



1 Werking van een PMT

Een fotoversterkerbuis (photomultiplier tube, of PMT) is een elektronenbuis die staat om hele kleine lichtflitsjes om te zetten in een elektrisch signaal. Het is zelfs mogelijk om afzonderlijke fotonen te tellen. Geladen deeltjes uit kosmische straling die door de HiSPARC detectoren gaan verliezen energie in het materiaal van de detectoren. In de scintillator wordt dat energieverlies omgezet in een zwak lichtscherpsel. Dit paarsblauwe licht verspreidt zich door de detector, weerkaatst zo veel mogelijk aan de randen. Een deel komt terecht bij de PMT, die het licht detecteert en een signaal afgeeft aan de HiSPARC elektronica.

Een PMT maakt gebruik van het fotoelektrisch effect. Dit effect werd verklaard door Einstein en hiervoor ontving hij in 1921 de Nobelprijs.¹ Wanneer licht op een metaal schijnt, kunnen er elektronen worden losgeslagen uit het oppervlak. Dit gebeurt wanneer de energie per foton hoger is dan de energie die een elektron nodig heeft om los te komen uit het metaal. Deze drempelenergie is afhankelijk van het soort metaal. De energie per foton wordt gegeven door

$$E_f = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1.1)$$

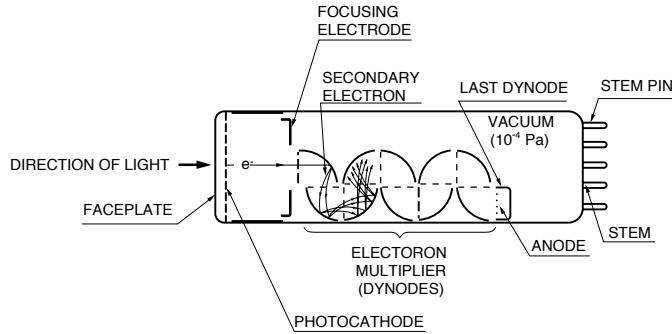
met E_f de energie van het foton, h de constante van Planck, c de lichtsnelheid en λ de golflengte van het licht. Zie ook Tabel 7 en Tabel 35 in je Binas.

De energie van een foton is dus omgekeerd evenredig met de golflengte: $E_f \propto 1/\lambda$. Hoe kleiner de golflengte van het licht, hoe groter de energie per foton. Dit betekent dat hoe ‘blauwer’ het licht, hoe makkelijker een elektron wordt losgemaakt. Is het licht *te* ‘rood’, dan lukt dat nooit. Daarom hebben we een scintillator gekozen die een violet licht uitstraalt.

De PMT is een verzegelde glazen buis die vacuüm gemaakt is (Figuur 1.1). De voorkant van een PMT bestaat uit een dunne glaslaag. Aan de binnenkant van het glas is een zeer dun metaallaagje opgedampt. Het laagje is *zó* dun, dat het doorzichtig is. Licht dat op de PMT valt, gaat door het glas en raakt het metaal. Het violette licht uit de scintillator heeft een E_f die hoog genoeg is om elektronen vrij te maken uit het metaallaagje. Om er voor te zorgen dat er veel elektronen beschikbaar zijn wordt het metaalplaatje op een grote negatieve spanning gezet. De elektronen staan dan feitelijk te dringen om het metaal te verlaten. Het metaallaagje heet de *kathode*² van de PMT. De *anode* van de fotobuis wordt gevuld, waardoor er een sterk elektrisch veld in de buis ontstaat. De elektronen versnellen richting de anode. Om een grote versterkingsfactor te krijgen is de buis opgedeeld in meerdere trappen. Iedere trap heeft een *dynode*, een metalen plaatje met een iets minder negatieve spanning dan de voorgaande dynode. Dus bij een PMT met drie dynodes, zijn de spanningen bijvoorbeeld als volgt: kathode (-1000 V), eerste dynode (-750 V), tweede dynode (-500 V), derde dynode (-250 V) en kathode (0 V). Zo blijven de elektronen versnellen van kathode, langs alle dynodes en uiteindelijk naar de anode. De versterking treedt op zodra

¹Veel mensen gaan er van uit dat Einstein de Nobelprijs ontving voor de relativiteitstheorie, maar dit klopt niet.

²In een vacuümbuis is de kathode de pool waar elektronen uit worden vrijgemaakt, zoals hier gebeurt.



Figuur 1.1 – Schematische weergave van een PMT. Figuur overgenomen uit [1].

de elektronen een dynode raken. De grote snelheid waarmee een elektron het metaal intreedt maakt een aantal elektronen los. Deze losgeslagen elektronen worden vervolgens versneld naar de volgende dynode. Als per dynode per elektron bijvoorbeeld drie elektronen worden losgeslagen, dan is de totale versterking in een PMT met tien dynodes gelijk aan $3^{10} \approx 60\,000$. De hoogspanning die over de PMT staat bepaalt in grote mate de versterkingsfactor. Hoe hoger de spanning, hoe groter de versterkingsfactor. De hoogspanning bepaalt namelijk enerzijds de versnelling van de elektronen en anderzijds het aantal elektronen dat staat te dringen om de dynode te verlaten.

De PMT die gebruikt wordt door HiSPARC is een 9107B van Electron Tubes [2]. Deze heeft 11 dynodes en een typische versterking van 3×10^6 bij 850 V. Dat komt overeen met $3,9^{11}$. Voor ieder elektron dat een dynode raakt worden er gemiddeld bijna vier elektronen vrijgemaakt.

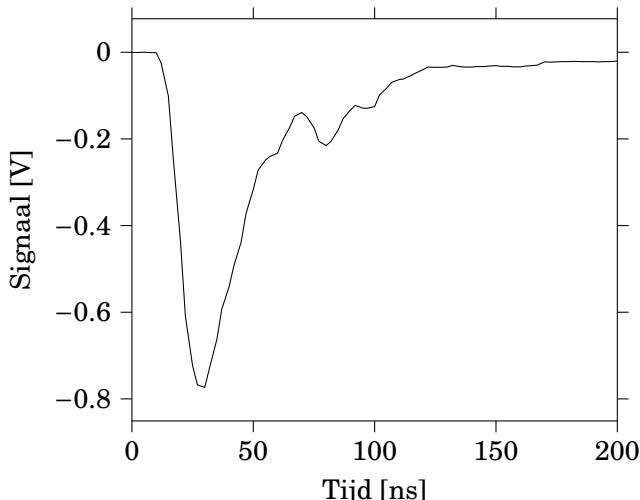
2 Signaal uit HiSPARC detectoren

Zodra een air shower een detector bereikt gaan één of meerdere deeltjes door de detector. Dit veroorzaakt een pulsvormig signaal. De relatief lange staart van het signaal wordt veroorzaakt door licht dat via een aantal reflecties alsnog bij de PMT terecht komt, maar ook door deeltjes die een beetje achterliepen in de shower en vrij laat door de detector gaan. Het signaal uit de PMT wordt via kabels met een lengte van 30 m naar de HiSPARC elektronica geleid. Alle kabels zijn precies even lang, om te zorgen dat het signaal uit alle detectoren op hetzelfde moment bij de elektronica aankomt.

In Figuur 2.1 staat het signaal van een HiSPARC event. Het bestaat uit een flinke puls met wat kleinere pieken in de staart. Dit signaal is veroorzaakt door meerdere deeltjes die (vrijwel) gelijktijdig door de detector gingen. De eerste grote puls is een optelsom van het licht van meerdere deeltjes.

2.1 Pulshoogtehistogram

Als je alle signalen uit een HiSPARC detector bekijkt, dan zie je grote verschillen. Dit komt omdat een event veroorzaakt kan worden door één, twee, drie, of zelfs méér geladen deeltjes die door de detector gaan. Ook ontstaan er hoogenergetische fotonen in air showers. Deze fotonen



Figuur 2.1 – Een signaal van een event in een HiSPARC detector. Het signaal bestaat uit een spanning uit een PMT. De (negatieve) spanning is recht evenredig met de lichtintensiteit die op het venster van de PMT valt. In de staart van het signaal zijn meerdere piekjes te zien. Dit zijn deeltjes die op een relatief laat tijdstip de detector bereikten.

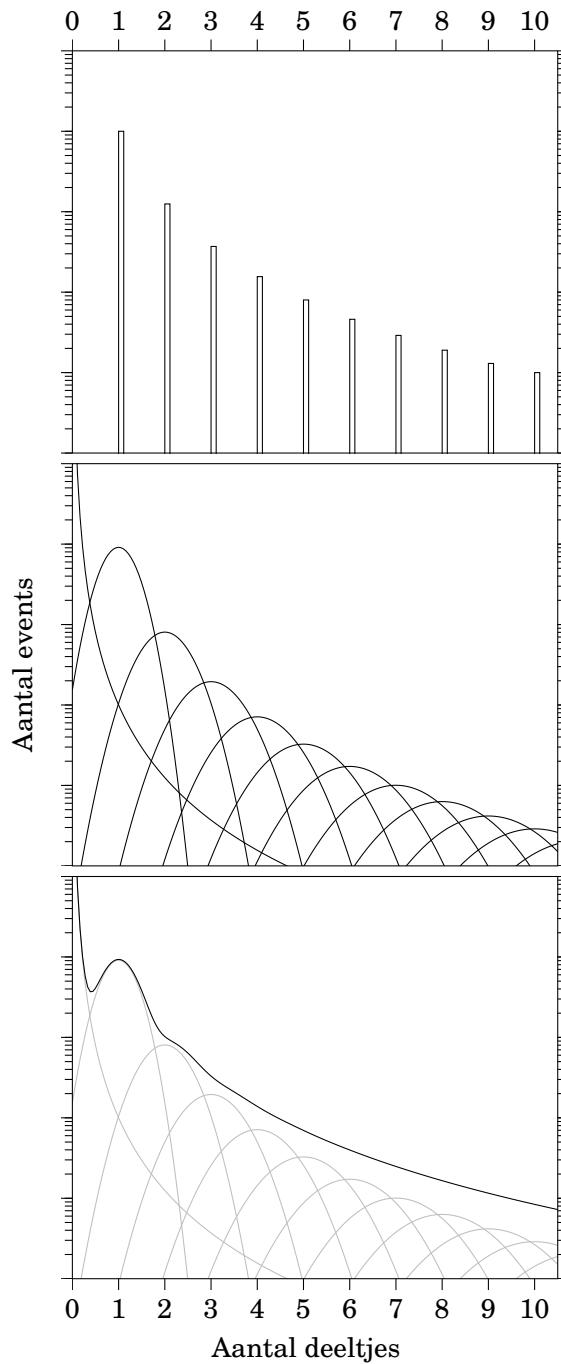
geven, met een kleine kans, een relatief zwak signaal in de detectoren. Maar omdat het aantal fotonen in een air shower enorm groot is zie je dit terug in signalen uit de HiSPARC detectoren.

In Figuur 2.2 is een histogram gemaakt van de componenten van het signaal uit een HiSPARC detector. Er kunnen 1, 2, 3, of meerdere deeltjes door een detector gaan. Je zou dus kunnen verwachten dat in het signaal van een HiSPARC detector de stappen duidelijk te zien zijn, zoals in de bovenste plot. Doordat het energieverlies van geladen deeltjes een kansproces is, net als het precieze aantal fotonen dat uiteindelijk bij de PMT uitkomt, is het signaal van bv. 2 deeltjes soms iets kleiner, en soms iets groter. De componenten zijn dus verbreedt (middelste plot). Verder is een afvallende distributie toegevoegd die de bijdrage van fotonen laat zien. Fotonen geven over het algemeen een klein signaal, maar er zijn ontzettend veel fotonen die de plaat raken. De energie van de fotonen is zó hoog (gammastraling) dat deze fotonen door het plastic dringen en door de detector gaan. In de onderste plot is tenslotte het totale signaal (zwart) als een optelsom van de verschillende deeltjescomponenten (grijs) weergegeven. Dit is het histogram dat op <https://data.hisparc.nl/> en in de DAQ software wordt weergegeven.

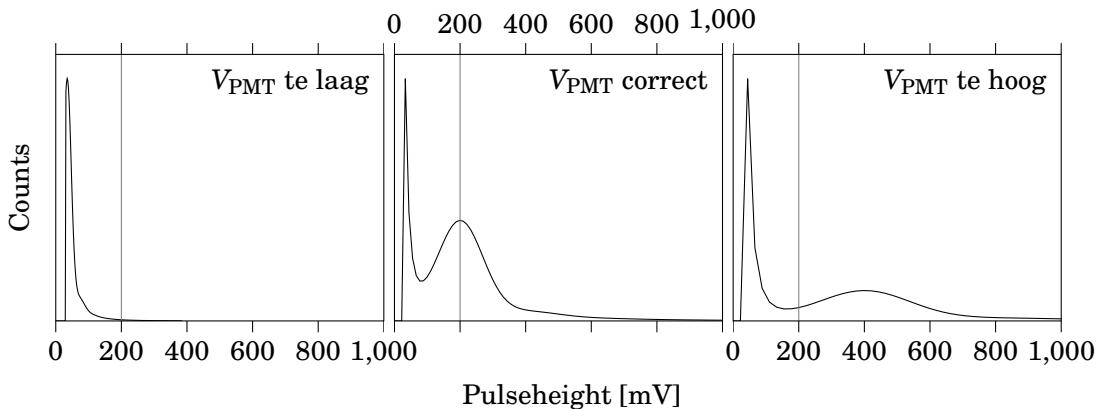
2.2 Drempels en triggervoorwaarden

Het is in een scintillatorplaat nooit volmaakt donker. Er zal altijd een klein aantal fotonen op de PMT vallen. Verder staat er zó veel spanning op de PMT dat er soms spontaan een elektron van een dynode wordt afgetrokken wat vervolgens leidt tot een klein, maar versterkt, signaal. Dit misleidende ‘signaal’ noemen we *ruis*. Door een *drempelwaarde* in te stellen is het mogelijk om de ruis te negeren. Alle signalen met een piekwaarde *lager* dan de drempelwaarde worden genegeerd.

Laagenergetische air showers komen veel vaker voor dan hogenergetische showers. Bij laagenergetische showers bereiken maar zeer weinig deeltjes de grond. Deze showers willen we het liefste



Figuur 2.2 – Histogram van de componenten van het signaal uit een HiSPARC detector. Bovenste plot: er kunnen 1, 2, 3, of meerdere deeltjes door een detector gaan. Middelste plot: doordat het energieverlies een kansproces is, evenals het aantal fotonen dat uiteindelijk bij de PMT uitkomt, is het signaal van bv. 2 deeltjes soms iets kleiner, en soms iets groter. De componenten zijn dus verbreedt. Verder is een afvallende distributie toegevoegd die de bijdrage van fotonen laat zien. Onderste plot: het totale signaal (zwart) is een optelsom van de verschillende deeltjescomponenten (grijs).



Figuur 3.1 – De correcte afstelling van de hoogspanning van de PMT kan worden gecontroleerd door een pulshoogtehistogram te bekijken. Hoe hoger de spanning, hoe verder het histogram naar rechts is verschoven. We proberen om de bult van 1 MIP bij een spanning van ongeveer 200 mV te leggen. In de linker plot is de spanning te laag, in de rechter plot te hoog. De middelste plot laat het goede beeld zien.

niet detecteren, aangezien we te weinig informatie kunnen krijgen om de energie of richting van de shower te reconstrueren. Helaas zijn deze showers zó talrijk dat een typische HiSPARC detector honderden deeltjes per seconde meet. Dit betekent dat het moeilijk wordt om hoogenergetische showers te herkennen.

Door meer dan één detector te gebruiken in een station is het mogelijk om deze achtergrond te negeren. De kans dat een laagenergetische shower meer dan één detector raakt is zeer klein. Voor een hoogenergetische air shower is dat echter geen probleem. De gemiddelde deeltjesdichtheid op de grond is dan zó hoog dat de kans dat er deeltjes door meer dan één detector gaan zeer groot is. We kunnen dus stellen dat als twee of meer detectoren tegelijkertijd deeltjes meten er zeer waarschijnlijk sprake is van een hoogenergetische air shower. De HiSPARC elektronica reageert alleen indien dit het geval is. Dit heet een *triggervoorwaarde*.

De standaard triggervoorwaarde voor een twee-plaats opstelling is *minimaal twee detectoren met een piekwaarde boven de 30 mV* en voor een vier-plaats opstelling: *minimaal twee detectoren met een piekwaarde boven de 70 mV óf minimaal drie detectoren met een piekwaarde boven de 30 mV*.

3 Inregelen PMTs

De correcte afstelling van de hoogspanning van de PMT kan worden gecontroleerd door een pulshoogtehistogram te bekijken (Figuur 3.1). Hoe hoger de spanning, hoe verder het histogram naar rechts is verschoven, omdat alle signalen meer worden versterkt. We proberen om de bult van 1 MIP bij een spanning van ongeveer 200 mV te leggen. In de linker plot is de spanning te laag, in de rechter plot te hoog. De middelste plot laat het goede beeld zien.

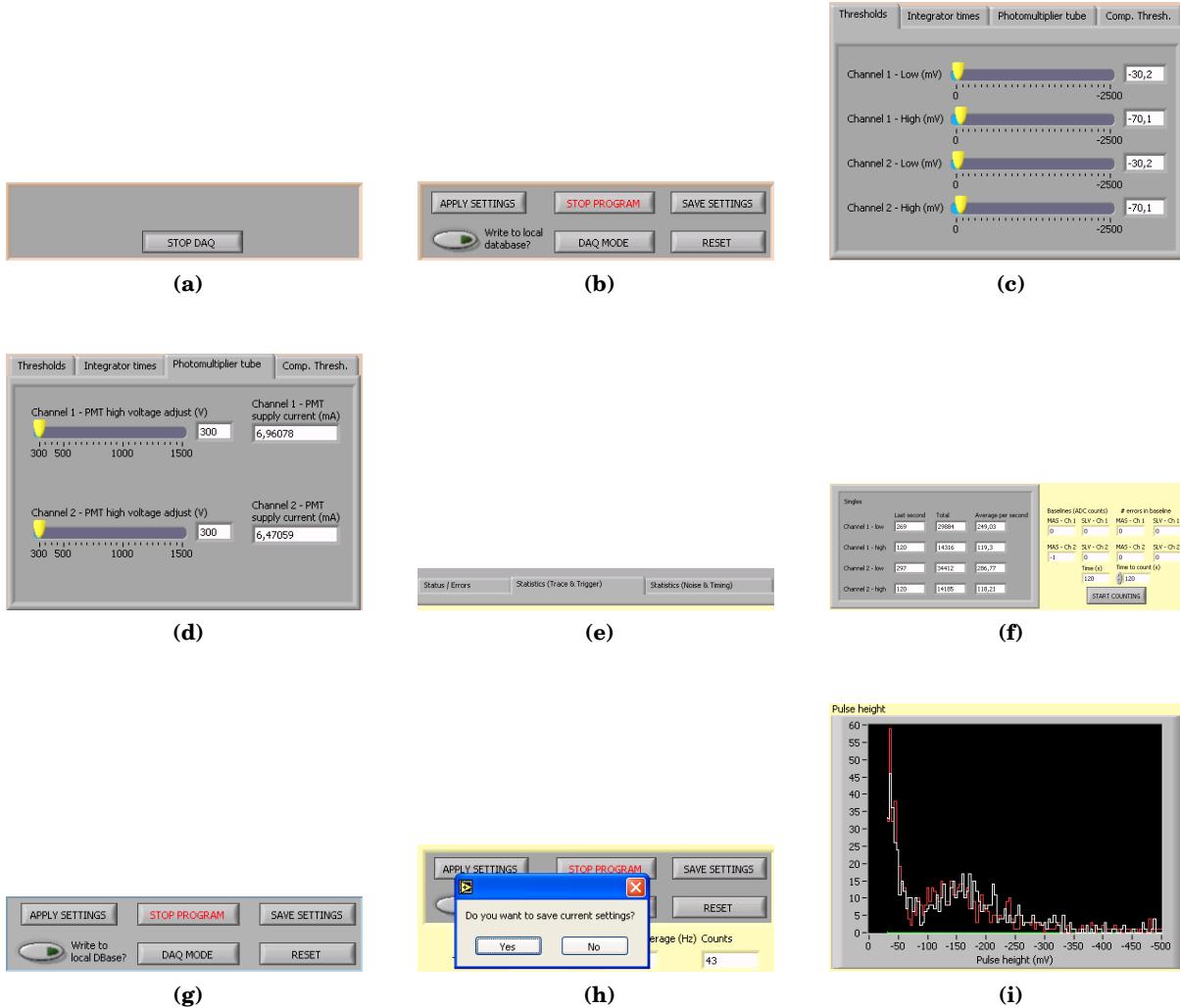
We kunnen de spanning op een snelle manier goed instellen. We maken dan gebruik van een aantal *tellers* in de HiSPARC software. Deze tellers laten zien hoeveel pulsen boven de drempelwaarden uitkomen. Dit doen ze per detector, onafhankelijk van of er daadwerkelijk getriggerd wordt. Dit betekent dat als slechts één detector een signaal hoger dan 30 mV meet, dit meegeteld

wordt.

Aangezien de vorm van het signaal van HiSPARC vrijwel gelijk is voor alle detectoren kunnen we de tellers gebruiken om te controleren of een detector goed is ingesteld. We hebben daartoe één HiSPARC detector met de hand goed afgesteld en de tellerwaardes genoteerd. Als een andere detector op diezelfde waardes wordt afgesteld, blijkt de vorm van het signaal inderdaad goed overeen te komen en is deze detector óók goed afgesteld. De procedure is dan als volgt:

1. Allereerst: stop de DAQ modus (Figuur 3.2a).
2. Onthoudt goed: klik na iedere aanpassing van een instelling in de software op *apply settings!* (Figuur 3.2b)
3. Controleer dat de drempelwaardes zijn ingesteld op 30 mV voor de *low threshold* en 70 mV voor de *high threshold* (Figuur 3.2c).
4. Stel de hoogspanning in op 300 V (Figuur 3.2d).
5. Het aantal singles kun je meten door over te schakelen naar het tabblad *statistics* (Figuur 3.2e).
6. Verhoog de spanning nu zodanig dat het aantal singles voor de *high threshold* ongeveer 120 is. Meet minstens 30 s.
7. Als de spanning goed is ingesteld, controleer dan nogmaals het aantal singles door minstens 120 s te meten (Figuur 3.2f).
8. Pas de spanning eventueel nog aan in heel kleine stapjes. De software kan geen kleiner stapjes maken dan ongeveer 4 V. Meet daarna minstens *twee keer* en gebruik alleen de laatste meting. De PMTs hebben namelijk even tijd nodig om ‘af te koelen’ of ‘op te warmen’.
9. Controleer dat het aantal singles voor de *low threshold* grofweg uitkomt op 250. Het mag minder dan een factor 2 afwijken. Wijkt het méér af, neem dan contact op met de HiSPARC clustercoördinator (Figuur 3.2f).
10. Schakel over naar DAQ mode (Figuur 3.2g).
11. Er wordt gevraagd om de nieuwe instellingen te bewaren. Klik op *Yes* (Figuur 3.2h).
12. Laat de detector een tijdje meten (ongeveer 30 min) en controleer dat de 1 MIP bult uitkomt bij ongeveer 150 mV tot 200 mV (Figuur 3.2i).

De detector is nu goed afgesteld.



Figuur 3.2 – Screenshots van de DAQ software. Deze verduidelijken de verschillende stappen voor het inregelen van de PMTs. Zie de beschrijving in de lopende tekst.

Referenties

- [1] Hamamatsu, *Photomultiplier Tubes, Construction and Operating Characteristics Connections to External Circuits* (1997).
- [2] ET Enterprises, Ltd., *9107B series data sheet* (2010), https://et-enterprises.com/images/data_sheets/9107B.pdf.