaald en wordt de poging na 30 s herhaald. Vervolgens is er een pedestalrun van elke chip gemaakt, dit is een meting van de activiteit van een chip in het donker waaruit de statistische ruis bepaald wordt. Van chips die geen activiteit vertoonden in het gemeten *MIMOSA drempelwaarde* bereik zijn bij drempelwaardes rond de 50 MTU ook pedestals gemaakt buiten de verduisterde box. Afhankelijk of de chip wel of geen activiteit begon te vertonen zijn wel of niet pedestals gemaakt in de verduisterde box met een steeds lagere drempelwaardes totdat de optimale drempelwaarde was gevonden.

## Gevoeligheidsbepaling

De correlatie tussen de drempelwaarde van de chips en de energie van de invallende deeltjes is niet bekend. De drempelwaardes waar de chips op worden ingesteld krijgen daarom in het vervolg een nieuw gedefinieerde eenheid 'MTU' (*MIMOSA Threshold Units*). Voor alle chips was een schatting van de optimale drempelwaarde bekend. Deze schattingen waren op basis van een kwalitatieve analyse gemaakt. Binnen een bereik van 25 MTU boven en onder de geschatte optimale drempelwaarde zijn voor elke chip pedestals gemaakt. De pedestaldata van elke chip zijn vervolgens gebruikt om een *kwantitatieve* en een *kwalitatieve* bepaling van de optimale drempelwaarde te maken.

Om signalen afkomstig van deeltjes van ruis te onderscheiden worden pixels, die bij een pedestalrun overactief zijn gemaskeerd. Hoe lager de *MIMOSA drempelwaarde* van een chip, des te gevoeliger de chip wordt. Bij een hoge *MIMOSA drempelwaarde* zal de activiteit van een chip dus lager zijn dan de activiteit bij een lage *MIMOSA drempelwaarde*. Bij een hoge *MIMOSA drempelwaarde* hoeven er dus minder pixels gemaskeerd te worden om signalen van ruis te onderscheiden dan bij een lage *MIMOSA drempelwaarde*. Bij de *kwantitatieve bepaling* van de optimale *mimosa drempelwaardes* van de chips is er gekeken naar de verhouding tussen het aantal gemaskeerde pixels en de overgebleven statistische ruis.

Dit is als volgt gedaan. Eerst is uit de pedestal data de fractie van de meettijd voor elke pixel afzonderlijk berekend waarin deze actief was. Deze fractie wordt weergegeven in de volgende uitdrukking:

$$F_i = \frac{N_{act,i}}{N_{max}} \quad (4.1)$$

Hierin is  $F_i$  de activiteit van pixel met index  $i$ ,  $N_{act,i}$  het aantal keer dat pixel met index  $i$  activiteit vertoond heeft en  $N_{max}$  het aantal keer dat een pixel is uitgelezen. Vervolgens is er, door gebruik te maken van de parameter  $D$  bepaald wat de maximaal toegestane statistische ruis is voor alle pixels tezamen. Dit wordt weergegeven in de volgende uitdrukking:

$$N_{stat} = D \cdot N_{pix} \quad (4.2)$$

Hierin is  $N_{stat}$  het maximale toegestane aantal statistische fluctuatie van alle pixels tezamen op een chip,  $D$  is de *statistische ruisfractie* en  $N_{pix}$  is het totale aantal pixels op een chip. De waarde van  $D$  is gezet op  $10^{-5}$ , zodat bij een lage intensiteit aan deeltjes en licht de *signal to noise ratio* ongeveer één op één is. Vervolgens zijn bovenstane relaties gebruikt om de *exclusion threshold* ( $F_{excl}$ ) voor de chip te bepalen.

$$N_{stat} = \sum_{F_i=0}^{F_i=F_{excl}} F_i \cdot N(F_i) \quad (4.3)$$

Hierin is  $N(F_i)$  het aantal pixels met  $F_i$ . Alle pixels met  $F > F_{excl}$  zijn vervolgens gemaskeerd. Voor de bepaling van de optimale drempelwaarden zijn vervolgens de MIMOSA drempelwaarden van de chips uitgezet tegenover het aantal gemaskeerde pixels van elke chip en zijn de mimosa drempelwaarden uitgezet tegenover het aantal statistische fluctuaties die nog aanwezig zijn na het maskeren van de pixels met een te hoge activiteit.

### 4.3.2 Resultaten

#### Kwaliteitsbepaling

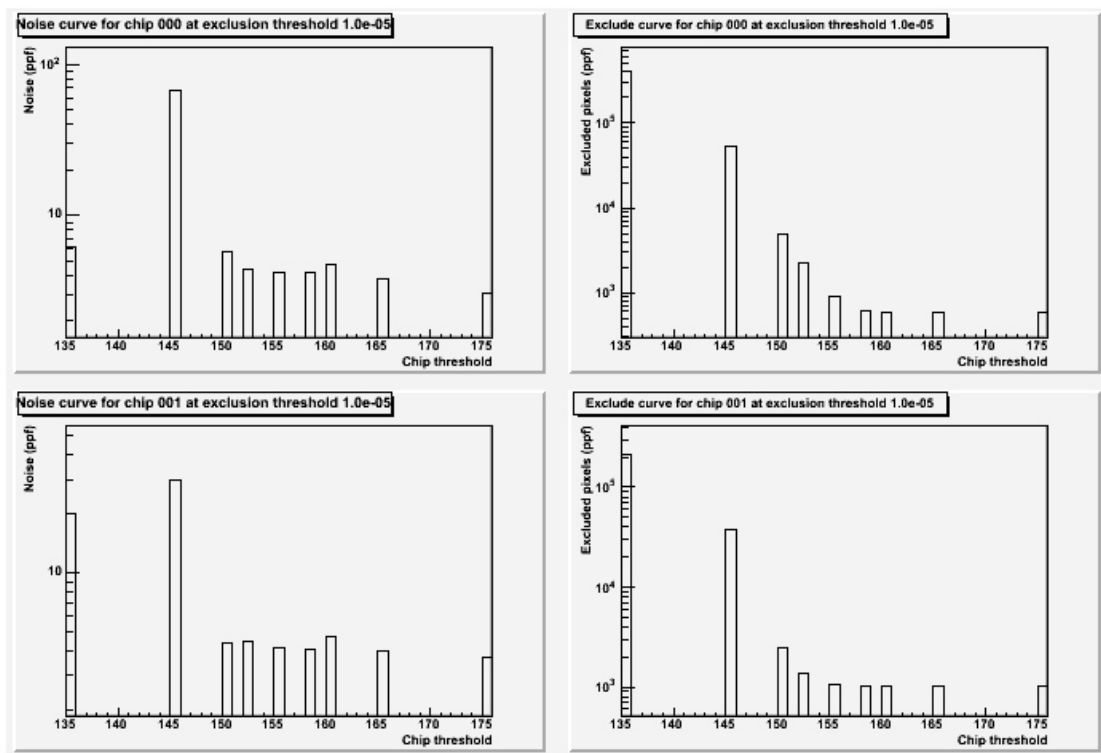
Van de 48 modules die in het prototype passen zijn er 27 getest. Één van de modules wilde niet synchroniseren, 13 van de chips bevatten 1 of meerdere hot columns en 3 chips waren gedeeltelijk beschadigd. De resultaten van alle 27 geteste modules zijn weergegeven in appendix B, tabellen B.1 en B.2.

#### Gevoeligheidsbepaling

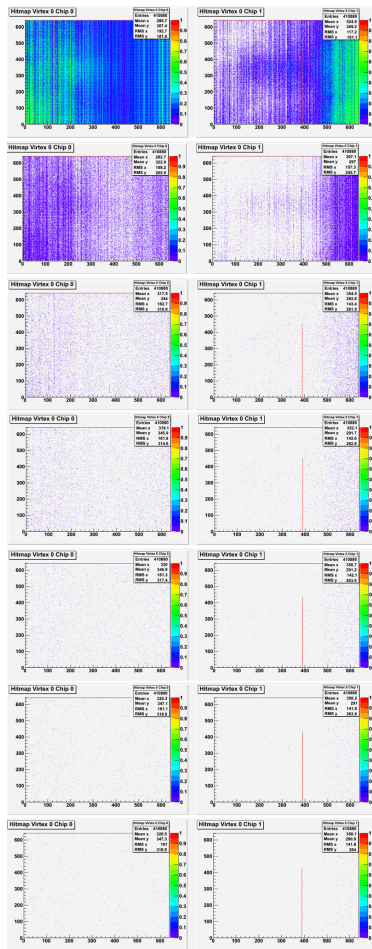
Figuur 4.8 is een typisch voorbeeld van de *noise-* en *exclusion curve* gemaakt van een module. Voor chip L9 is duidelijk te zien dat de *noise curve* niet verder afneemt na een drempelwaarde van 150 MTU. Verder is te zien dat het aantal pixels dat in het *masker* terecht komt pas minimaal wordt vanaf een drempelwaarde van 158. De gevonden optimale drempelwaarde uit beide curven voor chip L9 is dus 158. Voor chipnummer R17 is dit het geval bij een drempelwaarde van 155 MTU.

Figuur 4.9 geeft de pedestal grafieken van module 11 en weer. De rode horizontale lijn bovenaan elke grafiek is de synchronisatielij. De verticale lijn in elke rechter grafiek is een hot column. Uit de grafieken blijkt dat de chip L9 rustig is bij een drempelwaarde van 158 en dat chip R17 rustig is bij een drempel waarde van 155 MTU. Dit bevestigt de gevonden drempelwaardes die bepaald zijn uit de *noise-* en *exclusion curve*. De pedestal grafieken vergelijkbaar met figuur 4.9 zijn alleen gebruikt als controle voor de drempelwaardes bepaald uit de curven. De bepaalde drempelwaardes van de overige chips worden weergegeven in tabellen B.1 en B.2 van appendix B.

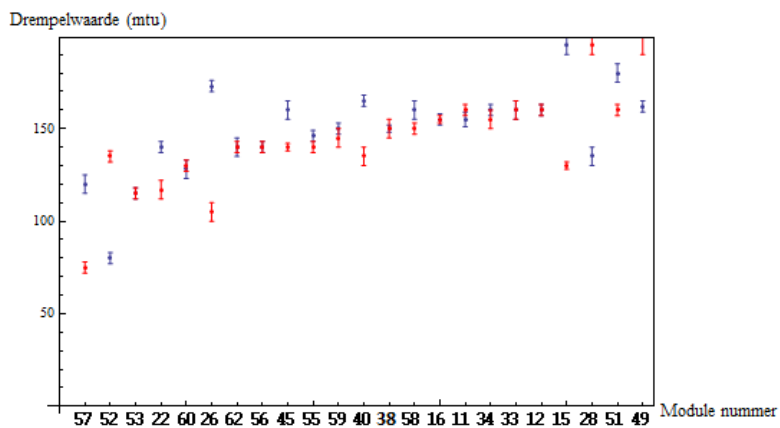
De drempelwaardes gerangschikt naar gevoeligheid zijn weergegeven in figuur 4.10. Modules 50, 20, 54 en 37 hebben een inactieve chip en zijn niet opgenomen.



Figuur 4.8: De *noise*- en *exclusion curve* van Module 11. De bovenste twee curven horen bij chipnummer L9. De onderste twee grafieken horen bij chipnummer R17.



Figuur 4.9: Pedestal grafieken van module 11. De drempelwaarden van de grafieken zijn respectievelijk van boven naar beneden: 135, 145, 150, 152, 155, 158 en 160 MTU. De linker grafieken zijn van chip L9 en de rechter grafieken zijn van chip R17.



Figuur 4.10: De modules gerangschikt naar drempelwaarden. De blauwe punten corresponderen met de linker chip van elke module, de rode punten met de rechter chip.

### 4.3.3 Discussie

#### Onzekerheden en systematische fouten

Niet continu voorkomende synchronisatieproblemen kunnen de data beïnvloeden. De synchronisatietest geeft een moment opname van de chip. Dit wil zeggen dat de chips gesynchroniseerd waren op het moment dat de test werd uitgevoerd. Om hiermee rekening te houden is bij het nemen van elke pedestaal gecontroleerd op synchronisatie. Elke chip programmeert een synchronisatielijijn in de data. Dit is de rode lijn die ligt op bitnummers 641 en 642 van elke chip, zoals weergegeven in figuur 4.9. Indien deze lijn ondoorbroken doorloopt in, heeft er zich tijdens het nemen van de pedestaal géén synchronisatieprobleem voorgedaan.

Doordat niet alle drempelwaardes van elke chip zijn gemeten is er een interpolatie gemaakt van de optimale drempelwaarde van elke chip. De bijbehorende interpolatiefout veroorzaakt een onzekerheid met een grootte van de grootste afstand tussen de optimale drempelwaarde en het naastliggende meetpunt.

'Dode gebieden' in chips geven geen activiteit. Bij de *kwantitatieve bepaling* van de gevoeligheid van de chips wordt een gewogen gemiddelde van de activiteit gebruikt als maat voor de toegestane *exclusion threshold*. Indien een gedeelte van de chip geen activiteit vertoont, zal dit het gemiddelde verlagen waardoor de werkende gedeeltes van de chips meer activiteit mogen hebben. Aan de hand van de *kwalitatieve bepalingen* kan hiervoor worden gecorrigeerd.

Bij de bepaling van de kwaliteit en de gevoeligheid van de chips is alleen de reactie van de chips onder ideale omstandigheden bekeken, dit wil zeggen goed gekoeld en in het donker. Er is geen rekening gehouden met de dikte van de chips en de mate waarin de temperatuur het functioneren van de chips beïnvloed. Hierdoor kunnen de chips anders functioneren wanneer deze zich in de detector bevinden.

### 4.3.4 Conclusie

Onder ideale omstandigheden is de gevonden rangschikking van de geteste modules bruikbaar voor de plaatsing van de chips in de detectoren. Twee belangrijke factoren, de plaats van de module in het prototype van de detector en de dikte van de chips zijn niet meegenomen. Hierdoor kan de gevonden rangschikking alleen worden gebruikt als indicatie van de gevoeligste chip onder constante vergelijkbare omstandigheden en kan dus niet uitsluitend bepalend zijn voor de optimale plaatsingsvolgorde van de chips in het prototype van de detector.

# Hoofdstuk 5

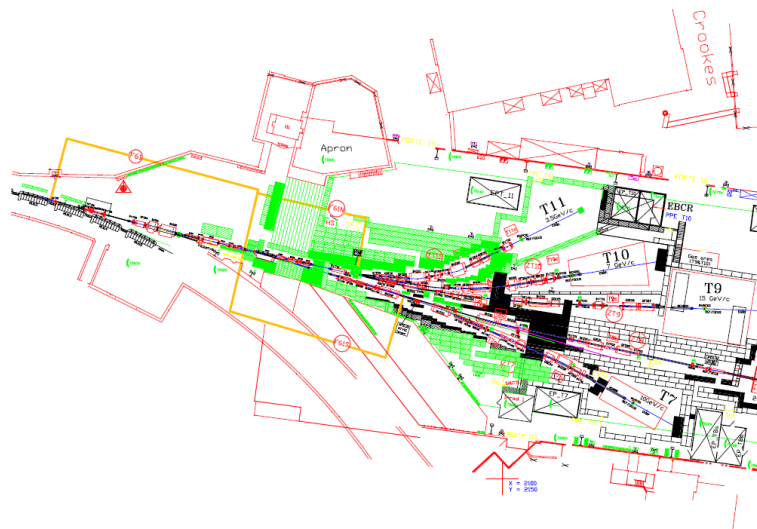
## Bundeltest

### 5.1 Doelstelling

In de detectoropstelling zitten verschillende triggers. Deze zullen gebruikt worden om erachter te komen welk type deeltjes de detector in- en uitgaan bij de bundeltest. Ook wordt onderzocht hoe sterk de samenstelling van de bundel verandert over tijd. Verder wordt er gezocht naar verklaringen voor het aantal gemeten triggers.

### 5.2 Methode

Het prototype van de detector is in een bundellijn van de *Proton Synchrotron* (PS) op *CERN* gezet. De bundeltest vond plaats in de *East Erea*, de bundellijn was *T9*. Een plattegrond van de bundellijn wordt weergegeven in figuur 5.1.



Figuur 5.1: Een schematische weergave van de *East Erea*.



De *PS* leverde 3 keer per minuut een deeltjesbundel aan de bundellijn T9 af. De deeltjesflux die de experimentruimte binnen kwam was aan te passen door de instellingen van horizontale en verticale spleten te veranderen in de bundellijn. Door de instellingen van verschillende magneten in de bundellijn aan te passen, konden bundeldeeltjes met een specifieke impuls worden geselecteerd die de experimentruimte binnen kwamen. Indien er werd geselecteerd op bundeldeeltjes met een positieve impuls, bestond de deeltjesbundel uit positieve pionen en positronen. Indien er werd geselecteerd op deeltjes met een negatieve impuls, bestond de deeltjesbundel uit negatieve pionen, muonen en elektronen. De magneten en slits in de bundel werden zo ingesteld dat de deeltjesbundel divergeerde in de experimentruimte. Hierdoor was de flux aan deeltjes op de detector homogeen verdeeld.

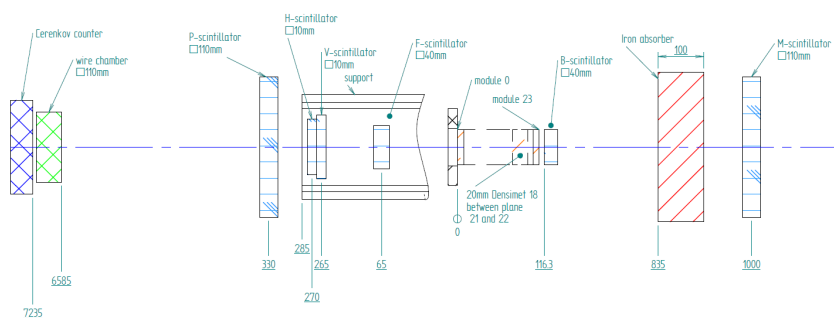
De gebruikte opstelling wordt weergegeven in figuur 5.2. Een schematische weergave van de oriëntatie van het prototype van *FOCAL* wordt weergegeven in figuur 5.3. De opstelling bestond uit 6 scintillatiedetectoren, 1 gas Cherenkov detector en het prototype van de *FOCAL*. De scintillatiedetectoren en de Cherenkov detector zijn gebruikt als triggers voor de data analyse van het prototype. De spanning op de P was 1700 V, op de H was 804 V, op de V was 1210 V, op de Cherenkov detectors waren 1900 V, op de F was 1700 V en op de B 1920 V. De scintillatiedetectoren maken geen onderscheid tussen de verschillende geladen deeltjes, de Cherenkov detector wel. De druk van het gas in de Cherenkov detector was 0.5 bar. Voor de gegeven gasdruk in de Cherenkov detector wordt er getriggerd op elektronen en op muonen met een impuls van  $6 \text{ GeV}/c$  of hoger. In de opstelling zijn de volgende coïncidenties gemaakt tussen de verschillende triggers:

- De F en P coïncidentie om te bepalen hoeveel bundeldeeltjes het prototype ingaan.
- De B en P coïncidentie om te bepalen hoeveel deeltjes het prototype uitkomen.
- De HV en P coïncidentie om te bepalen hoeveel deeltjes het centrale gedeelte van het prototype ingaan.
- De C en P coïncidentie om te bepalen hoeveel elektronen het prototype ingaan.

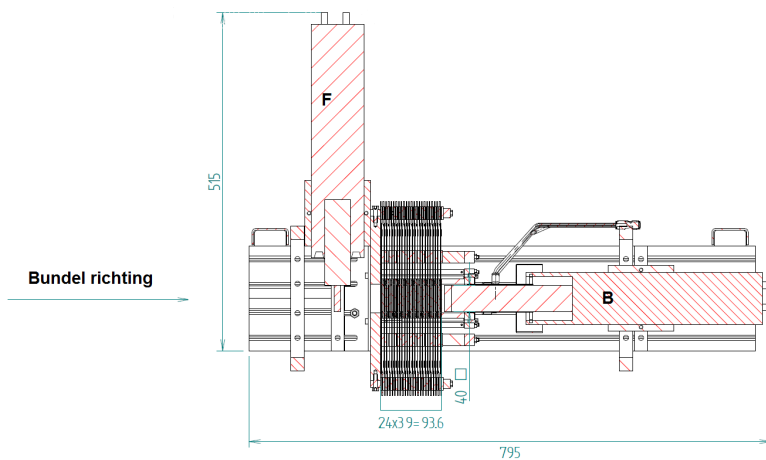
Doordat er maar een eindig aantal triggers gemaakt kon worden in de opstelling, zijn er tussen verschillende triggers in de software ook coïncidenties gemaakt.

- De FP en BP coïncidentie om te bepalen hoeveel deeltjes door het prototype gaan.
- De HVP en de FP coïncidentie om te bepalen hoeveel centrale deeltjes het prototype ingaan
- De HVP en de BP coïncidentie om te bepalen hoeveel centrale deeltjes uit het prototype komen.
- De CP en FP coïncidentie om te bepalen hoeveel elektronen het prototype ingaan.

- De CP en BP coïncidentie om te bepalen hoeveel elektronen het prototype uitkomen.



Figuur 5.2: Een schematische weergave van de plaatsing van de verschillende detectoren, zoals gebruikt op CERN. De afmetingen zijn gegeven in mm. De afbeelding is niet op schaal.



Figuur 5.3: De detectoropstelling uit figuur 3.2 een kwartslag gedraaid. Oriëntatie van de detector zoals gebruikt bij de bundeltest.

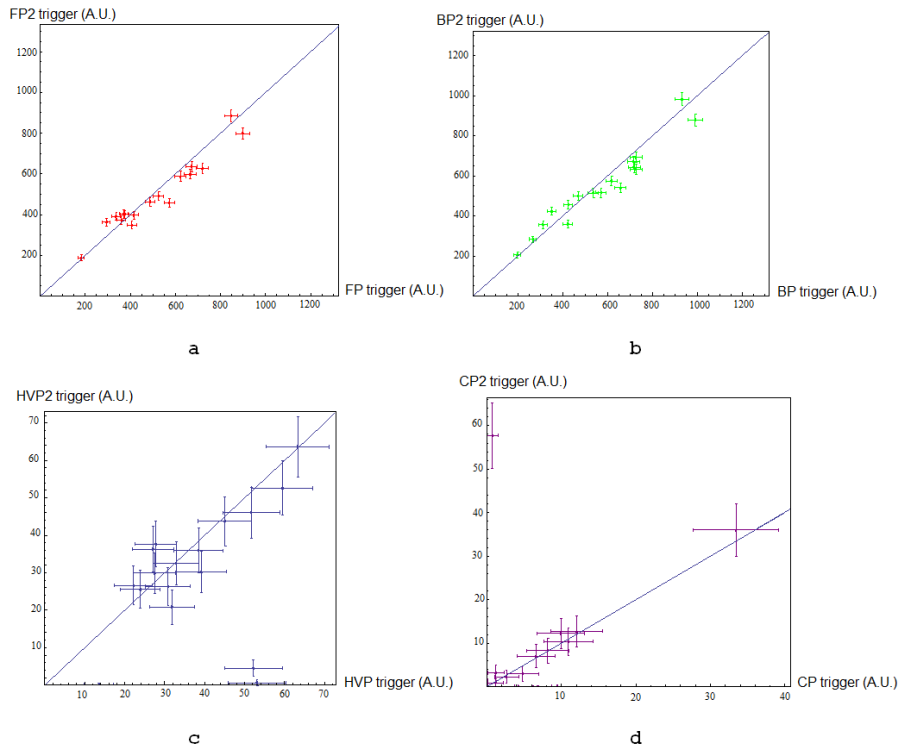
Er is gemeten bij een impuls van de bundeldeeltjes van -7, -6, -5, -4, -3, -2, 5, 6 en 8 GeV/c. Het data-acquisitiesysteem slaat niet elke deeltjesbundel van elke run op. Het systeem doet er gemiddeld 2 min over om de data van deeltjesbundel spill op te slaan, dit wordt in het vervolg een spill genoemd. Hierdoor wordt ongeveer 10% van alle deeltjesbundels opgeslagen. Om een beeld te krijgen hoe de samenstelling van de deeltjesbundel varieert over tijd, is elk half uur het aantal trigger counts in het logboek opgenomen van minstens 10 deeltjesbundels.

## 5.3 Resultaten

Niet alle genomen data zijn bruikbaar en/of relevant. De oorzaak hiervan is dat een aantal chips binnen de detector niet wilde synchroniseren of dat de opstelling niet goed functioneerde. Vanaf run 31 zijn alle chips met synchronisatieproblemen uitgeschakeld. Vanaf dit moment zijn alleen runs geanalyseerd waar niets mis was met de detector en/of de deeltjesbundel. De triggerdata bij verschillende impulsen van de deeltjes en verschillende slit-openingen zijn weergegeven in bijlage C tabel C.1.

### Verandering in samenstelling van de bundel per spill

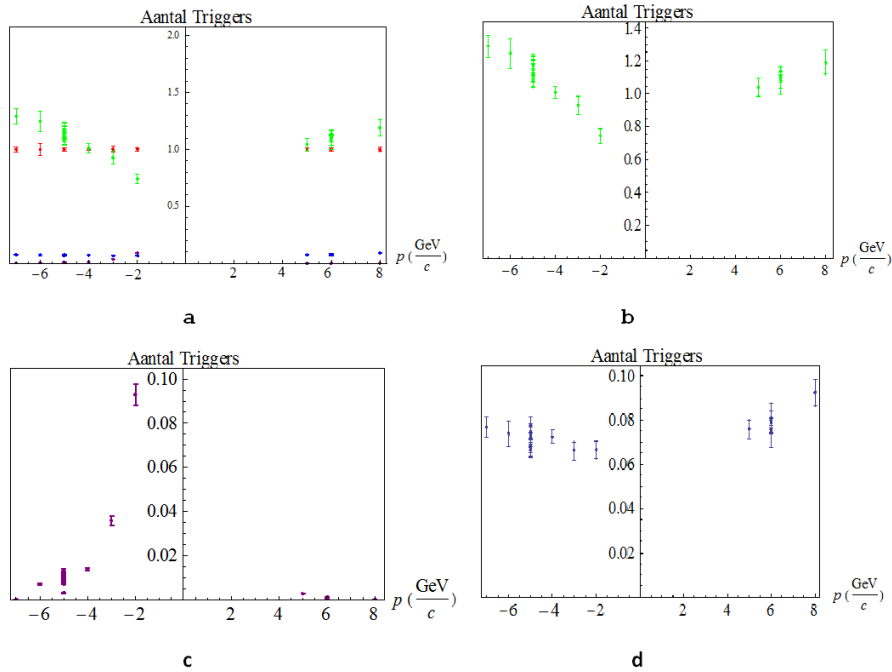
Uit grafiek 5.4 blijkt dat de bundelsamenstelling weinig fluctueert. Run 54, 74, 75 en 77 zijn niet geplot vanwege ontbrekende triggerdata van de opstelling. Uitschieterende punten in figuur 5.3c behoren toe aan runs waarin weinig spills zitten. De uitschieterende punten in figuur 5.4d behoren toe aan runs waarbij de bundeldeeltes een positieve impuls hadden. De CP detector telt in dit geval alleen positronen.



Figuur 5.4: De gemiddelde triggeraantallen per spill uit de triggerdata tegenover de gemiddelde triggeraantallen die elk half uur zijn opgenomen. Op de horizontale assen de triggeraantallen uit de triggerdata en op de verticale assen de triggeraantallen uit het logboek.

## Telsnelheden tegenover impuls

Figuur 5.5 geeft de genormaliseerde coïncidenties weer. Figuur 5.5b geeft de coïncidenties weer tussen de P en de B trigger. Hieruit blijkt dat het aantal deeltjes dat uit het prototype komt, groter wordt ten opzichte van het aantal deeltjes wat het prototype ingaat. Verder is te zien in figuur 5.5c dat het aantal elektronen dat het prototype ingaat afneemt naarmate de impuls toeneemt. Dit laatste feit wordt veroorzaakt door de bundelsamenstelling. Uit figuur 5.5.d blijkt dat de verhouding tussen de HVP en de FP gemiddeld een factor 14.3 is. Dit wil zeggen dat de deeltjesbundel niet het volledig oppervlak van de F 'beschijnt'. Gemiddeld is 7 procent van de gemeten triggers door het centrale gedeelte van de calorimeter gegaan. Dit geeft dus  $688 \pm 30$  gemeten centrale elektronen.

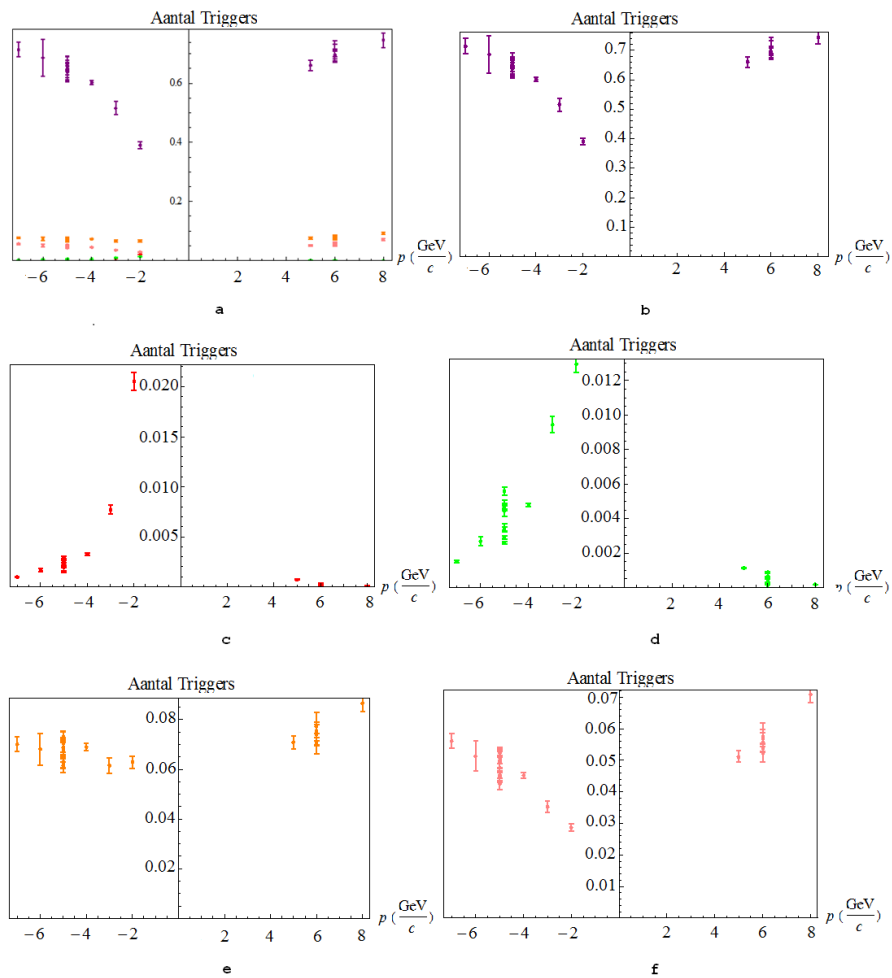


Figuur 5.5: Triggeraantallen uitgezet tegenover de impuls. De rode punten (grafiek a) geven de trigger aantallen weer van de FP-trigger, de groene (grafiek b) van de BP-trigger, de blauwe (grafiek c) van de HVP-trigger, en de paarse (grafiek d) van de CP-trigger. Alle meetpunten zijn genormaliseerd op de FP trigger.

## Coïncidenties tussen triggers

De grafieken in figuur 5.6 zijn gemaakt uit coïncidenties tussen verschillende triggers uit figuur 5.5. Hierdoor zullen toevalscoïncidenties en andere getelde coïncidenties die niet in beide triggers voorkomen eruit worden gefilterd. Figuur 5.6b geeft de coïncidenties tussen de BP en de FP trigger. Hieruit blijkt dat bij de verhoging van de impuls steeds meer coïncidenties worden gemeten tussen de BP en FP. Bij een impuls van -2  $\text{GeV}/c$  heeft er bij ongeveer 38% van de gemeten FP triggers er een coïncidentie tussen de FP en BP plaatsgevonden, bij een

impuls van  $-8 \text{ GeV}/c$  is dit ruim 70 %. Deze toename kan worden veroorzaakt doordat een steeds groter gedeeltjes van de deeltjes door de detector heen gaat of dat de 'staarten' van de gevormde showers steeds dieper in de detector komen te liggen waardoor er meer deeltjes uit de achterkant van de detector kunnen ontsnappen. Verder blijkt uit figuur 5.6c en 5.6d dat het aantal elektronen dat het prototype in- en uitgaat respectievelijk met een factor 20 en 7 afneemt bij een verhoging van de impuls van  $-2 \text{ GeV}/c$  naar  $-8 \text{ GeV}/c$  van de bundeldeeltjes. Uit figuur 5.6e blijkt dat het aantal centrale deeltjes dat de detector ingaat licht stijgt. Uit figuur 5.6f blijkt dat het aantal centrale deeltjes dat de detector uitkomt bij een verhoging van de impuls van  $-2 \text{ GeV}/c$  naar  $-8 \text{ GeV}/c$  ongeveer met een factor 2 toeneemt.

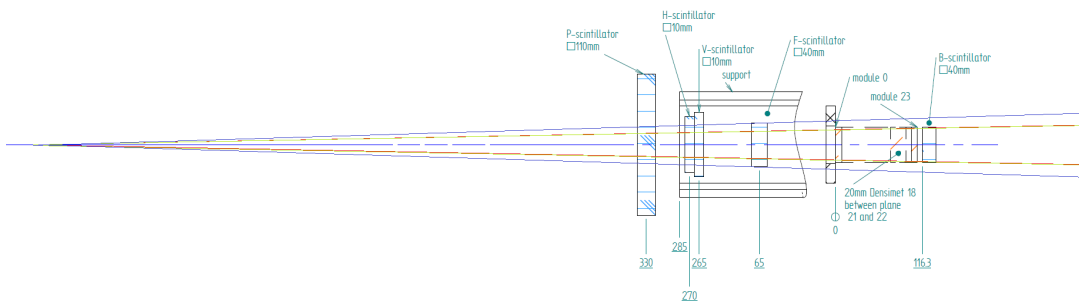


Figuur 5.6: Coïncidenties tussen verschillende triggers uitgezet tegenover de impuls. De paarse punten (grafiek b) zijn de triggeraantallen van de FP&BP coïncidenties, de rode (grafiek c) van de CP&FP coïncidentie, de groene (grafiek d) CP&BP coïncidentie, de oranje (grafiek e) van de HVP&FP coïncidentie en de roze (grafiek f) van de HVP&BP coïncidentie. Alle meetpunten zijn genormaliseerd op de FP trigger.

## 5.4 Discussion

### 5.4.1 Teveel coïncidenties

Figuur 5.7 geeft een grove illustratie van de invalshoek van de deeltjes bundel op verschillende scintillatiedetectoren, de afbeelding is niet op schaal. De donkerblauwe lijnen geven de (ruimte)hoek aan wanneer er een coïncidentie plaatsvindt tussen de P en de F, de groene lijn wanneer er een coïncidentie plaatsvindt tussen de P en de B en de rode lijn wanneer er een coïncidentie plaatsvindt tussen de P, F en B. Op grond van figuur 5.7 zou dus verwacht worden, aangezien de bundel divergeert in de detectorruimte dat er op zijn minst evenveel coïncidenties tussen de P en F als tussen P en B moeten plaatsvinden. Dit is niet het geval voor hogere impulsen bij de coïncidenties gemaakt in de opstelling (zie figuur 5.5a en 5.5b). Daarentegen komt dit vreemde resultaat niet naar voren wanneer er sprake is van coïncidenties gemaakt in de software tussen de FP en de BP. Dit wijst erop dat bij de opstelling sprake kan zijn van een groot aantal toevalscoïncidenties.



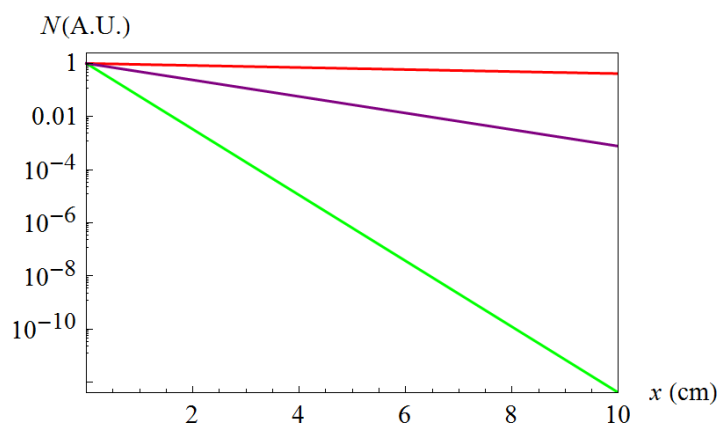
Figuur 5.7: Een schematische weergave van de invalshoeken van de deeltjesbundel op verschillende triggers. De afbeelding is niet op schaal.

### Oriëntatie fotomultipliër

In figuur 5.3 is te zien dat de B in de bundellijn staat. In het perspex van de lichtgeleider kunnen geladen deeltjes Cherenkov straling produceren. Uit een eerder onderzoek [9] is gebleken dat een eventuele piek in het spectrum van de fotomultipliër als gevolg van het Cherenkov effect niet op te merken is. Dit wil dus zeggen dat het aantal Cherenkov fotonen verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de fotonen die in de scintillator worden gecreeërd. De bijdrage aan toevalscoïncidenties, zie uitdrukking 3.1, zal dus ook verwaarloosbaar klein zijn waardoor het zeer onwaarschijnlijk is dat dit de toename in telsnelheid van de BP kan veroorzaken.

## Interacties

Figuur 5.8 geeft de kans dat weer dat een elektronen, fotonen en pionen geen interactie hebben gehad na een afstand  $x$  afgelegd te hebben. Voor fotonen en elektronen is hiervoor de stralingslengte gebruikt en voor pionen de interactie lengte. De totale dikte van de Wolfram absorptielagen is 97,584 mm. In figuur 5.8 is te zien dat een elektron makkelijk binnen de absorptie lagen interacties zal aangaan en hoogstwaarschijnlijk zal worden geabsorbeerd. Daarentegen gaat ongeveer 58% van de pionen een interactie aan met de wolfram atomen. Pionen kunnen naast elektromagnetische interacties ook hadronische interacties aangaan met de wolfram kernen. Hierbij kan ook een shower worden veroorzaakt. Of deze effecten een significante bijdrage leveren aan de telsnelheid van de B detector, waardoor er meer toevallige coïncidenties kunnen voorkomen, is onbekend.



Figuur 5.8: De kans dat een deeltje geen interactie heeft uitgezet tegenover de afgelegde weg in Wolfram. In het groen elektronen, in het paars fotonen en in het rood pionen.

## Te hoge gain

De gebruikte spanningen op de fotomultiplieers lagen in de plateaus. Het plateau van de B bepaald met behulp van de muonen flux uit hoofdstuk 3 is niet duidelijk zichtbaar. Bij een lage telsnelheid van de individuele scintillatiedetectoren veroorzaakt een te hoge gain een niet al te groot probleem (zie paragraaf 3.5.1). Bij de bundeltest is er een telsnelheid in de orde van 1000 counts per seconden gemeten voor de FB trigger. De kans dat deze een toevallige coïncidenties bevat is stukken groter. Uit de grafieken van figuren 5.5 en 5.6 blijkt dat er mogelijk iets mis is met de gain van de F, B en P trigger. Uit figuur 5.5a en 5.5b blijkt dat de gain op de F te laag kan zijn of de gain op de B te hoog. Of de derde scintillatie detector, de P, een verkeerde gain heeft is niet uit de triggerdata op te maken, aangezien deze trigger overal is gebruikt. De telsnelheden van de afzonderlijke scintillatiedetectoren zijn niet bekend, hierdoor kunnen er geen verdere uitspraken over de gain van de verschillende detectoren worden gemaakt.

### 5.4.2 Dubbele coïncidenties

De grafieken van figuur 5.6 zijn gemaakt uit coïncidenties tussen verschillende triggers. Bij de coïncidentie tussen twee triggers waar beide triggers een telsnelheid van 500 counts per seconde hebben wordt de kans op een toevalscoïncidentie met een factor 40 kleiner. Hoewel de 6 grafieken uit figuur 5.6 er realistischer uitzien dan de 4 grafieken van figuur 5.5, is de systematische onzekerheid onbekend in de meetpunten. Hierdoor kunnen er aan de hand van de triggerdata waarbij de B is gebruikt geen kwantitatieve uitspraken worden gedaan.

### 5.4.3 Verbeteringen

De triggerdata gemaakt met de opstelling en de triggerdata die naderhand gemaakt zijn met de software zijn met elkaar in tegenspraak. Op basis van de gemaakte data zijn hier geen conclusies uit te trekken. Om meer statistiek en betrouwbare informatie te krijgen van dit verschijnsel hadden ook de telsnelheden van de afzonderlijke scintillatiedetectoren opgeslagen moeten worden.

## 5.5 Conclusie

Binnen de geanalyseerde runs varieerde de samenstellingen van de ingekomen deeltjesbundel weinig. De hoeveelheid elektronen en positronen in de deeltjesbundel neemt van 9 % bij een absolute impuls van 2 GeV/c af tot ongeveer 0.1 % bij een absolute impuls van 8 GeV/c. Uit de trigger data blijkt dat de gain van één of meerdere triggers van de F, B of P verkeerd zijn. De gain op de B kan te hoog zijn, de gain op de F kan te laag zijn. Of de gain van de P verkeerd is, is niet te bepalen uit de triggerdata. Uit dubbele coïncidenties is bepaald dat er op zijn minst  $53671 \pm 2281$  centrale deeltjes gemeten, waarvan  $688 \pm 30$  centrale elektronen zijn.



## Bijlage A

# Data coördinaten uitlezing chips

Tabel A.1: Resultaten van de uitlezingstests. Kolom 1 geeft de volgorde van de metingen die op een chip zijn verricht. Kolom 2 geeft de coördinaten zoals gedefinieerd als in figuur 4.1. Kolom 3 geeft de coördinaten zoals gedefinieerd in het verwerkingsprogramma. Kolom 4 geeft de chippositie. Kolom 5 geeft het bit-line-nummer, gegeven als (bit-nr, line-nr.).

| Meting nr. (#) | Coord. opstelling (mm) | Coord. programma | Chippositie | Bit-line nr. |
|----------------|------------------------|------------------|-------------|--------------|
| 1              | (0, 20)                | (-0.75, 0.75)    | 1           | (400, 400)   |
| 2              | (-10, 20)              | (-1.8, 0.75)     | 1           | (400, 600)   |
| 3              | (5, 20)                | (-0.1, 0.5)      | 1           | (400, 100)   |
| 4              | (5, 15)                | (-0.1, 1.3)      | 1           | (200, 100)   |
| 1              | (0, 40)                | (-0.7, -1.2)     | 2           | (400, 250)   |
| 2              | (-10, 40)              | (-1.8, -1.2)     | 2           | (400, 600)   |
| 3              | (5, 40)                | (-0.2, -1.2)     | 2           | (400, 100)   |
| 4              | (5, 35)                | (-0.2, 0.7)      | 2           | (200, 100)   |
| 1              | (0, -15.5)             | (1.5, 0.5)       | 0           | (500, 420)   |
| 2              | (5, -15.5)             | (1.5, 0)         | 0           | (500, 600)   |
| 3              | (-5, -15.5)            | (1, 0.5)         | 0           | (500, 300)   |
| 4              | (-5, -7)               | (1, 1.5)         | 0           | (200, 300)   |
| 1              | (0, -30)               | (1.5, -1)        | 3           | (400, 450)   |
| 2              | (0, -40)               | (1.5, -2)        | 3           | (600, 450)   |
| 3              | (5, -30)               | (2, -1)          | 3           | (400, 600)   |
| 4              | (-10, 30)              | (0.5, -1.5)      | 3           | (400, 100)   |

## Bijlage B

# Data kwaliteit en gevoeligheidsbepaling chips

Tabel B.1: Resultaten pedestaal run chips. Kolom 1 geeft het module nummer. Kolom 2 geeft het chipnummer. Kolom 3 geeft of de chip wilde synchroniseren, 'j' voor ja en 'n' voor nee. Kolom 4 geeft de drempelwaarde bepaald uit de pedestaal grafieken. Kolom 5 geeft de drempelwaarde bepaald uit de *Noise-* en *Exclusion curve*. De drempelwaardes zijn gegeven in MTU. Kolom 6 geeft het aantal hot-columns per chip.

| Module | Chip | Synchronisatie | DW-pedestaal Run (MTU) | DW-Curve (MTU) | HC   |
|--------|------|----------------|------------------------|----------------|------|
| 11     | L9   | j              | 158                    | $158 \pm 3$    | 0    |
|        | R17  | j              | 155                    | $155 \pm 2$    | 1    |
| 12     | L5   | j              | 160                    | $167 \pm 3$    | 0    |
|        | R1   | j              | 160                    | $155 \pm 3$    | 0    |
| 15     | L13  | j              | 195                    | $195 \pm 5$    | 2    |
|        | R18  | j              | 130                    | $132 \pm 2$    | 1    |
| 16     | L7   | j              | –                      | $160 \pm 5$    | LK   |
|        | R3   | j              | 150                    | $145 \pm 3$    | 0    |
| 20     | L12  | j              | –                      | <i>dood</i>    | 0    |
|        | R19  | j              | 108                    | $105 \pm 10$   | 0    |
| 22     | L18  | j              | 140                    | $135 \pm 3$    | 0    |
|        | R21  | j              | 117                    | $120 \pm 5$    | 0    |
| 26     | L42  | j              | 173                    | $173 \pm 3$    | 0    |
|        | R52  | j              | 105                    | $105 \pm 5$    | 1    |
| 28     | L26  | j              | 135                    | $130 \pm 5$    | 0    |
|        | R38  | j              | 195                    | $200 \pm 5$    | 0    |
| 33     | L46  | j              | 160                    | $148 \pm 3$    | 0    |
|        | R39  | j              | 155                    | $157 \pm 5$    | 0    |
| 34     | L34  | j              | 155                    | $160 \pm 4$    | LH,3 |
|        | R48  | j              | –                      | $155 \pm 3$    | 3    |
| 37     | L62  | j              | –                      | <i>dood</i>    | 0    |
|        | R78  | j              | 144                    | $144 \pm 0$    | 0    |

Tabel B.2: Resultaten pedestal run chips. Kolom 1 geeft het module nummer. Kolom 2 geeft het chipnummer. kolom 3 geeft of de chip wilde synchroniseren, 'j' voor ja en 'n' voor nee. Kolom 4 geeft de drempelwaarde bepaald uit de pedestal grafieken. Kolom 5 geeft de drempelwaarde bepaald uit de *Noise-* en *Exclusion curve*. De drempelwaardes zijn gegeven in MTU. Kolom 6 geeft het aantal hot-columns per chip.

| Module | Chip | Synchronisatie | DW-pedestal Run (MTU) | DW-Curve (MTU) | HC |
|--------|------|----------------|-----------------------|----------------|----|
| 38     | L40  | j              | 150                   | $145 \pm 2$    | 0  |
|        | R62  | j              | 150                   | $150 \pm 5$    | 0  |
| 40     | L63  | j              | 165                   | $170 \pm 3$    | 0  |
|        | R61  | j              | 135                   | $130 \pm 5$    | 0  |
| 45     | L25  | j              | 146                   | $136 \pm 3$    | 0  |
|        | R45  | j              | 140                   | $140 \pm 3$    | 0  |
| 49     | L66  | j              | 162                   | $165 \pm 3$    | 0  |
|        | R59  | j              | 200                   | $210 \pm 10$   | 0  |
| 50     | L39  | n              | –                     | <i>dood</i>    | –  |
|        | R71  | n              | –                     | <i>dood</i>    | –  |
| 51     | L57  | j              | 180                   | $160 \pm 5$    | 1  |
|        | R65  | j              | 160                   | $160 \pm 3$    | 2  |
| 52     | L67  | j              | 80                    | $80 \pm 3$     | 4  |
|        | R32  | j              | 135                   | $138 \pm 3$    | 1  |
| 53     | L50  | j              | 115                   | $120 \pm 3$    | 0  |
|        | R33  | j              | 115                   | $112 \pm 3$    | 0  |
| 54     | L35  | j              | 110                   | $117 \pm 5$    | 0  |
|        | R34  | j              | –                     | <i>dood</i>    | 0  |
| 55     | L47  | j              | 150                   | $153 \pm 3$    | 0  |
|        | R40  | j              | –                     | $145 \pm 5$    | 1  |
| 56     | L71  | j              | 140                   | $140 \pm 3$    | 0  |
|        | R60  | j              | 140                   | $143 \pm 3$    | 1  |
| 57     | L16  | j              | 115                   | $120 \pm 5$    | 0  |
|        | R81  | j              | –                     | $75 \pm 3$     | 0  |
| 58     | L66  | j              | 155                   | $160 \pm 5$    | 0  |
|        | R54  | j              | 155                   | $160 \pm 5$    | 0  |
| 59     | L68  | j              | 160                   | $150 \pm 5$    | 0  |
|        | R75  | j              | 140                   | $135 \pm 2$    | LK |
| 60     | L27  | j              | 130                   | $128 \pm 5$    | 0  |
|        | R8   | j              | 130                   | $130 \pm 3$    | 0  |
| 62     | L6   | j              | 140                   | $140 \pm 5$    | 0  |
|        | R14  | j              | 140                   | $145 \pm 3$    | 0  |

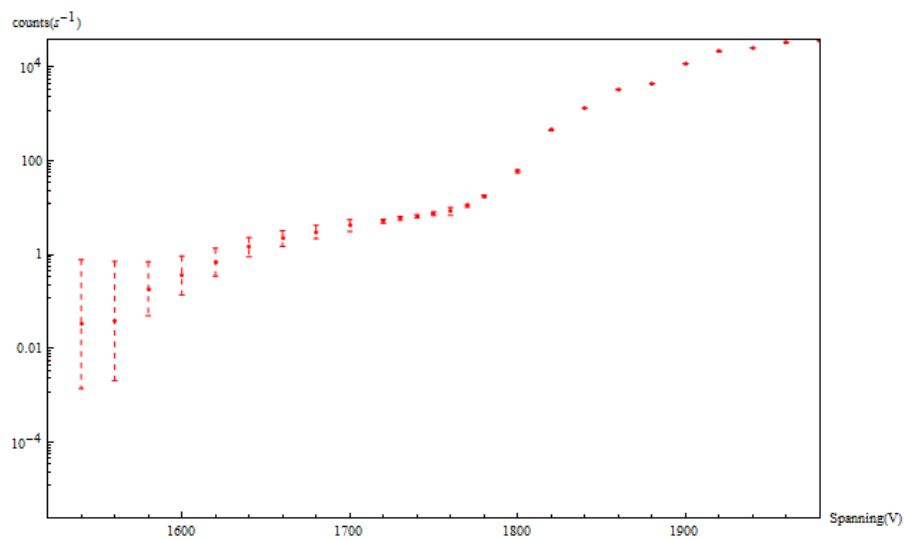
Nadere beschrijving van chips met specifieke afwijkingen:

- Module 16, chip L7, de linkerkant van de chip bevat velen naast elkaar liggende hot columns, waardoor een groot gedeelte van deze hoek onbruikbaar is.
- Module 34, chip L34, de linker onderhoek bevat velen naast elkaar liggende hot columns waardoor deze hoek onbruikbaar is.
- Module 37, chip L62, de volledige chip gaf geen activiteit, hierdoor is geen drempelwaarde bepaald.
- Module 50 synchroniseerde vaak niet en desynchroniseerde ook meerdere keren, hierdoor zijn alle verkregen data niet betrouwbaar van deze module.
- Module 54, chip R34, de volledige chip gaf geen activiteit, hierdoor is geen drempelwaarde bepaald.
- Module 55, chip R40, de linkerhelft van de chip vertoonde geen activiteit.
- Module 57, chip R81, de linkerkant van de chip vertoonde geen activiteit.

## Bijlage C

# PS bundeltest

### C.1 Telsnelheden P fotomultipliër



Figuur C.1: Telsnelheden van de muonflux van de P bij verschillende spanningen.

Het plateau en dus de optimale werkspanning (zie paragraaf 2.2) van de P fotomultipliër ligt bij een spanning van 1750 V.

## C.2 Triggerdata

Tabel C.1: Triggerdata. Kolom 1 geeft het runnummer weer. Kolom twee geeft het aantal spills binnen de run weer. Kolom 3 geeft de impuls van de deeltjes in de deeltjesbundel weer. Kolom 4 geeft de instellingen van de slits weer. Kolom 5 tot en met kolom 8 geven de coïncidenties weer gemaakt door het data-aquisitiesysteem.

| run | spills | Impuls (GeV) | Slits(h/v) |     | F*P    | B*P    | HV*P | C*P  |
|-----|--------|--------------|------------|-----|--------|--------|------|------|
| 31  | 52     | -5           | 6.6        | 6.7 | 27300  | 32100  | 2000 | 323  |
| 33  | 65     | -5           | 6.6        | 6.7 | 40500  | 46500  | 2930 | 447  |
| 35  | 52     | -5           | 6.6        | 6.7 | 44030  | 48500  | 3290 | 425  |
| 37  | 199    | -5           | 6.6        | 6.7 | 114026 | 130999 | 7795 | 1347 |
| 40  | 76     | -5           | 6.6        | 6.7 | 37025  | 43389  | 2500 | 500  |
| 45  | 138    | -5           | 6.6        | 6.7 | 123953 | 136863 | 8200 | 1506 |
| 47  | 73     | -2           | 6.6        | 6.7 | 26245  | 19487  | 1743 | 2440 |
| 50  | 97     | -3           | 5.5        | 5.7 | 32640  | 30324  | 2155 | 1169 |
| 52  | 84     | -5           | 5.5        | 5.7 | 31068  | 35668  | 2308 | 100  |
| 54  | 84     | -5           | 5.5        | 5.7 | 38100  | 42885  | 2830 | 330  |
| 60  | 53     | -5           | 5.5        | 5.7 | 35233  | 38154  | 2740 | 255  |
| 62  | 69     | 5            | 2.6        | 2.5 | 28085  | 29200  | 2127 | 80   |
| 65  | 96     | 8            | 1.3        | 1.3 | 28200  | 33600  | 2602 | 0    |
| 68  | 76     | -7           | 6.3        | 6.4 | 31560  | 40778  | 2419 | 0    |
| 70  | 76     | -6           | 6.3        | 6.4 | 28568  | 35605  | 2109 | 200  |
| 72  | 84     | -4           | 6.3        | 6.4 | 60400  | 61051  | 4383 | 834  |
| 74  | 10     | 6            | 6.5        | 6.6 | 35875  | 40839  | 2712 | 0    |
| 75  | 10     | 6            | 4.3        | 4.4 | 16021  | 17594  | 1283 | 21   |
| 76  | 10     | 6            | 3.1        | 2.8 | 6713   | 7274   | 531  | 7    |
| 77  | 10     | 6            | 1.8        | 1.7 | 3381   | 3738   | 273  | 0    |
| 78  | 36     | 6            | 1.0        | 1.4 | 6576   | 7100   | 488  | 0    |

# Bibliografie

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Scintillation\\_Counter\\_Schematic.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Scintillation_Counter_Schematic.jpg)
- [2] W.R.Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verslag, 1987.
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric\\_Collision.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric_Collision.svg)
- [5] John R. Taylor, *Classical Mechanics*. University Science Books, 2005.
- [6] <http://mathworld.wolfram.com/SolidAngle.html>
- [7] W.D. Dau O.C. AllKofer, K. Carstensen and H. Jokisch. *The absolute cosmic ray flux at sea level*
- [8] D.W. Jordan and P. Smith, *Mathematical Techniques*, Oxford, Fourth edition, 2008
- [9] D.Donkers. *Scintillatiedetectors: Telsnelheid en Cherenkoeffect*, Bachelor Onderzoek SAP, UU(SAP)11-6, 20/10/2011.
- [10] [http://www-hep.uta.edu/hep\\_notes/general/general\\_0001.pdf](http://www-hep.uta.edu/hep_notes/general/general_0001.pdf)
- [11] <http://pdg.lbl.gov>
- [12] Donald H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Cambridge University Press, Fourth edition, 2000.
- [13] <http://sba.web.cern.ch/sba/BeamsAndAreas/East/East.htm>
- [14] Ernest M. Henley, Alejandro Garcia and Alejandro Garcia, *Subatomic Physics*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2006.