

DE MUONPARADOX

Samenvatting

Dit experiment is gebaseerd op het meten van muonen uit de kosmische straling. Je maakt kennis met enkele technieken uit de deeltjesfysica. Door het meten van de levensduur en de snelheid van muonen zal je de speciale relativiteitstheorie aan het werk zien!

Leestekst

Achter in dit document vind je vragen m.b.t. deze leestekst. Beantwoord deze vragen voordat je met het practicum begint. Ook zijn er vragen die je op weg helpen tijdens het practicum en om ervoor te zorgen dat je niets vergeet, zijn er ook nog vragen die je achteraf kunt beantwoorden. Je hoeft de antwoorden op deze vragen niet in te leveren, maar je zou deze vragen (en de antwoorden) als leidraad voor je verslag kunnen gebruiken.

De levensduur en snelheid van muonen meten

Het doel van het experiment is te verklaren waarom het voor muonen mogelijk is de aarde te bereiken door middel van een meting van de levensduur en de snelheid. Muonen worden op ongeveer 10 km hoogte geproduceerd. Het zal blijken dat muonen ongeveer 2 microseconde leven. Dit betekent dat ze met ongeveer 16 maal de lichtsnelheid moeten reizen en dat kan natuurlijk niet. Jullie gaan op zoek naar de oplossing voor dit probleem.

De levensduurmeting berust op het verval een muon in andere deeltjes, o.a. een elektron en kan worden uitgevoerd met 1 detector. Het muon raakt de detector en geeft een signaal.

De meeste muonen vliegen dwars door de detector heen, maar een kleine fractie van de muonen wordt ingevangen. De ingevangen muonen vervallen na een tijdje, wat een tweede signaal geeft (van het elektron).

De snelheidsmeting is gebaseerd op een methode die 'time of flight measurement' wordt genoemd. In de deeltjesfysica wordt dit type meting vaak toegepast in versnellerexperimenten. Hoe dan ook, de snelheidsmeting wordt uitgevoerd met twee detectoren die, pakweg, 2 meter uit elkaar staan. Met de gemeten tijdsverschillen van muonen die door beide detectoren vliegen kan de snelheid bepaald worden.

De interpretatie van de metingen wordt bemoeilijkt door het feit dat we de levensduur en de snelheid van de muonen niet direct meten, maar we meten een distributie. Als we rekenen houden met detectoreffecten kunnen we uit deze distributie toch een waarde van de levensduur en snelheid bepalen.

1. Kosmische straling

Wat is kosmische straling en hoe worden de geladen deeltjes – voornamelijk muonen – waarvan we de snelheid gaan meten, geproduceerd?

De ontdekking

Rond 1909 was het al enige tijd bekend dat elektroscopen te snel ontladden. De lucht in de elektroscopen werd elektrisch geladen ongeacht de mate van isolatie. Een eerste gedachte was dat dit veroorzaakt werd door straling van radioactieve stoffen in de grond. Theodore Wulf ontdekte echter dat een elektroscop op de top van de Eiffeltoren (300 m) sneller ontladen werd dan op de grond, hetgeen niet klopte met de hypothese dat het verschijnsel veroorzaakt werd door straling uit de aarde. Victor Hess onderzocht hoe ver straling uit de grond zou kunnen komen en concludeerde dat op een hoogte van 500m deze straling geen effect meer zou hebben. In 1910 begon Victor Hess een elektroscop te ontwikkelen, die de barre omstandigheden van een ballonvaart zou kunnen overleven en onder deze omstandigheden een goede isolatie zou behouden. In 1912 nam Victor Hess deze elektroscop mee in een ballon en ontdekte dat naarmate hij hoger steeg de elektroscop steeds sneller ontladen werd. Op enige kilometers hoogte werd dit effect zo sterk dat Hess de mogelijkheid van straling uit de ruimte niet meer kon ontwijken. Hess zag ook dat zijn metingen dezelfde bleven gedurende een zonsverduistering op 12 april 1912. Hij concludeerde toen dat de Zon niet de belangrijkste bron van de straling kon zijn. In 1936 kreeg hij voor dit werk de Nobel prijs. Sinds zijn ontdekking zijn er tot op de dag van vandaag vele metingen gedaan aan de kosmische stralen. Nieuwe experimenten worden ook nu nog gebouwd.

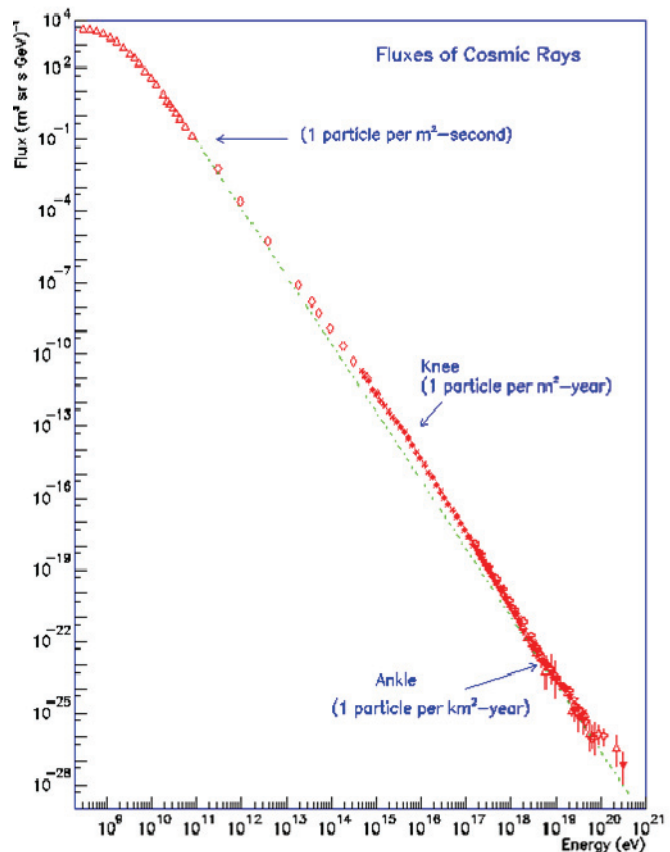
Waar zijn we nu?

Uit de ruimte komt van alles tot ons: elektromagnetische straling (licht, microgolven, gammastraling), neutrale en geladen deeltjes en misschien nog wel een heleboel dingen die we niet kennen. De geladen deeltjes die tot ons komen zijn voor 89% protonen, 10% Helium kernen en de overige 1% verdeeld over alle deeltjes van het periodiek systeem. Onder kosmische stralen verstaat men alleen de geladen deeltjes. De herkomst van deze deeltjes is niet altijd bekend. Geladen deeltjes kunnen op hun weg naar de Aarde worden afgebogen door interstellaire en galactische magneetvelden. Hierdoor zal, eenmaal op Aarde aangekomen, hun gemeten richting niet vertellen waar ze vandaan komen. Ook in ons zonnestelsel veroorzaken de stromen geladen deeltjes die van de zon komen, een magneetveld dat de kosmische deeltjes afbuigt, en ook het magneetveld van de aarde zal dat doen. Het gevolg is dat bij grote zonneactiviteit de intensiteit van de kosmische stralen die op aarde aankomt, kleiner is. Supernova resten (zoals de krab nevel) kunnen een bron zijn van kosmische stralen. Men kan dit afleiden uit de synchrotronstraling, die resten van een supernova uitstralen t.g.v. elektronen, die zich in het magneetveld van de supernova rest in spiralen bewegen. Deze synchrotronstraling heeft een energie tussen de 10 en 1000 keV. De gemeten intensiteit (de flux) van kosmische stralen als functie van hun energie is gegeven in het figuur 1. De afhankelijkheid van de intensiteit van de kosmische stralen van hun energie is gegeven door de volgende formule:

$$I(E) = 1.8E^{-2.7}$$

$I(E)$ is het aantal deeltjes met energie E in GeV, per m^2 , per seconde en per steradiaal.

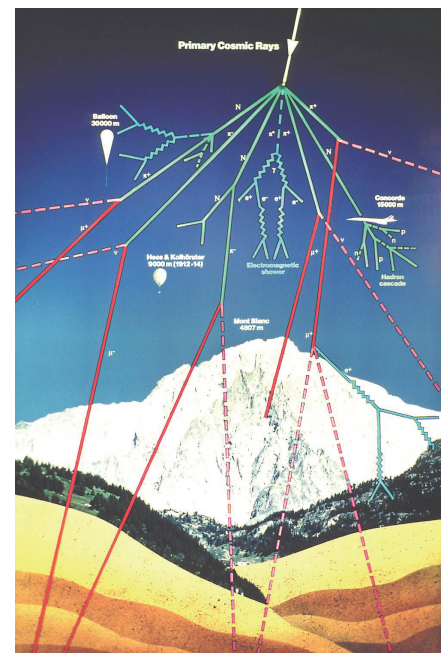
Deze formule is een puur empirische formule, die het beste de meetpunten in figuur 1 verklaart (we noemen dat een 'fit' aan de meetpunten). De hoogst waargenomen energieën van kosmische stralen zijn 10^{20} eV. Dit is equivalent met 16 Joule. Als een bal van 100 g deze energie heeft, zou hij een snelheid 64 km/uur hebben. De kosmische stralen die uit het melkwegstelsel komen hebben meestal energieën tussen de 100 MeV en 10 GeV.



Figuur 1. Gemeten energiespectrum van kosmische stralen.

Wat zien we ervan?

Als de primaire kosmische straling in de dampkring van de aarde komt, dan kunnen de geladen kosmische deeltjes met een kern van een atoom in de atmosfeer botsen. Voordat de kosmische stralen de aarde bereiken hebben ze allang een of meerdere interacties ondergaan met de atoomkernen van de luchtmoleculen. Afhankelijk van de energie zullen hierbij veel of weinig pionen en protonen geproduceerd worden. Deze secundaire protonen en pionen kunnen ook weer interacties geven met de atoomkernen van de lucht of naar een muon vervallen. In iedere botsing verliezen de deeltjes energie en uiteindelijk worden de meeste gestopt in de atmosfeer. De deeltjes die op aarde aankomen zijn hoofdzakelijk muonen en heel weinig andere deeltjes. Afhankelijk van wat er gebeurt en wat de primaire energie is, zal er sprake zijn van een meer of minder grote regenbui van kosmische



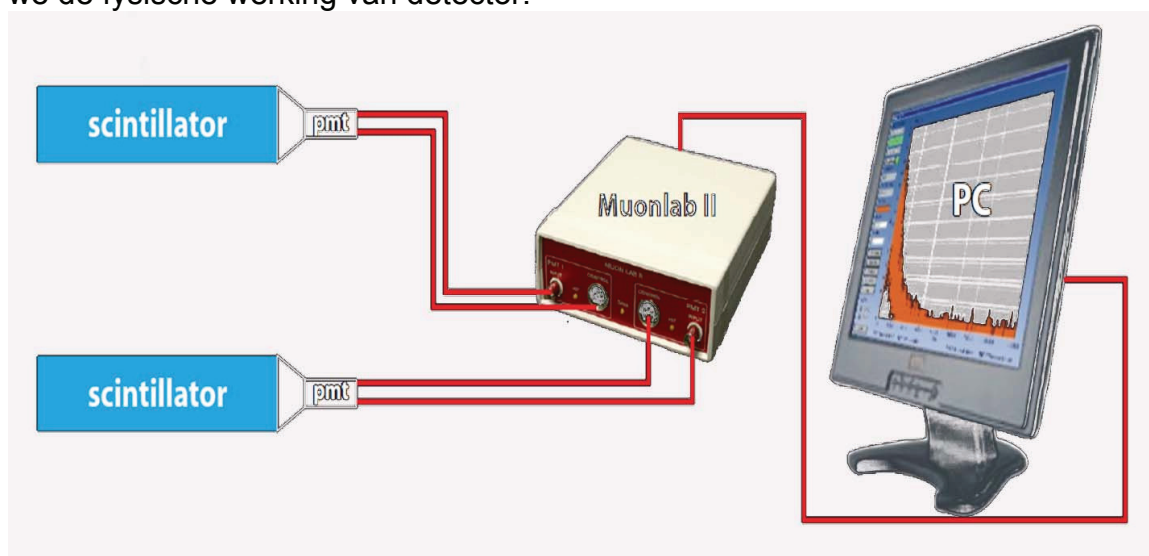
Figuur 2

deeltjes. Deze regenbuien (showers genaamd) kunnen soms wel heel groot zijn: eens per 100 jaar is er wel eens een met een grootte van 1 km^2 .

2. Technische realisatie van de meting

De opstelling

De opstelling is hieronder schematisch weergegeven. De detectoren staan links in de figuur en bestaan uit een 'balk' scintillator materiaal van ongeveer 1 meter lang, verbonden met een fotomultiplier (PMT). De PMT wordt software-matig via de PC ingesteld en uitgelezen door middel van een interface kastje 'Muonlab II' zoals in de figuur te zien is. In de Appendix zijn enkele technische tips te vinden hoe je deze opstelling opbouwt en instelt. In de volgende paragraaf bespreken we de fysische werking van detector.



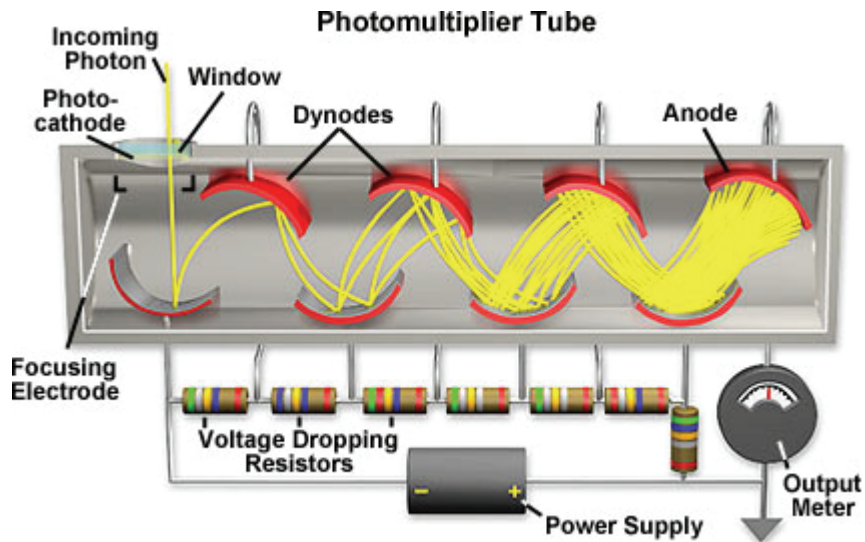
Het waarnemen van geladen deeltjes

Als een geladen deeltje door materie gaat, zal het energie afgeven in kleine porties waardoor moleculen kunnen worden aangeslagen of geïoniseerd. Deze energieafgifte geschiedt volgens de elektromagnetische wisselwerking of fotonuitwisseling (is hetzelfde). Afhankelijk van het type materiaal, type deeltje, energie en lading van het deeltje kan er van alles gebeuren. Doorgaans zal er langs de weg die het geladen deeltje aflegt door de stof, heel veel moleculen worden aangeslagen. Er zijn optisch doorzichtige materialen waarin een klein deel van de aangeslagen moleculen de opgenomen energie in de vorm van een zichtbaar foton zullen afgeven. Dit soort materialen heten scintillatiematerialen. Een lichtflitsje ontstaat doordat er een molecuul in de stof wordt aangeslagen naar een hoger niveau t.g.v. de passage van een geladen deeltje. Dit molecuul valt dan onder uitzending van een foton weer terug naar de grondtoestand. Sommige (an)organische materialen vertonen dit gedrag. Organische materialen die dit doen, hebben meestal een benzeenring in hun moleculen zoals polystyreen of polyvinyltolueen. Er zijn ook organische vloeistoffen en gassen die kunnen scintilleren. In het experiment dat we hebben voorbereid, zullen de muonen worden waargenomen met twee lange en dikke stukken scintillerend

materiaal. De scintillatiefotonen kunnen met fotoversterkerbuizen waargenomen worden.

De foto(versterker)buis

Een fotoversterkerbuis of fotobuis maakt van licht een elektrisch signaal. De fotobuis bestaat uit een kathode, een aantal dynodes, en een anode. Als een



Figuur 3. Principe van een photomultiplier.

foton op de kathode valt, kan hij een elektron vrijmaken (foto-elektrisch effect) uit het lichtgevoelige materiaal dat op deze kathode is aangebracht. Als lichtgevoelig materiaal gebruikt men meestal een stof met een lage uittree-potentiaal voor elektronen en een hoge efficiëntie. Dat moet dus een stof zijn met een elektron in de buitenste baan zoals Na of K. Gewone metalen als koper hebben ook een lage uittree-potentiaal, maar een zeer lage efficiëntie en zijn daarom niet geschikt om te dienen als fotokathode. Als we nu dit vrijgemaakte elektron zo op de anode laten vallen, zullen we het niet kunnen detecteren. Daarom zijn er tussen de kathode en de anode een aantal elektroden aangebracht die het aantal elektronen gaan vermenigvuldigen (daarom wordt een fotobuis in het Engels een PMT – Photo Multiplier Tube – genoemd).

De elektroden, dynodes geheten, staan op een elektrische spanning en zijn voorzien van een laagje materiaal dat, als er een elektron op valt, minstens twee elektronen uitzendt. Met 10 dynodes is de versterking van de



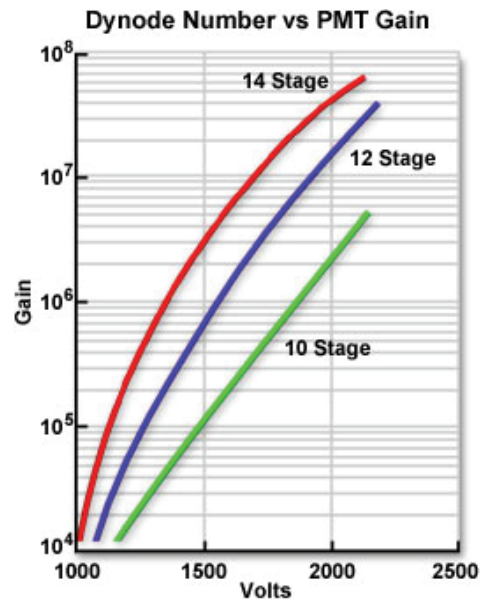
Figuur 4. Voorbeeld van een fotobuis

fotobuis in dat geval minstens 2^{10} : op de anode zien we een stroompulsje van 2^{10} elektronen. In de praktijk worden de dynodes op spanning gezet via een spanningsdeler tussen de hoogspanning en aarde. Afhankelijk van het type spanningsdeler zal de versterking van de fotobuis een waarde hebben die meestal ligt tussen de 10^6 en de 10^8 . De kathode staat op aarde en de anode op een positieve hoogspanning of de kathode staat op een negatieve hoogspanning en de anode op aarde. Beide systemen hebben hun voor- en nadelen.

Wat ook een zeer belangrijk punt is, is het tijdsoplossendvermogen van de fotobuis, d.w.z. de tijd die verstrijkt tussen de aankomst van een foton en de afgifte van de anodepuls. Deze tijd kan variëren omdat de elektronen uit de dynodes tijd nodig hebben om zich door de buis te verplaatsen naar de anode. Afhankelijk van de weg die de elektronen afleggen, zal de tijd variëren. Voor de detectie van tijden met scintillatietellers wil men deze spreiding zo klein mogelijk hebben. Het komt er nu op aan om de fotobuis geometrisch zorgvuldig te bouwen. Dit kan betekenen dat men het inwendige van de fotobuis ook tegen het aard magnetveld moet afschermen. Men doet dit meestal met een cilinder van mu-metaal.

Zelfs in een geheel verduisterde ruimte zal de fotobuis nog steeds een elektronpuls meten.

We noemen dat de donkerstroom van de fotobuis. Deze wordt o.a. veroorzaakt door het vrijkomen van elektronen uit de kathode via thermische emissie of door ruis in de uitleeselektronica.



Figuur 5. Versterking van een fotobuis

3. Referenties

Op de webpagina (<http://www.hisparc.nl>) van het HiSparc-project kun je nuttige links vinden. Het HiSparc-project is een project waarin middelbare scholieren een muondetector bouwen en m.b.v. deze detectoren metingen verrichten aan 'muon showers' in de atmosfeer.

Op <http://www.interactions.org> vind je informatie uit de wereld van de Astrodeeltjes en Deeltjesfysica.

DE MUONPARADOX

Vragen en opdrachten voordat je gaat meten als leidraad voor het vervolg van dit practicum.

- Een muon vervalt na enige tijd in andere deeltjes. De gemiddelde levensduur van een muon is ongeveer 2×10^{-6} s. Muonen zien kans om in die korte tijd vanaf grote hoogte op Aarde aan te komen. Welke snelheden zou je 'Newtoniaans' dus verwachten voor deze muonen?
- Hoe kun je de levensduur van muonen meten? Geef de relevante formule(s).
- Waarom speelt de looptijd van licht door het scintillatormateriaal geen rol bij het meten van de levensduur?
- Maak een schematische opstelling voor een snelheidsmeting, waarbij je scintillatiemateriaal en een of meer fotobuizen gebruikt voor het detecteren van een muon dat door je detector gaat.
- Welke informatie heb je nodig om een snelheidsmeting te kunnen doen. En hoe nauwkeurig zou je waarneming minimaal (orde van grootte) moeten zijn om de verwachte snelheid van de muonen te kunnen meten.
- De muonen, die in je detector terecht komen, kunnen van alle kanten komen. Leg uit dat je niet direct de snelheid kunt meten, maar 'slechts' een distributie. Kun je een voorspelling doen over de distributie van de snelheden? (met distributie wordt bedoeld: het histogram met op de horizontale as de snelheidsintervallen en op de verticale as staat hoe vaak een bepaald snelheidsinterval voorkomt.
Voorbeeld I: als je altijd precies dezelfde snelheid zou meten, dan zou het histogram een scherpe piek vertonen voor het bijbehorende interval.
Voorbeeld II: als je alle mogelijke snelheden willekeurig zou meten, dan zou het histogram voor ieder interval even hoog zijn.)
- Wat zou je verwachten voor de hoekverdeling van de muonen: komen er evenveel muonen per tijdeenheid uit verticale richting als uit (vrijwel) horizontale richting?
- Als de puls aan het einde van de fotobuis komt, moeten we gewoonlijk de pulsen via kabels naar de uitleeselektronica vervoeren. Hoe snel zou zo'n puls zich in een koperdraadje voortplanten?
- Bedenk welke effecten de meting van de tijd waarop een muon je detector passeert, zouden kunnen beïnvloeden. Denk ook aan de lichtlooptijd door de scintillator.
- Er komen veel muonen per tijdeenheid terecht in je detector, soms tegelijk. Bedenk wat de kans is dat twee opvolgende muonen worden geïnterpreteerd als een muonverval. (doe dit apart voor de levensduurmeting en voor de snelheidsmeting)
- De hoeveelheid straling die gemeten wordt neemt toe naarmate je verder van het aardoppervlak afkomt, maar neemt op zeer grote hoogte weer af. Wat zou hiervan de verklaring kunnen zijn.

- Hoe snel (uitgedrukt in de lichtsnelheid c) moeten muonen vliegen als ze op 10km hoogte worden gemaakt en ongeveer 2 microseconde leven? Is dit een probleem?

Opbouw en instelling van de opstelling

Gebruik de figuur (zie elders in dit document) van de opstelling als leidraad. Gebruik naast de volgende aanwijzingen vooral je gezonde verstand!

Opbouw

Sluit de detectoren aan met de bijgeleverde kabels, twee per detector. Je kunt je niet vergissen van de kabel voor de PMT-instelling heeft een zes-polig plug en de signaalkabel is een gewone coaxkabel met BNC-connector.

PC software/hardware

Het MuonlabII kaste is via een USB kabel met de PC verbonden. De software staat doorgaans op de D schijf in directory "MuonlabII_xxxx", waarbij je "xxx=jaartal" en dat kies je dus recent. Daarna klik je op het MuonlabII programma dat een μ als icoon heeft.

Als je het programma hebt opgestart, dien je eerst de communicatie poort in te stellen (links bovenaan). De juiste poort vind je door in windows te zoeken naar de 'port' instellingen; iets als: Start->ControlPanel->System->Hardware->Advanced->Devices->Ports en dan aflezen waar de USB-serial poort op aangeloten is. Dan terug naar je MuonlabII programma en de juiste poort selecteren.

MuonLabII Software

Het menu aan de linkerkant spreekt verder bijna voor zich, bekijk dat maar eens van boven naar beneden. De instelling van de PMTs is daar ook te vinden, kies maar. Je kunt nu voor beide PMT een threshold instellen (om de ruis weg te filteren) en een hoogspanning. Kies een threshold van 0.02V en als hoogspanning 750V voor beide detectoren. Ga niet hoger dan nodig en nooit hoger dan 850V.

Instelling

Het is zonder ervaring een hele uitdaging om de juiste instelling voor de PMTs te vinden. Wees er ten eerste van bewust dat hoe hoger je de HV instelt, hoe meer ruis je krijgt. Echter, als je de HV te laag instelt is de detector niet efficiënt. Voor de treshold geldt het omgekeerde. Hoe dan ook, per meter scintillator verwacht je grofweg tien (vijf tot vijftien) echte muonen per seconde. (De ruis kan oplopen tot wel 1000Hz, maar dat is niet waarschijnlijk.). Kies de optie 'Delta Time' in het menu (linksboven) – het programma verwerkt nu pulsen van beide detectoren en meet het tijdverschil van aankomst.

1a) Met scoop

(Status: software op 'Delta time' en detectoren op elkaar.) Sluit de signaal kabel van PMT1 aan op de scoop en zorg ervoor dat de scoop ingang op 50Ohm staat. (Verder grofweg: time-base: ~200ns, Volt=~50mV, Trigger=negatieve edge op ~-10mV). Zie je mooie pulsen van typisch (enkele) honderden mV? Zo nee, dan staat je HV nog iets te laag. Bekijk/Vergroot op de scoop vervolgens naar het gebied vlak na de muonpuls, daar zie na-pulsen. Hoe groot zijn die typisch? Stel je treshold op 2x deze grootte in

(~20mV waarschijnlijk). Ga verder met Ib als controle (als het goed is hoeft de instelling niet veranderen).

Ib) (alternatief voor Ia, zonder scoop)

(Status: software op 'Delta time' en detectoren op elkaar.) Als alles goed is aangeloten op het MuonlabII kastje zie je af en toe de gele lampjes 'hit' knipperen. Als beide PMTs iets meten gaat ook het middelste lampje 'data' aan. Stel de threshold in op ~20mV en kies de HV van de PMTs zodanig dat de hit-lampjes niet continue branden, maar nog net iets knipperen. Het data-lampje moet veel minder vaak knipperen, want die knippert alleen als beide detectoren 'iets zien'. Lukt dit niet? Kies een threshold van 40mV en probeer het opnieuw, enz. Lukt dit wel? Verlaag de threshold nu eens met ~10mV. Gebeurt er niet veel met de knipper-frequenties, laat de threshold dan maar wat lager staan.

II) HV scan

(Status: software op 'Delta time' en detectoren op elkaar.) Nu gaan we een HV scan doen. Verander de HV van slechts 1 PMT tegelijk. Begin bijvoorbeeld bij 500V en verhoog in stapjes van 50V tot 850V (niet te lang-als het kan: lager maximum gebruiken.). Meet voor iedere instelling de data-rate, dus de gelijktijdige registratie van twee detectoren per seconde. Hoe? Door de meting m.b.v. MuonlabII programma te starten en dan de counts in pakweg 30seconden te noteren. Schets een grafiek van de rate tegen de HV. Neem nog wat metingen in het gebied waar de rate veel verandert. Waarschijnlijk zie je een snelle stijging van de rate bij een bepaald HV gebied (de detector wordt hier efficient), daarna blijft de rate hoog en constant of langzaam stijgen als functie van de HV (door ruis). Een redelijke HV instelling is een waarde in het gebied waar de rate hoog is geworden en nog slechts langzaam stijgt. Stel de PMT op deze waarde in.

Volg dezelfde procedure voor de andere PMT. Denk na over wat je allemaal gedaan hebt; begrijp je iets niet: vraag het!

De Metingen

Snelheidsmeting:

- Hiervoor heb je twee detectoren nodig. Leg deze detectoren eerst op elkaar, stel de software correct in en zet ze aan. Als het goed is verkrijgt je Gauss distributie (normale verdeling) te zien. Dit is je nulmeting – schat de gemiddelde waarde (of analyseer de output file in excel).
- Leg de detectoren ook eens kruislings op elkaar en bepaal zo de looptijd van het scintillatie-licht door de scintillator. Save de plots af en toe!
- Plaats de detectoren nu zover mogelijk uit elkaar (hou de uitleeskant recht boven elkaar – ook als je detectoren verschillende lengte hebben).
- Verzamel meetgegevens (minimaal 100) en werk deze uit.

Uitwerking muon snelheid

- Bepaal met behulp van je 'nulmeting' de offset van de (verschil)tijdsmeting.
- Corrigeer je metingen met de offset.
- Verklaar kwalitatief de vorm van de distributie met extra aandacht voor het beginpunt, de middelste waarden en het eindpunt.
- Als het goed is, heb je de snelheid van muonen eerst berekend (zie boven) en kwam je op absurd hoge snelheden. Kun je deze belachelijke snelheden nu uitsluiten? (zo ja, dan is de proef geslaagd!).
- Wat is de typische verschiltijd; wat is dus de typische snelheid van je muonen?
- Wat is de Lorentzfactor?

Levensduur:

- Je hebt hiervoor maar 1 detector nodig.
- Na 5 minuten zul je pas ~10 metingen hebben, maar kun je al zien of er überhaupt iets redelijks uit de meting komt.
- Na een uur kun je beslissen of alles goed is ingesteld. Noteer de instelling, kabels, detector, HV en threshold enzovoort.
- Laat de levensduur meting lopen als je vanmiddag weggaat.

Uitwerking Levensduur:

- De distributie heeft een lange 'staart'. Waar komt die vandaan en hoe kun je hiervoor corrigeren.
- Het meetkastje (MuonLabII) heeft een dode tijd m.b.t. de levensduurmeting die als volgt is opgebouwd. Als een muon is gemeten, kan er binnen 125 ns niet een tweede puls worden geregistreerd. Pas na 250 ns wordt het kastje weer efficiënt.
- Als er veel ruis is geregistreerd, is dit vaak zichtbaar als een extra piek onder de, pakweg, 750 ns. Kijk goed naar de distributie en negeer zonnodig alle metingen onder de x ns.
- Probeer nu de exponentiële functie op de distributie te passen als functie van de levensduur. Bepaal de fout op de levensduur door de levensduur te variëren totdat de functie redelijkerwijs niet meer past.
- Wat moet de minimale Lorentzfactor of gammafactor zijn voor muonen om de aarde te bereiken? (Waarom is de gemeten Lorentzfactor kleiner)

Appendix I

Verwerken van gegevens in Excel. Als je dit goed wil doen moet je hierin wat tijd investeren en zelf een en ander uitzoeken. Hier enkele tips:

- inlezen ruwe data: import external data
- maken histogram: is add-in Histogram geïnstalleerd?
- maken histogram: maak eerst zelf een kolom met interval-waarden. Deze kolom moet je kiezen bij het maken van het histogram.

Appendix II

Accounts op de PC

We werken met guest accounts. Maak een directory onder je eigen naam op de D schijf. De assistent kan deze directory op verzoek kopiëren en via www zichtbaar maken. Account: student met password Stud3nt* (De computerafdeling disabled/verandert vaak accounts ivm security)

Appendix III (voor de liefhebbers)

Wat is de kans op zo'n primaire interactie?

We nemen aan dat de flux van kosmische deeltjes (aantal deeltjes dat per seconde door een oppervlak van 1 cm^2 gaat) gegeven wordt door F . De dichtheid van deeltjes in de atmosfeer wordt gegeven door ρ (g/cm^3). Dan is de waarschijnlijkheid dat er per seconde een interactie plaats vindt in een lengte L (cm) uiteraard evenredig met F , ρ en L volgens:

$$N_{\text{int}} = FL\rho \frac{N_A}{A} \sigma(pA \rightarrow X)$$

waarbij N_A het getal van Avogadro is en A het atomair gewicht van de kernen van de atmosfeer. De evenredigheidsconstante $\sigma(pA \rightarrow X)$ wordt de botsingsdoorsnede of werkzame doorsnede van de interactie genoemd, waarbij een proton op een atoomkern botst met als willekeurige eindtoestand X . Het heeft de dimensie van oppervlak. De werkzame doorsnede van een proton-proton interactie is ongeveer onafhankelijk van de energie van het inkomende deeltje en heeft de waarde $\sigma = 5 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2$. De proton-neutron werkzame doorsnede is gelijk aan de proton-proton werkzame doorsnede. Als we een kern beschouwen als een bol gevuld met protonen en neutronen zal de werkzame doorsnede van proton-kern interactie $\sigma_{pA} = A^{2/3} \sigma_{pp}$ zijn.

De interacties die in L per seconde plaatsvinden, zullen de flux doen afnemen. We schrijven dit als

$$\frac{dF}{dL} = -F(L)\rho \frac{N_A}{A} \sigma(pA \rightarrow X)$$

Deze differentiaalvergelijking heeft als oplossing:

$$F(L) = F(0)e^{-L/L_{\text{int}}}$$

waarbij de interactielengte $L_{\text{int}} = 1/(\rho \frac{N_A}{A} \sigma_{pA})$ is. Als we aannemen dat de atmosfeer uit N_2 bestaat en een ideaal gas is van 1 atmosfeer, dan is : $N_A \rho / A = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ samen met $\sigma_{pA} = A^{2/3} \sigma_{pp} = 2.8 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$ wordt $L_{\text{int}} = 1.27 \text{ km}$. Dus 60% van de inkomende deeltjes zullen in de eerste 1.2 km van onze atmosfeer een interactie aangaan.

QUICK START

Account: student met password Stud3nt* . Zet het domein op de lokale machine.

SNELHEIDMETING op SIEPEL (ivm nieuwe software)

LEVENSDUUR op VENKEL

Software: zoek de executable muonlabII.exe (symbool is een griekse mu) op de D schijf in de directory MuonlabII_2009 (als die er niet is, gewoon MuonlabII).

Opstarten en dan linker menu doorlopen:

Als je het programma hebt opgestart, dien je eerst de communicatie poort in te stellen (links bovenaan). De juiste poort vind je door in windows te zoeken naar de 'port' instellingen; iets als: Start->ControlPanel->System->Hardware->Advanced->Devices->Ports en dan aflezen waar de USB-serial poort op aangeloten is. Dan terug naar je MuonlabII programma en de juiste poort selecteren.

Het menu aan de linkerkant spreekt verder bijna voor zich, bekijk dat maar eens van boven naar beneden. De instelling van de PMTs is daar ook te vinden, kies maar. Je kunt nu voor beide PMT een threshold instellen (om de ruis weg te filteren) en een hoogspanning. Kies een threshold van 0.02V en als hoogspanning 750V voor beide detectoren. Ga niet hoger dan nodig en nooit hoger dan 850V. Op de scoop (50ohm trigger negatief op -0.02 ofzo) moet je pulsen zien van typisch 100mV en hoger.

Marcel Vreeswijk 020 592 5088