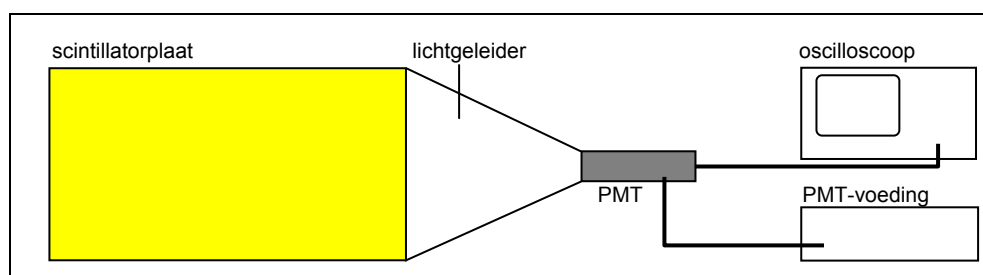


Detectie van kosmische straling

3.1 Detector

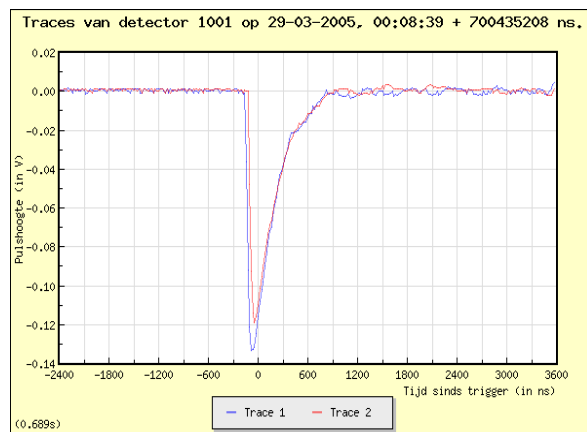
Een HiSPARC detector voor kosmische straling bestaat uit een scintillatorplaat, een lichtgeleider en een fotoversterkerbuis zoals weergegeven in figuur 1. De scintillatorplaat bestaat uit een materiaal met de eigenschap dat het een lichtflits geeft bij het passeren van een geladen deeltje. De lichtsterkte van deze flits is evenredig met de totale energie die het deeltje aan het scintillatormateriaal afstaat. Een deel van de geproduceerde fotonen zal de lichtgeleider bereiken. Deze lichtgeleider vormt de verbinding tussen de scintillatorplaat en de fotoversterkerbuis. Deze fotoversterkerbuis (of Photo Multiplier Tube – afgekort: PMT) zet de invallende fotonen om in een elektrisch signaal in de vorm van een spanningspuls.



Figuur 1 – De detector bestaat uit een scintillatorplaat, een lichtgeleider en een fotoversterkerbuis (PMT). Een passerend geladen deeltje produceert fotonen in het scintillatiemateriaal.

Het uitgangssignaal van de PMT bij het passeren van een muon door de scintillatorplaat is te zien op het scherm van een oscilloscoop. Een voorbeeld daarvan is weergegeven in figuur 2. De vraag is nu of bij zo'n gebeurtenis een dergelijke puls te verwachten is. Of, met andere woorden: is de grootte-orde van de pulshoogte in overeenstemming met de theoretische verwachting? Het antwoord op deze vraag is te vinden met een globale berekening die in een aantal stappen verloopt:

- Hoeveel energie raakt een muon kwijt bij interactie met de scintillator, en hoeveel fotonen levert dat op in de scintillator?
- Welk deel van die geproduceerde fotonen bereikt de PMT?
- Hoeveel elektronen levert de PMT dan aan zijn uitgang?
- Wat zal dan de spanning van de op het scoopscherm zichtbare puls zijn?

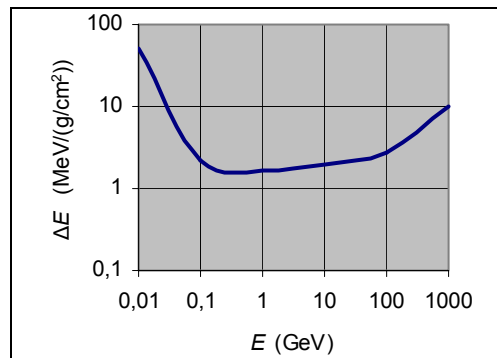


Figuur 2 – Voorbeeld van een spanningspuls op het scoopscherm bij het passeren van een muon in een scintillatorplaat. Er zijn twee ongeveer even grote spanningspulsen zichtbaar, afkomstig van twee naast elkaar opgestelde scintillatorplaten (zie 3.4 Detectiestation). Als gevolg van de instelling van de apparatuur voor signaalverwerking is het signaal een factor 100 in de tijd uitgerekt. De instelling van de tijd-as is dus in werkelijkheid 3 ns per schaaldeel (in plaats van de 300 ns per schaaldeel in het schermbeeld hiernaast).

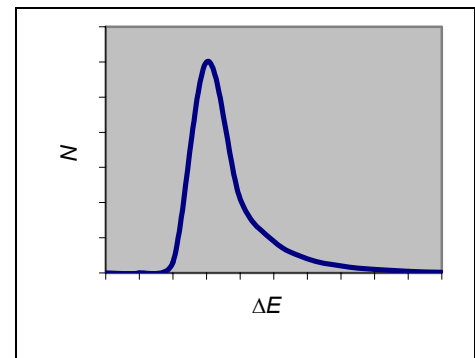
Energieverlies – In het diagram van figuur 3 is weergegeven hoeveel energie een muon kwijtraakt bij interactie met een materiaal zoals dat van de scintillator. Dit energieverlies ΔE wordt opgegeven in $\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$. Deze eenheid vraagt enige toelichting, omdat de grootheid energie normaal gesproken wordt uitgedrukt in de eenheid eV (en in dit geval kennelijk MeV). Het energieverlies van een muon bij interactie met een materiaal hangt af

van de dichtheid ρ van het materiaal en de weglengte ℓ van het muon in het materiaal: hoe groter de dichtheid en de weglengte zijn, des te groter is het energieverlies. Uit metingen blijkt dat dit energieverlies recht evenredig is met het product van dichtheid en weglengte: $\Delta E = k \cdot \rho \cdot \ell$. Hierin is k een constante die voor alle materialen zo ongeveer dezelfde waarde blijkt te hebben. De eenheid van het product $\rho \cdot \ell$ is g/cm^2 , zodat de constante k als eenheid $\text{MeV}/(\text{g/cm}^2)$ heeft. In het diagram van figuur 3 staat dus eigenlijk de waarde van de constante k uitgezet: $k = \Delta E/(\rho \cdot \ell)$. Door het energieverlies van een muon op deze manier weer te geven, is het diagram ruwweg van toepassing op alle materialen. Uit het diagram van figuur 3 blijkt dat het energieverlies ΔE van een muon afhangt van zijn energie E . We hebben te maken met muonen met een energie E in de grootte-orde van GeV (10^9 eV).

- 1 Het energieverlies van een passerend muon hangt af van de eigenschappen van de scintillator: een dichtheid van 1 g/cm^3 en een dikte van 2 cm.
Bereken het energieverlies (in MeV) van een loodrecht op de scintillator invallend muon.
- 2 Het aantal door een passerend muon geproduceerde fotonen hangt af van het energieverlies van het muon en van het energieverlies dat nodig is voor de productie van een foton. Dit laatste is een soort materiaaleigenschap van de scintillator: een energieverlies van 100 eV levert één foton op in de scintillator.
Bereken het aantal geproduceerde fotonen N_f in de scintillator bij het passeren van een muon.



Figuur 3 – Het energieverlies ΔE van muonen bij interactie met materie als functie van de muon-energie E .



Figuur 4 – Landau-verdeling van het energieverlies ΔE over een groot aantal muonen.

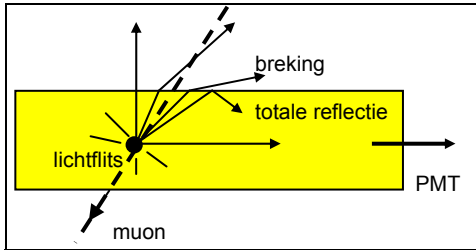
Bij de uitgevoerde berekening van het aantal geproduceerde fotonen moet nog wel een kanttekening worden gemaakt. Het energieverlies ΔE van muonen bij interactie met materie zoals weergegeven in figuur 3 is namelijk een soort gemiddelde. Bij een aantal verschillende muonen met dezelfde energie E zal het ene muon meer, en het andere minder energie verliezen. Dit energieverlies is namelijk een statistisch proces. De statistische verdeling van het energieverlies over een groot aantal muonen is in 1944 bepaald door Lev Landau, en wordt dan ook de Landau-verdeling genoemd. Deze Landau-verdeling is weergegeven in figuur 4. Dat diagram geeft de aantallen muonen N met verschillende waarden van het energieverlies ΔE . De ligging van de piek in deze verdeling geeft het meest waarschijnlijke (of: meest voorkomende) energieverlies. Dat meest waarschijnlijke energieverlies is uitgezet in het diagram van figuur 3.

Een dergelijke statistische verdeling van het energieverlies van muonen in de scintillator heeft natuurlijk gevolgen voor de pulshoogte in het uitgangssignaal van de PMT. Bij detectie van een groot aantal passerende muonen zal ook deze pulshoogte statistisch verdeeld zijn volgens de Landau-verdeling.

Fotonenverlies – Een passerend muon produceert in de scintillator een aantal N_f van $4 \cdot 10^4$ fotonen. De vraag is nu hoe groot het aantal fotonen $N_{f,K}$ is dat op de kathode van de PMT invalt. Of, met andere woorden: welk deel van de geproduceerde fotonen raken we kwijt in de scintillator en de lichtgeleider? Hiervan is slechts een ruwe schatting te maken.

- 3 Een belangrijke oorzaak van fotonenverlies is het verschijnsel *breking*. In figuur 5 is de scintillator tweedimensionaal in zijaanzicht weergegeven, met in het midden een tot een punt geconcentreerde lichtflits. Een deel van het uitgezonden licht zal door *totale*

reflectie binnen de scintillator blijven, en ander deel gaat verloren.



Figuur 5 – Doorsnede van de scintillator in zijaanzicht. In deze sterk vereenvoudigde situatie produceert een passerend muon een tot een puntbron gereduceerde lichtflits.

- Beschrijf het verschijnsel *totale reflectie*: wat is het, en wanneer treedt het op? Gebruik in je uitleg in elk geval de begrippen breking, invalshoek, grenshoek en brekingsindex.
- Het scintillatormateriaal heeft een brekingsindex n van 1,58. Bereken de waarde van de grenshoek i_g van dit materiaal.
- Leg uit dat in de tweedimensionale situatie van figuur 5 zo ongeveer de helft van het aantal geproduceerde fotonen de PMT zeker niet zal bereiken.
- Leg uit dat in een driedimensionale situatie een nog groter deel van de geproduceerde fotonen de PMT niet zal bereiken. Bedenk daarbij dat in het scintillatormateriaal – net als in elk ander doorzichtig materiaal – lichtabsorptie optreedt, en dat deze lichtabsorptie afhankelijk is van de in het materiaal afgelegde afstand.

- Leg uit dat de afwijkende geometrie van de lichtgeleider tussen de scintillator en de PMT (zie figuur 1) voor een extra fotonenverlies zorgt.
- Neem aan dat uiteindelijk slechts 1% van de geproduceerde fotonen de PMT bereikt. Bereken het aantal fotonen $N_{f,K}$ dat op de PMT-kathode invalt bij het passeren van een muon.

Als gevolg van het verschijnsel breking bereikt slechts een deel van de geproduceerde fotonen de PMT-kathode: hooguit de helft, maar op grond van verschillende overwegingen nog veel minder dan dat. Dit fotonenverlies wordt nog enigszins beperkt door het aluminiumfolie rond de scintillator dat fotonen die de scintillator verlaten terugkaatst, maar deze reflectie is niet volledig. Laten we aannemen dat uiteindelijk slechts 1% van de geproduceerde fotonen de PMT-kathode bereikt.

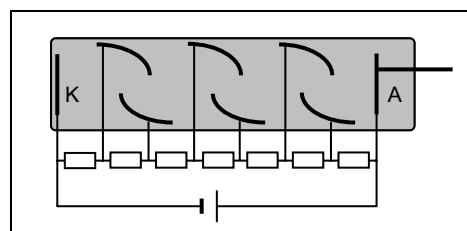
Elektronenwinst – De PMT zet een lichtflits in de scintillator om in een elektrisch signaal. Of, nauwkeuriger gezegd: als er een aantal fotonen op de PMT invalt, produceert deze een aantal elektronen. Deze elektronen zijn in de vorm van een spanningspuls op een scoop-scherm zichtbaar te maken.

Een passerend muon produceert in de scintillator een aantal N_f van $4 \cdot 10^4$ fotonen. Daarvan valt slechts 1% in op de PMT-kathode: $N_{f,K} = 4 \cdot 10^2$. De vraag is nu hoe groot het aantal elektronen $N_{e,A}$ is dat de PMT-anode als uitgangssignaal levert.

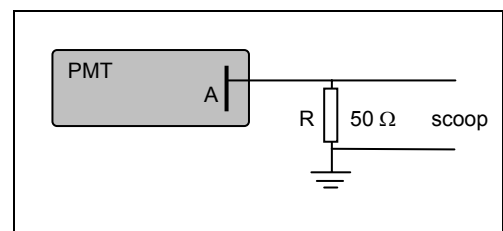
- 4 De Photo Multiplier Tube (PMT) is niet alleen een omzetter van fotonen in elektronen, maar ook een versterker. Het aantal geproduceerde elektronen is dus (veel) groter dan het aantal invallende fotonen.
 - De bouw van een PMT is weergegeven in figuur 6. Beschrijf de werking van deze fotoversterkerbuis: hoe zet deze buis fotonen om in elektronen, en hoe komt die versterking tot stand? Leg ook uit hoe de versterking afhangt van de voedingsspanning over de buis.

Informatie over de werking van de fotoversterkerbuis is te vinden op:

- > <http://electronics.howstuffworks.com/pmt.htm>
- > <http://www.natuurkunde.nl> > zoeken (zoekwoord: PMT)



Figuur 6 – Doorsnede van een Photo Multiplier Tube (PMT).



Figuur 7 – Het PMT-signaal wordt over een weerstand aan de oscilloscoop toegevoerd.

- De fabrikant van de PMT levert in de bijbehorende documentatie een aantal eigenschappen van de buis, zoals het kwantumrendement ϵ en de versterkingsfactor (of: gain) G . Het kwantumrendement ϵ van de PMT is 0,28 (of 28%). Dat wil zeggen: slechts 28 van de 100 op de PMT invallende fotonen maakt een elektron uit de PMT-kathode vrij. De versterkingsfactor G is sterk afhankelijk van de voedingsspanning over de buis, maar heeft een nominale waarde van $3 \cdot 10^6$. Dat wil zeggen: voor elk elektron dat uit de PMT-

kathode vrijkomt levert de PMT-anode $3 \cdot 10^6$ elektronen.

Bereken het aantal elektronen $N_{e,A}$ dat de PMT-anode levert bij het passeren van een muon.

Pulshoogte – Een passerend muon veroorzaakt dus gedurende een korte tijd voor een ‘aanbod’ van $3,4 \cdot 10^9$ elektronen op de PMT-anode. In figuur 7 is aangegeven dat deze elektronen via een weerstand R van 50Ω naar aarde wegstromen. Daarmee is de hoogte van de spanningspuls op het scoopscherm te bepalen.

- 5 Een karakteristiek voorbeeld van de spanningspuls op het scoopscherm bij het passeren van een muon is weergegeven in figuur 2.
 - Bepaal uit figuur 2 de tijdsduur van de spanningspuls. Bereken daarmee de (gemiddelde) stroomsterkte I in de weerstand R .
 - Bereken de (gemiddelde) spanning U over de weerstand R . Vergelijk deze waarde met de hoogte van de spanningspuls die op het scoopscherm te zien is. Leg uit of deze pulshoogte wel of niet in overeenstemming is met de theoretische verwachting.
 - Wat zijn de belangrijkste onzekerheden in de berekening van de theoretisch te verwachten pulshoogte?
- 6 Het resultaat van een groot aantal muon-detecties wordt weergegeven in een pulshoogte-histogram. In zo'n histogram staat horizontaal de pulshoogte U (in mV) en verticaal het aantal malen N dat een dergelijke pulshoogte gemeten is. Schets het verwachte pulshoogte-histogram bij een groot aantal muon-detecties. Geef een toelichting: leg uit waarom je verwacht dat het pulshoogte-histogram er zo zal uitzien.
- 7 Neem aan dat er een manier is om een klein deel (bijvoorbeeld 10 cm^2) van het totale scintillatoroppervlak van $0,5 \text{ m}^2$ te selecteren. We detecteren dan alleen de muonen die dat kleine deeloppervlak passeren. Schets de verwachte pulshoogte-histogrammen bij een groot aantal muon-detecties op minstens twee verschillende plaatsen van dat kleine deeloppervlak op de scintillator. Geef een toelichting: leg uit waarom je verwacht dat deze pulshoogte-histogrammen al dan niet van elkaar verschillen.
- 8 Bedenk een manier om een klein deel van het totale scintillatoroppervlak te selecteren, zoals bedoeld in opdracht 7.