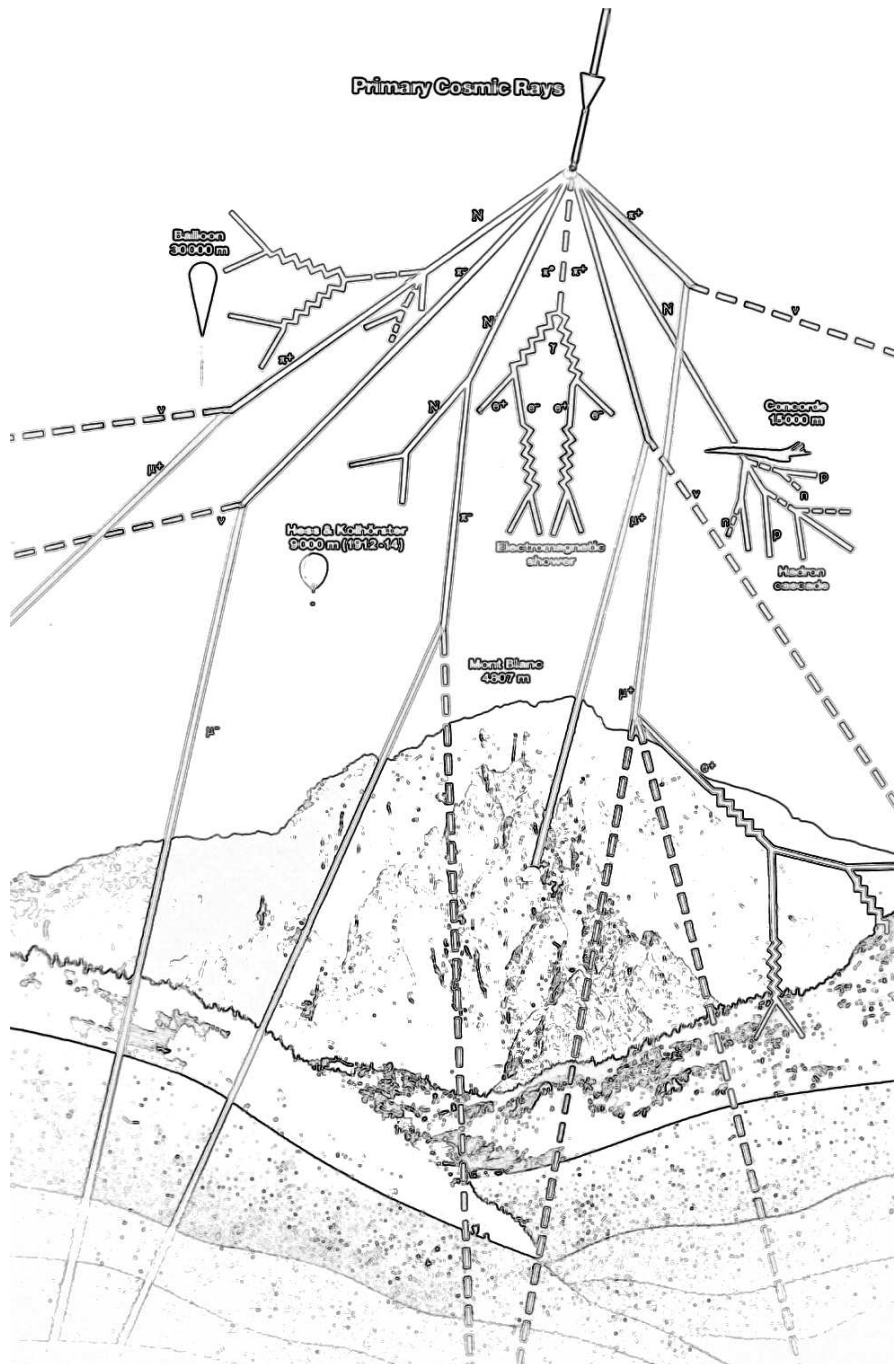


Muonen!



Colofon

Het muon levensduurexperiment is ontwikkeld aan het NIKHEF te Amsterdam onder leiding van prof. dr. Frank Linde. Ook de detectoren en elektronica zijn aan het NIKHEF ontworpen en gefabriceerd.

Vanuit het Project Moderne Natuurkunde (PMN, Universiteit Utrecht) zijn de bijbehorende lesmaterialen en HistoFit ontwikkeld door:

Michel Takes en Piet Molenaar, Amstel Instituut, UvA

David Fokkema, Kaj Munk College

Gerrit Kuik, Kaj Munk College/Vrije Universiteit

Het AMSTEL Instituut heeft een speciale Coach 6 versie beschikbaar gesteld voor experimentaansturing (met dank aan Marijn van Eupen).

Ed van den Berg (PMN, Universiteit Utrecht) en Cor de Beurs (Amstel Instituut, UvA) hebben het project logistiek ondersteund en begeleid.

Het muon levensduurexperiment is tot stand gekomen met financiële ondersteuning van de Stichting Weten.



Het muon levensduurexperiment kan uitgevoerd worden met behulp van de muondetectoren die bij verschillende scholen geleend kunnen worden. Scholen dienen alleen in het bezit te zijn van een PC en een CoachLab II of ULAB interface.

Inhoudsopgave

1	De ontdekking van kosmische straling	3
1.1	Geleiding in de buitenlucht	3
1.2	Buitenaardse bron	4
1.3	Twijfels en bevestiging	4
2	Standaardmodel	5
2.1	Deeltjesversnellers	5
2.2	De structuur der materie	6
3	Kosmische regen	6
4	Muonen	7
4.1	Spontaan verval	7
4.2	Levensduur van het muon	10
4.2.1	Kans op verval	10
4.2.2	Exponentiële verdeling	11
5	Detectie	12
6	Vragen	13

1 De ontdekking van kosmische straling¹

1.1 Geleiding in de buitenlucht

Al in 1785 was het Charles Augustin de Coulomb opgevallen dat een geladen voorwerp in de buitenlucht zijn lading verliest. Hij had daarvoor een elektroscop gebruikt waarop hij een lading had aangebracht. Op deze manier was duidelijk te zien hoe snel de lading wegglekte. Coulomb schreef dit toe aan het bestaan van vrije ionen in lucht.

Hoe deze ionen ontstaan is lange tijd een raadsel gebleven. Twee mogelijkheden werden onderzocht: ofwel was er sprake van spontane ionisatie, ofwel was er sprake van een vorm van ioniserende straling. Spontane ionisatie was nog nooit waargenomen, terwijl ioniserende straling al bekend was van radioactiviteit.

Om uitsluitsel te geven deden sir John Cunningham McLennan en Eli Franklin Burton in 1902 onderzoek aan de ontlading van elektroscopen opgesloten in vaten. Als de ionisatie van de lucht spontaan was, dan zou het materiaal van het vat geen verschil uitmaken. Was er sprake van straling, dan zou het materiaal van het vat wel degelijk verschil uitmaken. McLennan en Burton concludeerden dat de ionisatie van de lucht *niet* spontaan kon optreden en dat ‘de waargenomen effecten erop wijzen dat alle metalen, in verschillende mate, de bron zijn van een opmerkelijke doch zwakke *radioactieve straling*.’

Er is nog veel onderzoek gedaan naar het geleidingsvermogen van lucht opgesloten in vaten van verschillend materiaal en bij verschillende drukken en temperaturen.

¹Met dank aan Hans Leppink, *De ontdekking van de oorsprong van kosmische straling*, in het kader van het *HiSPARC*-project.

Wat nu echter nog niet bewezen was is waar de ioniserende straling in kwestie precies vandaan kwam. Het materiaal van de vaten was duidelijk van invloed, maar of de straling uit het vat zelf kwam of van daarbuiten was niet duidelijk.

Om dit te onderzoeken hebben Ernest Rutherford en H. Lester Cooke in 1903 de ontlading van elektroscopen gemeten in vaten van 1 L die werden afgeschermd met lood. Dit lood zou straling van externe bronnen tegen moeten houden. Ze vonden dat bij platen van 5 cm dikte de ontlading met 30% afnam. Met grotere dikte nam de ontlading niet verder af; blijkbaar was de rest van de ioniserende straling afkomstig uit de wanden van het vat zelf. Rutherford en Cooke concludeerden dat ongeveer 30% van de ioniserende straling afkomstig was van externe straling met een hoog doordringend vermogen.

1.2 Buitenaardse bron

De bron van de ioniserende straling was onzeker, maar verschillende wetenschappers hielden er al aan het begin van de 20^e eeuw rekening mee dat de straling van buiten de aarde zou kunnen komen.

In 1900-1901 deed Hermann Ebert onderzoek naar de ontladingssnelheid van elektroscopen op verschillende hoogten. Er zijn metingen verricht vanaf zeeniveau tot 3000 meter op bergtoppen. Ook maakte Ebert drie ballonvluchten tot 3770 meter hoogte. De ontladingssnelheid nam toe met de hoogte.

Beslissende experimenten zijn uitgevoerd door Hess en Kolhörster. Hess maakte in 1911-1912 een aantal ballonvluchten met een grootste bereikte hoogte van 5350 meter. Hij maakte nauwkeurige metingen van de ontladingssnelheid van elektroscopen op verschillende hoogten tijdens de vlucht. Daarbij kwam duidelijk naar voren dat de ontladingssnelheid, en dus de intensiteit van de ioniserende straling, toenam met de hoogte.

Kolhörster maakte in 1913-1914 vijf gevaarlijk hoge ballonvluchten met nauwkeuriger instrumenten. Hij was zo in staat om de metingen van Hess te bevestigen. Kolhörster bereikte met één van zijn vluchten een hoogte van 9300 meter en was dus ook in staat om de waarnemingen van Hess flink uit te breiden. Kolhörster vond dat de stralingsintensiteit 50 keer hoger was dan op zeeniveau.

De straling bleek veel doordringender te zijn dan alle tot dan toe bekende straling. Dat wil zeggen, alle bekende straling zou nooit het aardoppervlak hebben bereikt.

1.3 Twijfels en bevestiging

De Amerikaanse fysicus Robert Andrew Millikan vond de metingen van Hess en Kolhörster niet overtuigend. Hij voerde nog een reeks experimenten uit met behulp van onbemande ballonnen met zelfregistrerende apparatuur. Vier vluchten werden uitgevoerd in 1922 en twee van de ballonnen leverden goede metingen op. De ballonnen hadden hoogten bereikt van 11,2 en 15,5 km. De apparatuur was nauwkeuriger dan wat Hess en Kolhörster gebruikten. De metingen waren in strijd met de uit de eerdere metingen afgeleide Hess-Kolhörster-kromme, maar ook nu bleek dat de ontladingssnelheid toenam met de hoogte.

Millikan heeft daarna nog een uitgebreide reeks experimenten uitgevoerd. Beslissende experimenten werden uitgevoerd bij twee meren op grote hoogte: Muir Lake (3590 m) en Lake Arrowhead (1530 m). Millikan liet twee elektroscopen zakken in het water, dat veel ioniserende straling absorbeert. Hoe dieper de elektroscopen in het water hingen, hoe minder straling de elektroscopen kon bereiken.

naam	symbool	q	m
up	u	$+\frac{2}{3}$	$3 \text{ MeV}c^{-2}$
down	d	$-\frac{1}{3}$	$6 \text{ MeV}c^{-2}$
elektron	e	-1	$0,51 \text{ MeV}c^{-2}$
neutrino	ν	0	$< 10^{-5} \text{ MeV}c^{-2}$

Figuur 1: De vier bouwstenen van normale materie. Naast de naam en symbool zijn de lading q (in veelvoud van de elementaire lading e) en de massa m gegeven.

Het absorberende vermogen van water en lucht was al goed bekend. Bij vergelijking van de metingen bleek dat de gevonden stralingintensiteiten verschilden (zoals verwacht) en wel zo dat in Muir Lake de elektroscop bijna 2 meter lager moest hangen dan de elektroscop in Lake Arrowhead om dezelfde stralingsintensiteit te meten. Je zou dus kunnen zeggen dat de stralingsintensiteit bij Muir Lake ‘bijna 2 meter water hoger’ is dan de intensiteit bij Lake Arrowhead. De absorberende vermogens van lucht en water zijn zodanig dat je ook zou kunnen zeggen: ‘iets meer dan 2000 meter lucht hoger’, het hoogteverschil tussen de twee meren. Blijkbaar komt de straling inderdaad van boven; de meren liggen zo ver uit elkaar (480 km) dat als de straling niet van boven kwam de intensiteit nooit 2000 meter hoger zou kunnen zijn.

Hiermee was dan definitief bevestigd dat we spraken over straling van kosmische oorsprong. De vraag bleef nog waaruit kosmische straling nou precies bestaat.

2 Standaardmodel

Aan het begin van de vorige eeuw was de wereld veel eenvoudiger. Zo bestond alle materie om ons heen maar uit drie deeltjes: het proton, het neutron en het elektron. Samen vormden zij atomen waarvan er ook maar honderd verschillende waren. Deze atomen vormden weer moleculen en pas daar werd het complex: hiervan waren er vele, vele duizenden, zo niet miljoenen mogelijk. Maar de oorsprong van de complexiteit van het leven en de wereld om ons heen, bleek dus slechts in drie deeltjes te liggen. Het was te mooi om waar te zijn.

2.1 Deeltjesversnellers

In hun pogingen de structuur van de materie verder te doorgronden bouwden natuurkundigen steeds grotere machines om in de deeltjes te kunnen ‘kijken’. Zo hadden ze ontdekt waaruit atoomkernen bestaan (protonen en neutronen) en zo hoopten ze te ontdekken of het proton en het neutron ook nog ergens uit waren opgebouwd.

Deze machines versnelden deeltjes met steeds hogere energieën (snelheden) en lieten ze vervolgens op elkaar botsen. Wat bleek: het was mogelijk om protonen en neutronen in brokstukken uiteen te laten vallen, waarbij een hoop nieuwe deeltjes ontstonden.

Na lang speurwerk blijkt het volgende: normale materie bestaat uit drie verschillende deeltjes. Niet langer het proton en het neutron naast het elektron, maar nu het *up-quark* en het *down-quark* naast het elektron. Een proton bestaat uit twee up-quarks en één down-quark, het neutron uit twee down-quarks en één up-quark. Zie Fig. (1).

leptonen								
generatie			q	m			q	m
1 ^e	elektron	e	-1	0,51 MeV c^{-2}	$\sim$ neutrino	ν_e	0	$< 10^{-5}$ MeV c^{-2}
2 ^e	muon	μ	-1	106 MeV c^{-2}	$\sim$ neutrino	ν_μ	0	$< 0,25$ MeV c^{-2}
3 ^e	tauon	τ	-1	1784 MeV c^{-2}	$\sim$ neutrino	ν_τ	0	< 17 MeV c^{-2}

quarks								
generatie			q	m			q	m
1 ^e	up	u	$+\frac{2}{3}$	3 MeV c^{-2}	down	d	$-\frac{1}{3}$	6 MeV c^{-2}
2 ^e	charm	c	$+\frac{2}{3}$	1,2 GeV c^{-2}	strange	s	$-\frac{1}{3}$	100 MeV c^{-2}
3 ^e	top	t	$+\frac{2}{3}$	175 GeV c^{-2}	bottom	b	$-\frac{1}{3}$	4,2 GeV c^{-2}

Figuur 2: In deze figuur zijn alle twaalf bouwstenen van de materie opgenomen. Hier staat $\sim$ neutrino voor een elektron-, muon- of tauneutrino.

Het blijkt dat in versnellers (en ook in kernreacties) nog een deeltje voorkomt, het neutrino². Of beter: het elektron-neutrino. We hebben nu vier deeltjes, die een familie vormen: vader en moeder up- en down-quark, samen met de veel lichtere broertjes elektron en elektronneutrino.

2.2 De structuur der materie

Naarmate versnellers steeds krachtiger werden, ontdekten physici steeds meer deeltjes. Nu is het duidelijk dat er niet maar één familie is, maar wel drie! De volgende twee generaties blijken veelal dezelfde eigenschappen te hebben als de ons al bekende familie, maar ze zijn veel zwaarder. Al met al bestaat alle bekende materie uit de twaalf deeltjes in Fig. (2).

Het is nu bekend dat de twaalf deeltjes met elkaar kunnen reageren. Er zijn dus verschillende reacties waarbij een aantal van deze deeltjes verdwijnen of worden gecreëerd. Bij deze reacties kunnen ook deeltjes ontstaan die heel erg lijken op de twaalf bouwstenen, maar een omgekeerde lading hebben: *antimaterie*. Dat wil zeggen, naast het elektron e bestaat er ook een *anti-elektron* $\bar{e}$, ookwel *positron* genoemd, met precies dezelfde eigenschappen als het elektron, maar een *positieve* lading. Alle twaalf deeltjes hebben antideeltjes.

Alleen de deeltjes in de eerste generatie (Fig. (1)) zijn stabiel. Dat betekent dat deeltjes uit de andere generaties na verloop van tijd vervallen: ze vallen uiteen in brokstukken uit een lagere generatie. Dit gaat door totdat alleen stabiele deeltjes overblijven.

Deze theorie, over de twaalf deeltjes met hun antideeltjes en alle reacties die ze onderling kunnen hebben, staat bekend als het *standaardmodel*.

3 Kosmische regen

De aarde wordt continu gebombardeerd door kosmische straling. Deze ‘straling’ bestaat eigenlijk uit kleine deeltjes en niet uit straling, maar dat was eerst nog niet bekend. Deze

²Neutrino's zijn deeltjes zonder lading en ze hebben nauwelijks massa

deeltjes zijn kleiner dan atomen maar bevatten een geweldige hoeveelheid energie; veel deeltjes hebben meer dan 10 miljoen keer zo veel energie als deeltjes die geproduceerd kunnen worden in de beste deeltjesversnellers. Deze deeltjes bestaan allemaal weer uit de twaalf bouwstenen in Fig. (2) of hun antideeltjes.

Een deel van de deeltjes die de aarde treffen zijn afkomstig van de zon. Deze deeltjes hebben een lage energie en worden ingevangen in het aardmagnetisch veld. In het magnetische veld spiraliseren de deeltjes naar de noord- en de zuidpool waar ze de atmosfeer binnendringen. Hier zorgen ze voor een spectaculair verschijnsel wanneer de deeltjes in botsing komen met atomen in de ionosfeer: het poollicht.

Deeltjes met hogere energieën komen minder vaak voor. In het algemeen geldt: hoe hoger de energie, hoe minder deeltjes er zijn. Deze deeltjes trekken zich echter niet te veel aan van het magnetische veld van de aarde en dringen direct onze atmosfeer binnen.

Het meest energetische deeltje dat ooit is geobserveerd had een energie van $3,2 \times 10^{20}$ eV. Ter vergelijking, de LHC (Large Hadron Collider) die gebouwd wordt door CERN kan protonen versnellen tot een energie van 14×10^{12} eV, dus 20 miljoen keer minder. Het deeltje is geobserveerd op 15 oktober 1991 door de Fly's Eye detector in Utah, VS.

Wanneer een deeltje van deze energie de atmosfeer raakt blijft dit niet zonder gevolgen. Binnen zeer korte tijd komt het in botsing met een atmosferisch deeltje en beide worden in de botsing compleet vernietigd. De energie die bij de botsing vrijkomt wordt omgezet in een stroom van nieuwe deeltjes, die vervolgens weer met andere luchtmoleculen botsen enzovoorts. Er ontstaat een cascade van deeltjes, zie Fig. (3).

Er ontstaan veel *muonen*, deeltjes met dezelfde eigenschappen als het elektron, maar ongeveer 200 keer zo zwaar (Fig. (2)). Deze muonen trekken zich maar weinig aan van de atmosfeer en bereiken vrijwel onverstoorde het aardoppervlak (Fig. (4)).

4 Muonen

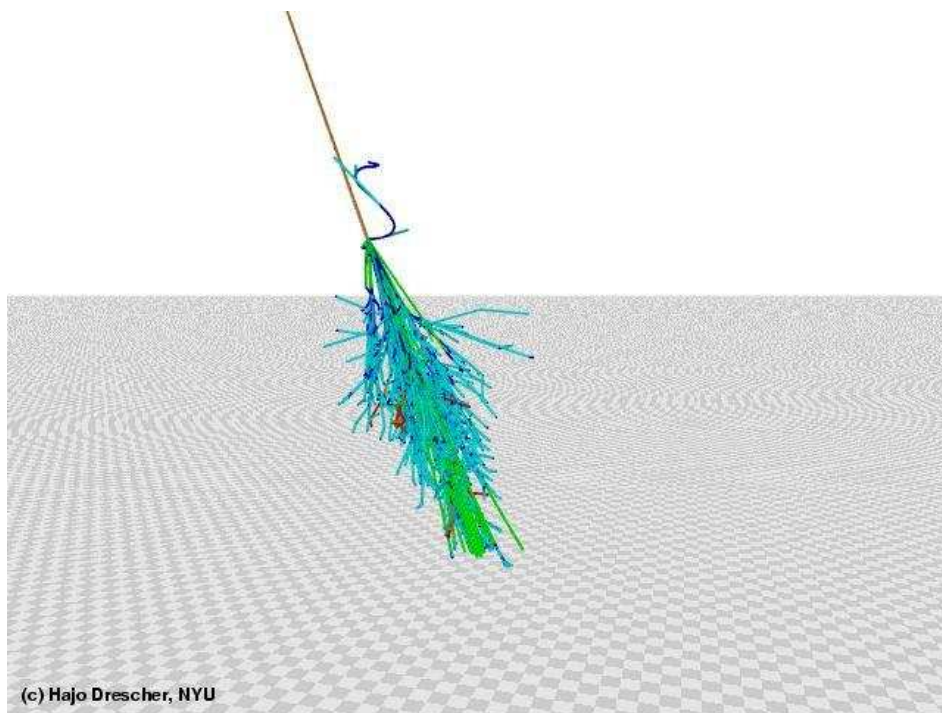
Muonen worden gecreëerd op een hoogte van ongeveer 60 km wanneer hoog-energetische kosmische deeltjes in botsing komen met onze atmosfeer. Bij deze botsingen ontstaan ontzettend veel nieuwe deeltjes. Deze deeltjes blijven maar kort bestaan. Door botsingen of *spontaan verval* vallen ze uiteen in andere deeltjes, die ook weer kunnen vervallen, enz. De ontelbare brokstukken vliegen met bijna de lichtsnelheid richting het aardoppervlak. Veel van de gecreëerde deeltjes worden tegengehouden door de atmosfeer, maar muonen bereiken het aardoppervlak. Veruit het grootste deel van de oorspronkelijke muonen zijn inmiddels spontaan vervallen.

4.1 Spontaan verval

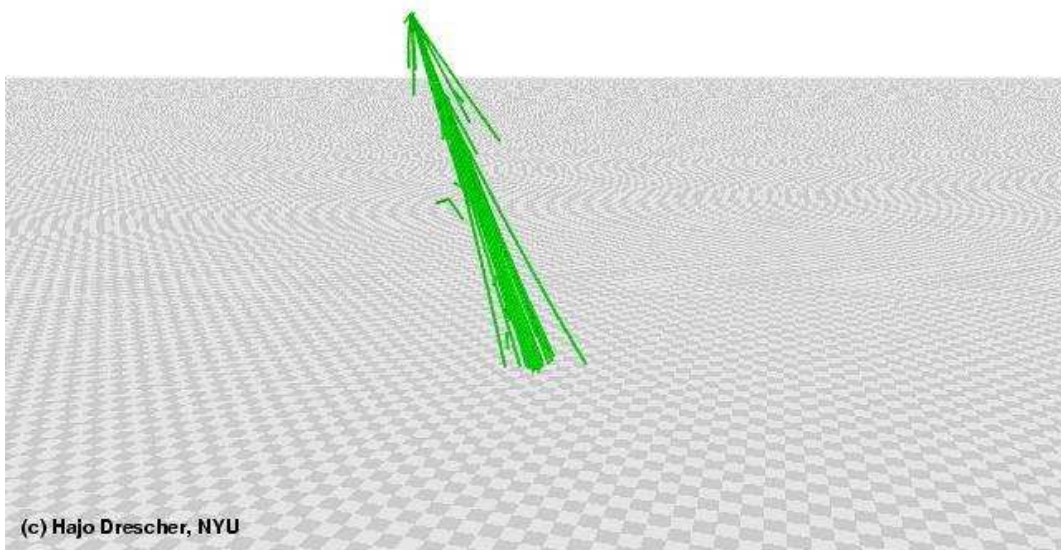
Deeltjes zoals het electron en de protonen en neutronen waaruit ons lichaam en de materie om ons heen is opgebouwd blijven (vrijwel) eeuwig bestaan. Dit geldt niet voor alle deeltjes. Veel (zware) deeltjes vervallen na enige (meestal zeer korte) tijd spontaan. Dat wil zeggen, ze houden op te bestaan en vallen uiteen in wat lichtere brokstukken. Het muon bijvoorbeeld valt uiteen in een elektron en twee neutrino's: een elektron-antineutrino en een muonneutrino. Je zou dit kunnen opschrijven als:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad (1)$$

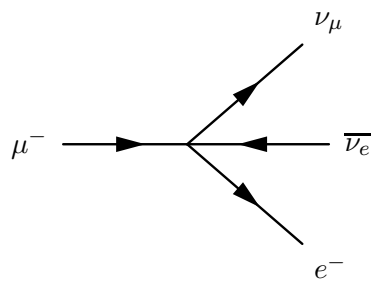
zie ook Fig. (5).



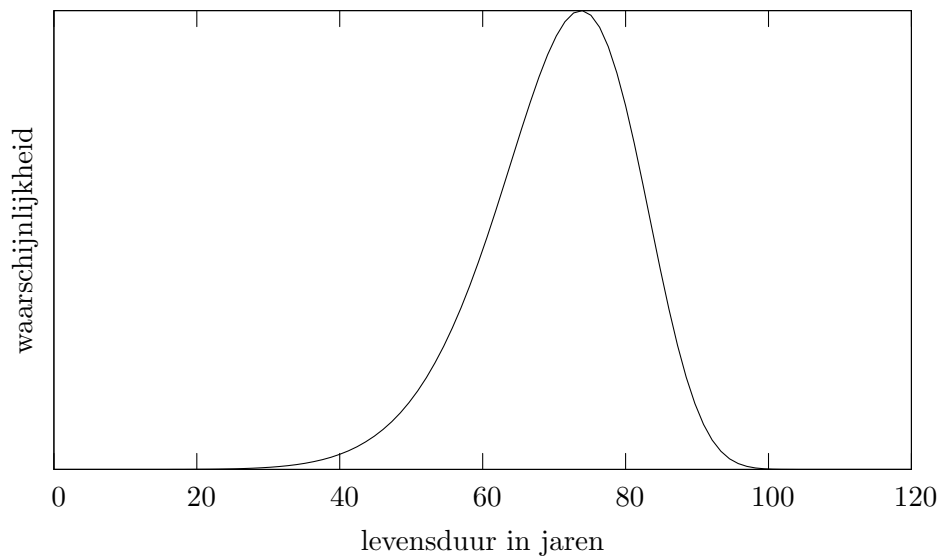
Figuur 3: Een simulatie van een *Cosmic Ray Air Shower*. Eén enkel proton (rood) komt van boven de atmosfeer binnen. Er ontstaan veel elektronen (blauw) die afgeremd worden en fotonen (cyaan) uitzenden, relatief weinig protonen en neutronen (rood) en een aardig aantal muonen (groen) die, verborgen in de wolk van nieuwe deeltjes, onverstoorbaar naar het aardoppervlak bewegen. Zij zijn ook (bijna) de enige deeltjes die het aardoppervlak bereiken. In deze figuur is maar één op de miljoen deeltjes die ontstaan getekend. Bron: *CASSIM*, H.-J. Drescher, Frankfurt Universität.



Figuur 4: Dit is dezelfde simulatie als de vorige figuur, maar nu zijn alléén de muonen zichtbaar. Duidelijk is te zien hoe ze onverstoord naar het aardoppervlak bewegen.



Figuur 5: Het verval van een muon μ^- in een elektron e^- , een anti-elektronneutrino $\bar{\nu}_e$ en een muonneutrino ν_μ . Het pijltje staat bij het anti-elektronneutrino de ‘verkeerde kant op’ omdat het hier gaat om een antideeltje.



Figuur 6: Schets van de levensduur van mensen. Het gemiddelde ligt rond de 75 jaar en de meeste mensen hebben een levensverwachting rondom dit gemiddelde. Sommige worden ouder, andere jonger.

Zwaardere deeltjes als het muon komen in de wereld om ons heen dus niet zo veel voor. Ze kunnen wel gecreëerd worden wanneer deeltjes met zeer hoge energieën op elkaar botsen. Dit gebeurt behalve in de bovenste lagen van de atmosfeer door kosmische straling ook in deeltjesversnellers op aarde.

4.2 Levensduur van het muon

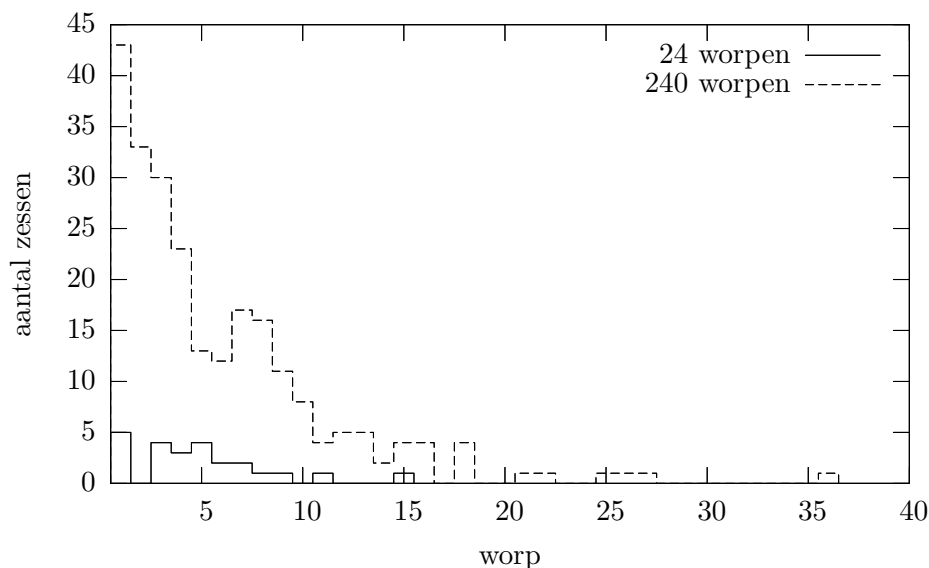
Het verval van een deeltje en de bijbehorende *levensduur* lijkt in niets op de dood van een mens met de bijbehorende levensduur. Van mensen is bekend dat als ze in een gezonde omgeving opgroeien ze gemiddeld zo'n 75 jaar worden. Dit betekent in ons geval dat de meeste mensen tussen de 55 en de 95 jaar oud worden (Fig. (6)). Relatief weinig mensen worden ouder of sterven jonger.

Voor muonen ligt dit anders. De meeste muonen sterven zeer jong, eigenlijk bijna meteen. Daar tegenover staat dat er ook muonen zijn die stokoud worden. Hoewel geen mens de 150 jaar haalt, het dubbele van de gemiddelde leeftijd, is dat voor muonen toch niet heel bijzonder. Er zijn zelfs muonen die 4 of 5 keer zo oud worden.

4.2.1 Kans op verval

De levensduur van een muon moet veel eerder vergeleken worden met een kansproces. Een muon heeft een bepaalde kans om te vervallen. Stel dat ik 24 dobbelstenen heb en ik werp ze op tafel. Elke dobbelsteen die op 6 komt haal ik van tafel af. Ik ga hiermee door totdat ik geen dobbelstenen meer over heb.

In het begin, als er veel dobbelstenen zijn, zal ik ook veel dobbelstenen van tafel halen, maar hoe minder dobbelstenen er over zijn, hoe minder zessen ik zal gooien. In Fig. (7) zijn



Figuur 7: Het aantal gegooide zessen uitgezet tegen het nummer van de worp

de gegevens uitgezet van een dobbelsteenexperiment. Duidelijk is te zien dat we met veel dobbelstenen moeten gooien voordat we duidelijk een verband hebben.

In plaats van met een hele hoop dobbelstenen in eens te gooien kan het ook anders. In het bovenstaande experiment wordt een dobbelsteen pas verwijderd wanneer er een zes wordt gegooid. Wordt er iets anders gegooid, dan zal de dobbelsteen nog een keer worden geworpen. Na een x aantal worpen wordt de steen verwijderd en telt hij mee bij het aantal gegooide zessen.

We kunnen dus ook met één dobbelsteen een experiment doen. We blijven de steen werpen totdat er zes is gegooid en schrijven dan het aantal worpen op. Aan het eind van het experiment tellen we hoeveel keer we na één worp al een zes hadden, hoeveel na twee keer, enz. Dit levert dezelfde resultaten als het vorige experiment.

Als we de vervaltijd van heel veel muonen meten, dan krijgen we net zo'n resultaat als bij het experiment met de dobbelstenen. We gaan er daarom ook van uit dat voor muonen het verval een puur kansproces is.

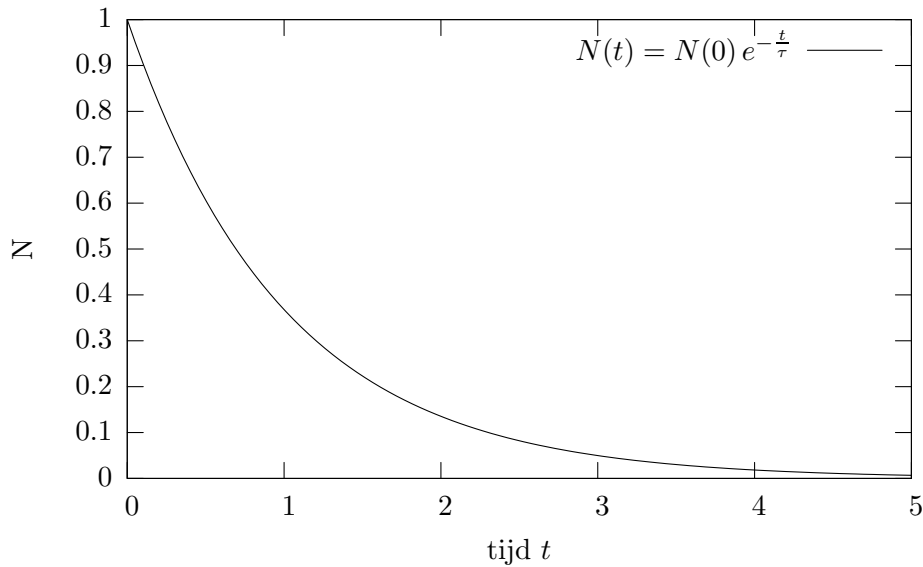
Juist omdat het verval van een muon een kansproces is hoeven we in onze metingen geen rekening te houden met hoe lang een muon al onderweg is voordat hij in onze detector belandt; de verdeling die we zullen zien is dezelfde. Immers, het maakt voor een dobbelsteen niet uit hoe vaak we al gegooid hebben; de kans op een zes blijft één zesde.

4.2.2 Exponentiële verdeling

Een kansproces zoals het werpen met dobbelstenen of het verval van een muon, voldoet aan de *exponentiële verdeling*. Deze wordt gegeven door

$$N(t) = N(0) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

met $N(t)$ het aantal gemeten deeltjes met een behaalde maximale leeftijd t en τ de levensduur van het muon. De levensduur is het gemiddelde van alle gemeten leeftijden.



Figuur 8: In deze figuur is de exponentiële functie Verg. (2) weergegeven, met parameters $N(0) = 1$ en $\tau = 1$.

5 Detectie

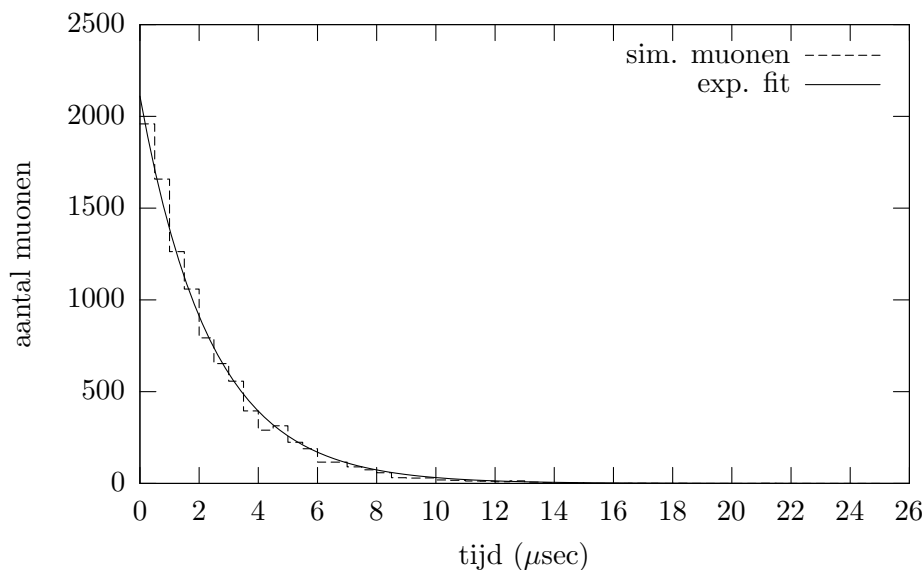
De muonendetector bestaat uit een lange plak doorzichtig materiaal. Wanneer deeltjes met grote snelheid door de detector vliegen, staan ze een beetje energie af aan het materiaal in de vorm van een lichtflitsje. Dit noemen we een *event*, ofwel een gebeurtenis. Aan één kant van de plak is een *optische geleider* bevestigd. Dit is ook een doorzichtig materiaal, wat het lichtflitsje naar een detector brengt. Deze detectoren moeten heel gevoelig zijn omdat het lichtflitsje zo zwak is. Daarom worden *photomultipliers* gebruikt. Deze versterken het lichtsignaal zodat het gemeten kan worden. Om ervoor te zorgen dat de detector alleen lichtflitsjes ziet die afkomstig zijn van deeltjes die door de detector heenvliegen wordt de detector verpakt in zwart plastic tape. Om de detector verder nog te beschermen tegen stoten e.d. zit hij in een aluminium behuizing.

Nu hebben we een detector die alle deeltjes meet die er doorheen vliegen. Maar hoe weten we welke deeltjes dat zijn? Wel, we weten dat alle ‘normale’ deeltjes niet door het aluminium en de tape heenkomen. Verder weten we dat alleen muonen genoeg *doordringend vermogen* hebben om vanaf 60 km hoogte het aardoppervlak te kunnen bereiken.³ Dit betekent dat *vrijwel alle* deeltjes die gemeten worden, muonen zijn.

Muonen die alleen door de detector heenvliegen zullen we wel meten, maar daar hebben we niets aan om de *levensduur* te bepalen. Daarvoor hebben we muonen nodig die in onze detector komen en zo langzaam gaan, dat ze ook in onze detector uiteen vallen.

We hebben al gezien in Verg. (1) dat muonen uiteenvallen in een elektron en twee neutrino’s. Aangezien neutrino’s nauwelijks massa hebben en een elektron ongeveer 200 keer zo weinig massa heeft als een muon, hebben de nieuw ontstane deeltjes heel veel energie.

³Dit is getest met zogenaamde *nevelkamers* en *bellenvaten* die in een magnetisch veld zijn geplaatst. Geladen deeltjes buigen af in een magnetisch veld en aan de straal van de cirkel kun je verschillende deeltjes herkennen.



Figuur 9: Simulatie van een muondetectie-experiment met 10000 muonen

Daardoor zal ook het elektron een lichtflitsje afgeven wanneer het door de detector vliegt. Met andere woorden: een muon dat vervalt in onze detector, geeft twee lichtflitsjes af: één wanneer het de detector binnenkomt en nog één wanneer het vervalt.

Aangezien de levensduur van een muon nogal kort is en de gemiddelde tijd tussen twee muonen die de detector inkomen vrij lang, kunnen we voor het gemak het volgende aanhouden: *wanneer er twee lichtflitsjes vlak na elkaar gemeten worden, dan was dat een muon dat binnen onze detector vervallen is*. De tijd tussen de twee lichtflitsjes was dan de tijd dat het muon in onze detector geleefd heeft.

6 Vragen

1. Leg uit hoe *vrije ionen in lucht* een elektroscop kunnen ontladen.
2. Leg uit wat bedoeld wordt met *ioniserende straling*.
3. Sir John Cunningham McLennan en Eli Franklin Burton hebben onderzoek gedaan naar de oorsprong van de mysterieuze ioniserende straling. Ze sloten hiertoe elektroscopen op in vaten.
 - (a) Leg uit hoe ze hebben kunnen uitsluiten dat de ionisatie van de lucht *spontaan* was.
 - (b) Hun uiteindelijke conclusie luidde: *alle metalen zijn, in verschillende mate, de bron van zwakke radioactieve straling*. Wat moeten de *resultaten* van hun onderzoek geweest zijn, als ze tot zo'n conclusie zijn gekomen?
 - (c) Geef een andere verklaring voor hun resultaten.
4. Geef een overzicht van de bekende deeltjes in de volgende drie perioden:

- vóór het versnellertijdperk
- tijdens de eerste jaren van het gebruik van versnellers
- heden

Geef aan of er in het standaardmodel een mooie symmetrie, of een ‘systeem’ zit, waardoor het model toch niet zo ingewikkeld is als het lijkt.

5. (a) Waarom, denk je, zou het kunnen dat een aantal wetenschappers zich nog lang verzet heeft tegen het standaardmodel?
(b) Kun je je eigenlijk wel verzetten tegen een theorie?
6. De aarde is een grote magneet. Je hebt waarschijnlijk met natuurkunde behandeld hoe het veld van een magneet eruit ziet. Ook weet je dan dat geladen deeltjes door de Lorentzkracht langs magnetische veldlijnen spiraliseren. Maak met deze gegevens een tekening van hoe het poollicht ontstaat en geef in je tekening óók een hoog-energetisch kosmisch deeltje aan dat de aarde treft.
7. Leg goed uit hoe het komt dat als we willen weten hoe lang muonen gemiddeld leven dat we alleen maar hoeven te meten hoe lang ze leven *in onze detector*, terwijl muonen op vele kilometers hoogte al worden geproduceerd.
8. Maak een schema waarin je uitlegt welke beslissingen de detectie-apparatuur neemt om te bepalen of een event wel of niet wordt doorgegeven aan de computer.