

Muonlevensduur

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Theorie	1
3	Verkennen opstelling	3
4	Onderzoeksvragen en werkplan	9
5	Metingen	10
6	Rapportage	10

1 Inleiding

De Aarde staat voortdurend bloot aan een bombardement van hoogenergetische deeltjes uit de ruimte. Dit verschijnsel noemen we kosmische straling. Die hoogenergetische straling uit het heelal bestaat uit gamma-fotonen, elektronen en atoomkernen. Ze botsen met hoge snelheid op stikstof- en zuurstofatomen hoog in de atmosfeer van de Aarde. Bij die botsingen ontstaan allerlei nieuwe deeltjes met namen als kaon of pion, die een soort neefjes en nichtjes van protonen of neutronen zijn. Deze botsen vervolgens weer met andere atomen waarbij opnieuw allerlei deeltjes worden gevormd enzovoort. De stortvloed aan deeltjes die bij deze kettingreactie ontstaat wordt een cosmic shower genoemd.

Een van de deeltjes in zo'n cosmic shower is het muon. Meestal bereiken alleen de muonen uit een cosmic shower het aardoppervlak. De andere deeltjes vervallen spontaan voordat ze het aardoppervlak bereiken of worden door de aardatmosfeer geabsorbeerd. In dit experiment ga je de gemiddelde levensduur bepalen van muonen.

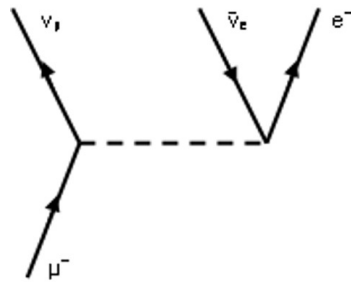
2 Theorie

Om je goed voor te bereiden op het experiment wordt eerst de theorie bestudeerd.

2.1 Muonen

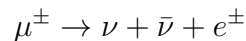
Een muon is een deeltje dat heel erg op een elektron lijkt. Net als het elektron is het een elementair deeltje, wat betekent dat het niet is opgebouwd uit andere, nog kleinere deeltjes. Het muon heeft wel een veel grotere massa dan het elektron: het is ruim 200 keer zo zwaar. Een ander verschil is dat het muon instabiel is.

Spontaan verval – De deeltjes waaruit de wereld om ons heen bestaat – protonen, neutronen en elektronen – zijn allemaal stabiele deeltjes. Dat betekent dat ze in principe eeuwig blijven bestaan. Er zijn ook deeltjes die vanzelf uit elkaar vallen: instabiele deeltjes.



Figuur 1: Een Feynmandiagram van het muon-verval.

Dit uit elkaar vallen noemen we spontaan verval. Zo vervalt het muon spontaan tot een elektron en twee neutrino's, superlichte deeltjes zonder lading. Dit kunnen we weergeven als reactie:

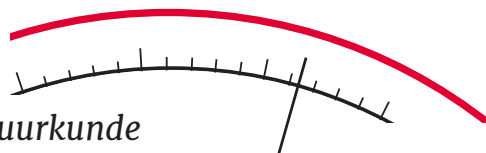


Hierin staat het symbool μ (de Griekse letter mu) voor het muon, het symbool e voor het elektron en het symbool ν (de Griekse letter nu) voor een neutrino. Het streepje op het ene neutrino geeft aan dat het een antideeltje is. Het muonverval is ook weer te geven in een diagram zoals dat van figuur 1.

Levensduur Het verval van muonen is een statistisch proces, net als het radioactief verval van instabiele atoomkernen. Dit betekent dat de kans op verval onafhankelijk is van hoe lang het muon al bestaat. Het is het best te vergelijken met het gooien van een dobbelsteen. De levensduur van zo'n dobbelsteen zou je kunnen definiëren als het aantal worpen tot je (voor de eerste keer) een zes gooit. De kans op het gooien van een zes met een dobbelsteen is $1/6$. Als je vijf keer een dobbelsteen gooit en steeds geen zes gooit, is de zesde keer de kans op een zes nog steeds $1/6$. Maar na tien keer gooien zonder een zes, is de elfde keer de kans op een zes ook nog steeds $1/6$. De kans op het gooien van een zes is dus onafhankelijk van hoe vaak je al gegooid hebt.

Deze 'levensduur' van een dobbelsteen lijkt dus niet op de levensduur bij mensen en dieren, waar de leeftijd natuurlijk wel degelijk van belang is. De kans dat iemand van 80 nog 40 jaar zal leven is niet zo groot. Dat een peuter nog minstens 40 jaar zal leven is wél behoorlijk waarschijnlijk. Bij muonen werkt levensduur heel anders – net als bij de dobbelsteen. Of een muon nu pas heel kort of al heel lang bestaat, de kans dat het daarna vervalt wordt daardoor niet kleiner of groter. Die kans blijft steeds gelijk. Een muon kan dus veel korter of langer dan gemiddeld bestaan.

De vraag is nu hoe we de gemiddelde levensduur van muonen kunnen definiëren en meten.



Opdracht 1: Dobbelsteenlevensduur

Voor het bepalen van de gemiddelde levensduur van muonen moet je de levensduur van een groot aantal muonen meten. Daarna zet je de meetresultaten uit in een histogram met horizontaal de levensduur (opgedeeld in een aantal tijdintervallen of 'bins') en verticaal het aantal muonen met een levensduur binnen elk tijdinterval. Je kunt je daar-bij misschien nog niet al te veel voorstellen. Daarom eerst een gedachten-experiment met dobbelstenen.

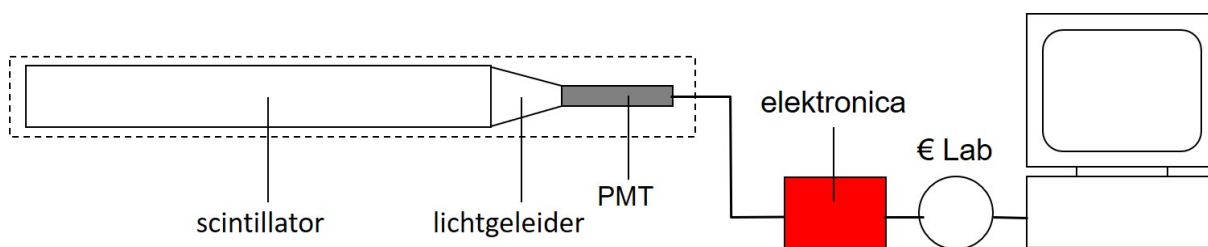
- Je gooit 100 dobbelstenen tegelijk (worp 1). Hoeveel zessen zullen er dan ruwweg liggen?
- Je haalt die zessen eruit (want die zijn nu 'vervallen') en je gooit de overblijvende dobbelstenen nogmaals (worp 2). Hoeveel zessen zullen er dan ruwweg liggen?
- Zet dit gedachtenexperiment voort tot en met worp 10. Teken een histogram met horizontaal het aantal worpen en verticaal het aantal dobbelstenen dat bij elke worp valt. Aanwijzing: bij worp 1 is dat het aantal zessen: de dobbelstenen met een levensduur van 1 worp.
- Hoe zou je nu met behulp van het histogram de gemiddelde levensduur van een dobbelsteen definiëren?

3 Verkennen opstelling

Je gaat nu aan de slag met de opstelling waarbij je eerst zal lezen over hoe de opstelling werkt en daarna een aantal proefmetingen zal uitvoeren. Op deze manier begrijp je goed hoe de opstelling werkt. Daarna ga je, op basis van deze kennis, het werkplan opstellen.

3.1 De opstelling

De meetopstelling bestaat uit een muondetector en een kastje met elektronica waarmee de detector op een computer is aangesloten. Daarnaast beschik je over een bak met dobbelstenen. Die ga je gebruiken voor een simulatie van het muonverval en voor een verkenning van de manier waarop je de meetresultaten bij dit experiment gaat verwerken.



Figuur 2: Meetopstelling voor de bepaling van de gemiddelde levensduur van muonen.

Detector De detector bestaat uit drie delen: de scintillator, de lichtgeleider en de photo-multiplier-tube (afgekort: PMT). De scintillator is een stuk speciaal kunststof dat een lichtflitsje afgeeft als er een deeltje (bijvoorbeeld een muon) doorheen vliegt. Het muon geeft daarbij namelijk energie af aan de atomen van het scintillatormateriaal, waardoor

deze atomen in een aangeslagen toestand terecht komen en weer terugvallen naar de grondtoestand onder uitzending van fotonen. Dit licht gaat via de lichtgeleider naar de PMT. De PMT zet het invallende licht om in een elektrisch signaal: een spanningspuls. De hele detector is goed lichtdicht ingepakt met zwarte tape. Zo kan er geen licht van buiten in de PMT komen. Om de detector te beschermen is het geheel ook nog in een aluminium koker geplaatst.

Opdracht 2: Muondetectie

De muondetector (scintillator, lichtgeleider en PMT) is niet te zien, laat staan wat er in die detector gebeurt als er een muon doorheen vliegt. De detectie van een muon door de detector is wél te zien in de vorm van een animatie.

1. Ga naar de animatie Muondetectie (via de link op de experimentpagina Muonlevens-duur). Controleer of je begrijpt wat er in de animatie te zien is.
2. Leg uit hoe het komt dat (vrijwel) alle deeltjes die we met de detector waarnemen muonen zijn, en niet bijvoorbeeld protonen of neutronen.

De scintillator wordt ook gebruikt om muonen in te vangen. Alle muonen worden een beetje afgeremd door het materiaal, maar een klein deel van de muonen heeft zo weinig energie dat ze volledig worden afgeremd en tot stilstand komen binnen de detector. Dit zijn de muonen waarmee we de muonlevensduur kunnen bepalen.

Opdracht 3: Muonverval

Ook het verval van een muon in de detector en het meten van zijn levensduur is alleen te zien in de vorm van een animatie.

1. Ga naar de animatie Muonverval (via de link op de experimentpagina Muonlevens-duur). Leg uit wat er gebeurt als een muon dat de detector binnenkomt in de detector tot stilstand komt. Aanwijzing: kijk ook naar de weergave van het muonverval in figuur 1.
2. Bedenk hoe het komt dat het elektron dat ontstaat bij het verval van een muon een hoge energie heeft – en daardoor ook een lichtflitsje in de scintillator veroorzaakt. Aanwijzing: denk aan de massa's van muonen, elektronen en neutrino's en aan de formule $E = mc^2$ voor de equivalentie

Uiteindelijk veroorzaakt een muon dat binnen de detector vervalt twee lichtflitsjes in de scintillator: één van het muon dat binnenkomt en één van het elektron dat wegschiet bij het verval van het muon. De tijd tussen die lichtflitsjes is de tijd dat het muon in de detector heeft bestaan.

Elektronica Het signaal van de PMT gaat via een coax-kabel naar het kastje met elektronica dat voor de verwerking zorgt. Als er een spanningspuls uit de PMT komt – dus: als een muon de detector passeert of daarin tot stilstand komt – begint een soort klok in de elektronica de tijd te meten. Als binnen $50 \mu s$ nog een spanningspuls uit de PMT komt – dus: als een in de detector tot stilstand gekomen muon vervalt – geeft de elektronica de tijd tussen de twee spanningspulsen door aan de computer. Komt er binnen die $50 \mu s$ geen tweede spanningspuls, dan wordt de klok weer op nul gezet en begint het wachten

op de volgende spanningspuls.

De gemeten tijdsduur tussen twee spanningspulsen (als die binnen $50 \mu\text{s}$ na elkaar binnenkomen) is de levensduur van het muon binnen de detector. Deze levensduur wordt in de computer opgeslagen. Die gebruikt daarvoor het programma Coach. Dat programma wordt ook gebruikt voor het verwerken van de meetresultaten tot een histogram waaruit met een functie-fit de gemiddelde muonlevensduur te bepalen is.

3.2 Proefmeting

In dit experiment bepaal je de gemiddelde levensduur van muonen. Het verval van muonen is een statistisch proces. Om daarin enige regelmaat te ontdekken, is een meting van de levensduur van een groot aantal muonen nodig. Om voldoende meetresultaten te verzamelen, start je de meting direct bij het begin van de uitvoering van het experiment. Doe dat volgens de instructie in het kader hieronder.

Instructie voor het starten van de meting

- Open het programma Coach_muonendetectie.
- Start de meting door in de menubalk op de groene knop met de pijl te drukken. Je ziet nu in het scherm Clock-1 meetdata verschijnen. Controleer dat de meetopstelling ruwweg 1 muonverval per minuut detecteert.

Voordat je nu in het volgende onderdeel bij opdracht ?? je werkplan kunt uitvoeren, is eerst een verkenning van de meetmethode nodig. Bij opdracht ?? doe je een dobbelsteenexperiment als simulatie van het muonverval. Bij opdracht ?? ga je na hoe je de meetresultaten van die simulatie verwerkt met Coach. In de tussentijd gaat de detector rustig door met het verzamelen van meetresultaten.

Opdracht 4: Dobbelsteenexperiment

Dit dobbelsteenexperiment is een simulatie van het muonverval. Voer het experiment op de volgende manier uit:

- Gooi alle beschikbare dobbelstenen tegelijk, haal alle zessen er uit en noteer dit aantal. Herhaal dit een aantal keren, steeds met het overgebleven aantal dobbelstenen.
- Voor het simuleren van een statistisch proces als het dobbelsteenverval is het aantal beschikbare dobbelstenen aan de lage kant. Voer het experiment dus nog een- of twee-maal uit, en tel de meetresultaten (het aantal verwijderde zessen) per worp bij elkaar op. Je hebt dan het experiment uitgevoerd met twee- of driemaal zoveel dobbelstenen.
- Verwerk je meetresultaten in een histogram. Vergelijk dit histogram met dat van het gedachtenexperiment van opdracht 1.
- Beschrijf de overeenkomsten en de verschillen tussen het dobbelsteenexperiment en het muonexperiment. Leg onder andere uit waarmee we één keer gooien met de dobbelstenen kunnen vergelijken in het muonexperiment.
- In het muonexperiment wordt een groot aantal keren de levensduur van één muon gemeten. Hoe zou je het dobbelsteenexperiment moeten uitvoeren om ook dat te simuleren?

Opdracht 5: Dobbelsteenlevensduur

Je gaat nu de data van het dobbelsteenexperiment met Coach verwerken en de dobbelsteenlevensduur bepalen. Het verwerken van de data van de nog lopende meting door de muondetector gaat later op een vergelijkbare – maar wel net iets andere – manier.

- **Histogram**

Voer de meetresultaten van het dobbelsteenexperiment in Coach in, en laat dit programma de meetresultaten weergeven in de vorm van een histogram. Doe dat volgens de instructie in het kader hieronder.

- **Levensduur**

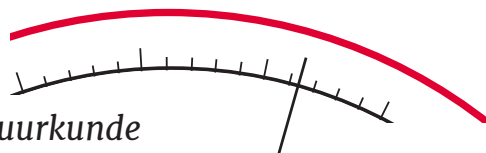
Om nu de dobbelsteenlevensduur met Coach te kunnen bepalen, moet de lopende meting van de muondetector worden gestopt. Controleer eerst of de detector inmiddels voldoende vervallende muonen heeft gedetecteerd (minstens 60). Zo nee, wacht dan tot het zover is. Zo ja, stop de meting door bovenaan op het stopbordje te klikken. Bepaal met Coach de functie $f(x) = ae^{bx} + c$ die het best bij de data van het dobbelsteenexperiment past. Doe dat volgens de instructie in het kader hieronder. Bereken daarna met de gevonden waarde van de coëfficiënt b de dobbelsteenlevensduur τ (de Griekse letter tau). Gebruik het onderdeel Achtergrondinformatie bij dit experiment om te laten zien dat de levensduur τ gegeven wordt door $\tau = -1/b$.

Instructie dobbelsteenhistogram

- Onderaan het beeldscherm zie je een plaatje van het € Lab. Dit plaatje hebben we niet nodig, dus klik dit plaatje weg door op de knop x te klikken. Je hebt nu vier schermen.
- Klik op de knop v van het lege scherm linksonder en kies in het menu voor tabel plaatsen. Klik dan in het venster op nieuw. In het nieuwe venster vul je bij naam 'doppelsteenexperiment' in en vervolgens voor kolom C1 en C2 het volgende:

	C1	C2
Verbinding	handinvoer	Handinvoer
Grootheid	worpnummer	aantal zessen
Eenheid		
Decimalen	0	0

- Klik op OK. Je komt terug in het scherm kies een tabel. Klik de nieuw gemaakte tabel dobbelsteenexperiment aan en klik op OK.
- Voer vervolgens de meetresultaten van het dobbelsteenexperiment handmatig in. Opmerking: Het maximaal in te vullen aantal data is gelijk aan het aantal muonmetingen in het scherm Clock-1. Als je dus rijen tekort komt, zul je even moeten wachten tot er meer vervallende muonen gemeten zijn.
- Heb je alle data van het dobbelsteenexperiment ingevoerd? Klik dan op de knop v van het scherm met de tabel van het dobbelsteenexperiment en kies in het menu voor diagram tonen. De muiswijzer wordt nu een klein grafiekje. Klik hiermee in het lege scherm rechts-onder, waardoor de grafiek van het dobbelsteenexperiment in dat scherm wordt geplaatst. Klik dan op de knop v van het scherm met de grafiek van het dobbelsteenexperiment en kies in het menu voor weergave. Klik in het verschijnende venster bij lijnsoort voor verticale lijn en bevestig met OK. Je hebt nu in het scherm rechtsonder een histogram van de meetresultaten van het dobbelsteenexperiment, maar dat ziet er wat betreft de schaalverdeling nog niet zo mooi uit. Dit passen we later aan.

**Instructie dobbelsteenlevensduur**

Klik op de knop v van het histogram van het dobbelsteenexperiment. Kies nu eerst in het menu voor automatisch zoomen. Het histogram ziet er nu wat betreft de schaalverdeling beter uit. Klik weer op de knop v van het histogram en kies in het menu voor analyse/verwerking en vervolgens functie-fit. In het verschijnende scherm vul je nu het volgende in:

		Opmerkingen
Kolom	aantal zessen	
Functietype	$f(x) = ae^{bx} + c$	zessen
Coefficiënten	vul bij de derde '0' in en vink het hokje aan	Hiermee geef je aan dat er geen achtergrond A is: $c=0$

Klik op verfijnen en je ziet de gefitte functie verschijnen. Noteer de waarde van de gevonden coëfficiënt b. Sla de resultaten van de verwerking van het dobbelsteenexperiment met printscreen op in bijvoorbeeld een Word-document.

4 Onderzoeksvragen en werkplan

Na de theoretische voorbereiding en het verkennen van de opstelling kun je nu de onderzoeksvraag en een werkplan op te stellen.

Opdracht 6: Onderzoeksvragen

Formuleer de onderzoeksvraag die je met deze opstelling wilt beantwoorden. Gebruik hiervoor de kennis die je hebt opgedaan in de voorbereiding. Je moet de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden met deze opstelling. Stel voor de onderzoeksvraag een hypothese op. De hypothese is wat je verwacht dat het antwoord zal zijn op de onderzoeksvraag.

Opdracht 7: Werkplan

Stel nu het werkplan op waarin in ieder geval de volgende punten behandeld worden:

- De onderzoeksvraag en hypothese.
- De grootheden die gevarieerd worden.
- De grootheden die gemeten worden en hoe deze metingen gedaan worden.
- Het aantal metingen.
- Hoe de data weergegeven wordt.

Laat het werkplan controleren voordat je verder gaat.

5 Metingen

Nadat je de voorbereiding hebt uitgevoerd en het werkplan is goedgekeurd door de docent of assistent, kan je het experiment gaan uitvoeren.

Opdracht 8: Metingen

Zoek met behulp van de meetopstelling volgens je werkplan een antwoord op de onderzoeksvraag en controleer de opgestelde hypothese.

Muonlevensduur

Om de resultaten van het dobbelsteenexperiment te kunnen verwerken met Coach is de meting van de muondetector inmiddels al gestopt.

- Bepaal – net als bij het dobbelsteenexperiment – met een functie-fit aan een histogram van de door de detector verzamelde data de muonlevensduur τ . Gebruik daarvoor de instructie in het onderdeel Meetopstelling bij dit experiment.
- De detector heeft slechts gedurende een beperkte tijd data kunnen verzamelen. Die tijd is waarschijnlijk niet voldoende geweest voor een betrouwbaar resultaat. Vanwege het statistisch karakter van het muonverval is een groot aantal data nodig, terwijl de detector niet meer dan ruwweg één vervallend muon per minuut detecteert. Dat levert binnen de beschikbare meettijd een databestand met zo'n 100 metingen. Hoe betrouwbaar de daaruit bepaalde muonlevensduur is, kun je beoordelen door deze ook te bepalen uit een groter databestand met het resultaat van 4000 metingen. Gebruik daarvoor de instructie in het onderdeel Meetopstelling bij dit experiment.

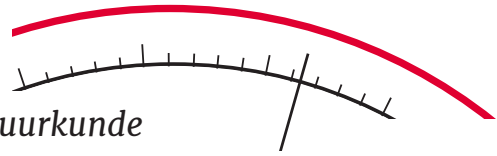
Meetbestanden opslaan

Het programma Coach_muonendetectie biedt de mogelijkheid om meetbestanden op te slaan. Maar omdat de school dit programma niet heeft, kun je met zo'n meetbestand verder niets meer doen. Sla de gemaakte schermbeelden dus via printscreen en plakken op in bijvoorbeeld een Word-document.

6 Rapportage

Afhankelijk van wat je docent van je verwacht rapporteer je met een schriftelijk verslag of een presentatie over het onderzoek. Zorg ervoor dat in dit verslag of deze presentatie de volgende onderdelen duidelijk naar voren komen:

- De onderzoeksvraag en hypothese.
- Een beschrijving en een uitleg van de werking van de meetopstelling.
- Grafische weergave van de meetresultaten.
- Verwerking en interpretatie van de meetresultaten.



- Het antwoord op de onderzoeksvraag verkregen door de meetresultaten.