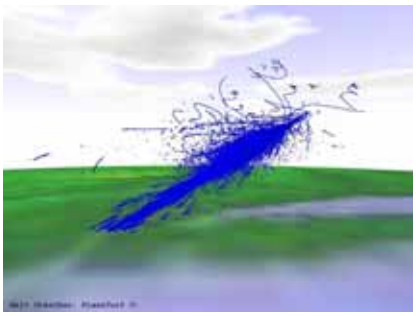
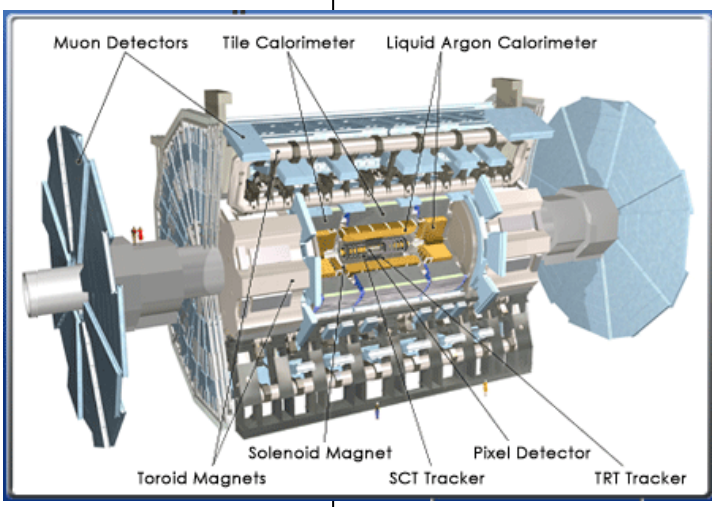
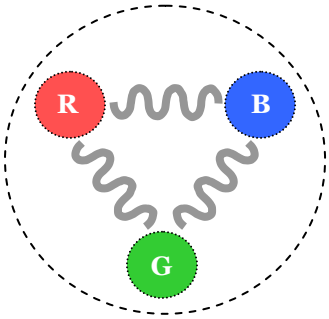
Deeltjes en hun interacties









VWO 5

DEELTJES EN HUN INTERACTIES

Over deze module

Dit lesmateriaal is geschreven in opdracht van het NIKHEF (Nederlands Instituut voor Kern- en Hoge Energie Fysica) te Amsterdam.

Met dank aan Jef Colle, Bob van Eijk, Frits Hidden, Jan Willem van Holten, Sijbrand de Jong, Ilka Tanczos, Marcel Vreeswijk en Gabby Zegers.

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde - Domein E "Straling en Materie" Subdomein E3: Kern- en deeltjesprocessen
Auteur	Frans van Liempt
M.m.v.	Hans van Bemmel
Vormgeving	Loran de Vries
NiNa Redactie	Harrie Eijkelhof, Koos Kortland, Guus Mulder, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust
Versie	mei 2010

Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2009

Alle rechten voorbehouden. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins al of niet commercieel hergebruik.

Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten,
- als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt, voor al of niet commercieel hergebruik, mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:
- schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, voor dit materiaal vertegenwoordigd door de Universiteit van Amsterdam (via info@nieuwenatuurkunde.nl),
- bij hergebruik of verspreiding dient de gebruiker de bron correct te vermelden, en de licentievoorwaarden van dit werk kenbaar te maken.

Voor zover wij gebruik maken van extern materiaal proberen wij toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen: info@nieuwenatuurkunde.nl

De module is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo, Universiteit van Amsterdam en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit het gebruik van deze module.

INHOUDSOPGAVE

1 De allerkleinste deeltjes 6

1.1 Kleine deeltjes, grote vragen 6

1.2 De ontdekking van nieuwe deeltjes in kosmische straling 9

1.3 Zonnewind en andere kosmische straling 10

1.4 Welke deeltjes zijn er? 13

2 Processen met deeltjes 22

2.1 Inleiding 22

2.2 Wat behoudswetten doen 23

2.3 Paarvorming in airshowers 25

2.4 Massa, energie en impuls 28

2.5 Nog meer behoudswetten 31

2.6 Kracht als uitwisseling van virtuele fotonen 33

2.7 Verdieping: De `kleurlading' van quarks 36

3 Extra: Standaardmodel 47

3.1 Wat is het standaardmodel? 47

3.2 Paarvorming volgens het standaardmodel 51

3.3 De zwakke kernkracht 54

4 Deeltjes gebruiken, maken en waarnemen 60

4.1 Kernreacties 60

4.2 Onderzoek naar elementaire deeltjes 64

4.3 Detectie 69

5 Diagnostische toets 80

GLOBALE OPBOUW VAN EEN PARAGRAAF

In het lesmateriaal is een aantal stijlen gebruikt. De *belangrijkste leerstof* is weergeven in *blauwe* tekstvakken. De betekenis van de andere kleuren en stijlen is hieronder aangegeven.

In de **paarse** tekstvakken staan **oriëntatie of reflectieopdrachten** De oriëntatieopdracht vormt een inleiding en de reflectieopdracht helpt je de zojuist behandelde stof nog eens te overzien.

In **groene** tekstvakken vind je **extra** uitleg die je niet per se nodig hebt om de opgaven te kunnen maken, maar wel een interessante aanvulling op de tekst is.


1 De allerkleinste deeltjes

Nieuwe deeltjes worden ontdekt in kosmische straling. Leptonen, quarks en fotonen.

Extra

Rekenvoorbeeld

Een goed voorbeeld doet goed volgen! In **blauwe** tekstvakken worden **voorbeelden** van berekeningen en redeneringen gegeven, zodat je ziet hoe je een opgave aan kunt pakken.

In het **blauwe** tekstvak "**Begrippen**" staan belangrijkste termen uit de tekst


Begrippen

Samenvatting

Opgaven

In het **blauwe** tekstvak **"Samenvatting"** staat de minimale kennis die je paraat moet hebben.

Opgaven staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf.

DEELTJES EN HUN INTERACTIES

Kosmische straling is bij toeval ontdekt. Aan het begin van de 20ste eeuw was het onderzoek aan straling gericht op de radioactiviteit van stoffen in de aardbodem. Daar bleek iets vreemds mee aan de hand. Hoog in de dampkring werd meer straling gemeten dan op de grond. Daardoor besefte men na verloop van tijd dat er straling uit de ruimte kwam. Sindsdien is kosmische straling een belangrijk onderwerp van onderzoek. In dit onderzoek ontdekte men verschillende nieuwe deeltjes. Deeltjes die in de begintijd van het heelal heel gewoon waren, maar die nu nog maar af en toe opduiken.

Hoofdstuk 1 van deze module gaat over de ontdekking van nieuwe deeltjes. In hoofdstuk 2 worden processen met deze allerkleinste bouwstenen van de materie besproken, de krachten die er op werken, hoe materie verandert of stabiel blijft. De theorie hierover is piepjong, sommige ontdekkingen zijn nog maar 20 jaar oud en er zijn nog grote raadsels op te lossen. Als hulpmiddel om beter met de begrippen uit hoofdstuk 2 te leren omgaan is het Big Bang kaartspel ontwikkeld. Voor elk van de drie natuurkrachten die in dit hoofdstuk worden behandeld, is er een apart spel. Hoofdstuk 3 is extra stof, waarin dieper wordt ingegaan op het standaardmodel, dat alle deeltjes en hun interacties beschrijft. Enkele toepassingen, experimenten en meetmethoden die men tegenwoordig gebruikt, worden behandeld in hoofdstuk 4.

Voorkennis

- Stoffen bestaan uit moleculen, moleculen bestaan uit atomen.
- Atomen bestaan uit een kern en elektronen.
- Kernen bestaan uit protonen en neutronen.
- Geladen deeltjes worden versneld door een elektrisch veld.
- Geladen deeltjes worden afgebogen door een magnetisch veld.
- Hoe hoger de snelheid van een deeltje, hoe hoger de kinetische energie van dat deeltje : $E_{\text{kin}} = 1/2\ m \cdot v^2$.
- Deeltjes hebben een impuls: $p = m \cdot v$.
- Licht bestaat uit energiepakketjes, deze heten *fotonen*.
- Deze fotonen hebben een energie $E = h \cdot f$ en impuls $p = h \cdot f / c$, met h de constante van Planck , f de frequentie van het licht en c de lichtsnelheid.

1 De allerkleinste deeltjes

Nieuwe deeltjes worden ontdekt in kosmische straling
Leptonen, quarks en fotonen

Hoofdstukvraag	**Welke allerkleinste deeltjes zijn er; hoe zijn ze ontdekt?**

1.1 Kleine deeltjes, grote vragen



Figuur 1.1

Sinds de oudheid vraagt de mens zich af waar alles uit bestaat. Een moderne leerling weet daar meer van dan zelfs de grootste geleerden tot 1850, omdat hij weet dat moleculen en atomen bestaan. In de afgelopen decennia zijn de bouwstenen van de atomen verder onderzocht. Er zijn nu deeltjes bekend die een miljoen keer zo klein zijn als atomen, of nog kleiner. Wat nog mooier is: er is ook veel bekend over de rol die elk deeltje speelt in het geheel, hoe alles samenhangt. De vragen die nog over zijn, zijn belangrijke uitdagingen voor de toekomst. In deze module staan geen praktijktoepassingen uit het dagelijks leven, want die zijn er bijna niet, maar nieuwe antwoorden op fundamentele vragen.

Oriëntatieopdracht: Welke deeltjes ken je?
Maak een overzichtje van alle deeltjes die je kent. Noteer ook wat je weet over de massa's en de ladingen.

Oriëntatieopdracht: Weet je al of het klopt?
Dit is het soort onderwerpen waar deze module over gaat. Noteer bij elk nummer: **waar/onwaar/geen idee**.

a. Jij bestaat voor het grootste deel van je massa uit quarks.
b. Een elektron uit de ruimte kan het aardoppervlak bereiken.
c. Met een magneetveld kun je protonen sneller laten bewegen.
d. Er bestaan zwaardere varianten van het elektron.
e. 's Nachts vliegen er weinig neutrino's door je heen omdat de aarde dan de neutrino's tegenhoudt die van de zon komen.
f. Alle allerkleinste, ondeelbare deeltjes hebben lading –e, 0 of e.
g. Veel zware deeltjes die bij de Big Bang ontstonden zijn nu verdwenen doordat ze uiteengevallen zijn in lichtere deeltjes.
h. Van elk geladen deeltje bestaat een anti-deeltje dat even zwaar is, maar tegengestelde lading heeft.
i. Er zijn in het heelal evenveel protonen als anti-protonen.
j. Uit elektromagnetische straling kunnen geladen deeltjes ontstaan.
k. De mensheid weet nog niet precies hoe het komt dat er deeltjes met massa bestaan.
l. De mensheid weet niet hoe deeltjes elektrische krachten op elkaar uitoefenen.

Alle antwoorden zijn in deze module te vinden. Aan het eind kijk je welke antwoorden je dán geeft.



Figuur 1.2



Figuur 1.3 Gerard 't Hooft

Marina Sabbadini en Lucas de Haas uit klas 5 van het Stedelijk Gymnasium Leiden stelden per email enkele vragen aan Gerard 't Hooft. In 1999 won 't Hooft samen met Martinus Veltman de Nobelprijs voor natuurkunde.

Lucas: Wat vindt u boeiend in het vak natuurkunde in het algemeen, wat inspireert u?

Het boeiendste van de natuur is dat die zo methodisch in elkaar zit. Het lijkt wel of je er alles van kunt begrijpen als je er maar hard genoeg aan werkt. De natuur is een geweldige uitdaging. Er zijn nog allerlei zaken die we niet begrijpen, zoals hoe de zwaartekracht precies inwerkt op elementaire deeltjes, en hoe het heelal begonnen is en evolueert. Het is overduidelijk dat er gepaste antwoorden moeten bestaan op die vragen, maar wij kennen ze niet. In het verleden waren er nog veel meer van dat soort vragen, en een heleboel ervan zijn op heel verrassende wijze inmiddels beantwoord. De antwoorden lieten bijna altijd zien dat de natuur nog veel slimmer in elkaar zit dat wij mensen van te voren hadden kunnen vermoeden. Ik denk dus dat de vragen waar wij nu mee zitten fantastische antwoorden zullen hebben, maar wij hebben daar nu nog geen idee van.

Marina: Natuurkundige theorieën zien er vaak wiskundig uit. Wat is voor uw werk belangrijker, wiskundig inzicht of gevoel voor hoe de natuur werkt?

Beide zijn belangrijk. De natuur zit heel erg wiskundig in elkaar. Denk maar eens hoe ze de banen van ruimteschepen jaren van tevoren plannen, die dan fantastisch ingewikkelde kronkelbanen tussen manen en planeten beschrijven, en het klopt dan precies. Maar wiskunde is niets anders dan een taal, een taal die speciaal geschikt is om de natuur te kunnen beschrijven, waar gewone mensentaal te omslachtig en onnauwkeurig is. Om China te begrijpen moet je Chinees kunnen praten, en om natuurkunde te begrijpen moet je wiskunde kunnen praten. Maar natuurlijk moet je gevoel hebben over wat er in China gebeurt, en zo moet je ook gevoel hebben over hoe de natuur in elkaar zit.

Marina: Ik kan mij voorstellen dat onderzoek veel aandacht en tijd vraagt. Zijn er andere dingen die u belangrijk vindt om te doen en waar u tijd voor maakt?

Afgezien van diverse hobby's (piano, fotograferen, schilderen, schelpen verzamelen) vind ik onderwijs heel belangrijk. Ik ben blij dat jullie althans pogingen doen je in wetenschap te verdiepen. Ik kan alleen maar hopen dat je er zoveel mogelijk van meeneemt. Kennis, op allerlei terreinen, is een verrijking van je leven en je zult er altijd profijt van hebben en plezier aan beleven.

Gerard 't Hooft is hoogleraar aan de Universiteit Utrecht. Hij schreef enkele populair-wetenschappelijke boeken, bijvoorbeeld Planetenbiljart, ISBN 9789035130265



Figuur 1.3b Naomi van der Kolk

Interview met Naomi van der Kolk, Onderzoeker in opleiding aan het NIKHEF (Nederlands Instituut voor Kern- en Hoge-Energiefysica)

Op welke vraag is je eigen werk gericht?
Op de vraag wat de eigenschappen, zoals temperatuur, energiedichtheid en geluidssnelheid, zijn van het Quark Gluon Plasma. We denken dat het universum zich net na de oerknal in deze staat bevond. En proberen dit plasma te maken door botsingen met lood ionen in de Large Hadron Collider, bij CERN in Zwitserland.

Hoe ziet jouw werkdag eruit?
Meestal zit ik achter mijn computer te werken aan simulaties om voorbereid te zijn op de echte data. Of ik heb overleg met collega's. Als straks de versneller aan gaat zal ik ook in de controlekamer van ons experiment werken.

Wat boeit jou in dit vak?
Dat er nog zoveel vragen onbeantwoord zijn en dat je op zoek bent naar die antwoorden. En dat je samenwerkt met mensen uit de hele wereld.

Waarmee houd je je bezig buiten de natuurkunde?
In mijn vrije tijd houd ik me bezig met fotografie, bergsport, zingen en yoga.

Op universiteiten werken natuurkundigen in experimentele en theoretische onderzoeksgroepen. Belangrijke onderzoeksgebieden zijn vaste-stoffysica, laserfysica, biofysica en hoge-energiefysica. Dat laatste gebied gaat over de kleinste deeltjes. Het heet zo omdat de deeltjes worden onderzocht door ze heel hard te laten botsen. Het feit dat daar aparte onderzoeksgroepen voor zijn, laat zien dat deeltjesfysica één van de hoofdonderwerpen van het huidige natuurkundig onderzoek is.

Oriëntatieopdracht: Kennis, geld en roem
Elk jaar reikt het nobel comité de Nobelprijs voor natuurkunde uit. Kijk op nobelprize.org en vul in hoeveel van de Nobelprijzen in elk decennium naar deeltjesfysica zijn gegaan. Je kunt het uitzoekwerk verdelen door verschillende groepjes naar verschillende decennia te laten kijken.

'01-'10	'11-'20	'21-'30	'31-'40	'41-'50	'51-'60	'61-'70	'71-'80	'81-90	'91-00	'01-'10

We gaan nu de route volgen die de mensheid heeft gevolgd om te ontdekken waar alles uit bestaat. Veel plezier op deze ontdekkingsreis!

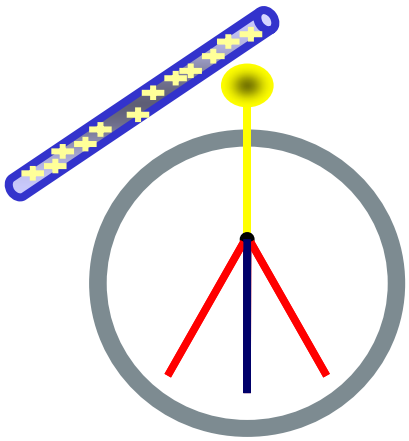
1.2 De ontdekking van nieuwe deeltjes in kosmische straling

Extra

Henri Becquerel was na zijn opa en zijn vader de derde in zijn familie die onderzoek deed naar fluorescerende gesteenten.

Marie Curie kwam uit Polen. Ze ging in Parijs studeren. Ze deed haar onderzoek in het begin samen met haar echtgenoot Pierre.

Deze drie onderzoekers kregen in 1903 samen de Nobelprijs voor natuurkunde. Nadat Pierre Curie was omgekomen bij een verkeersongeluk, zette Marie het werk voort. In 1911 kreeg zij ook een Nobelprijs voor scheikunde, vanwege de ontdekking van nieuwe elementen. Dochter Irène en haar man kregen later ook een Nobelprijs voor scheikunde.



Figuur 1.4 Elektroscoop



Figuur 1.5 Victor Hess kreeg in 1936 de Nobelprijs, samen met Carl Anderson

Henri Becquerel, het echtpaar Pierre en Marie Curie en Ernest Rutherford deden aan het einde van de 19de eeuw veel onderzoek aan 'radioactiviteit'. Ze ontdekten dat bepaalde stoffen in de aardbodem spontaan een onzichtbare straling uitzonden. Die straling bedierf goed verpakt fotografisch materiaal en je kon er de botjes in je hand mee zichtbaar maken. Bovendien bleek die straling deeltjes in de lucht te ioniseren

De elektroscoop van Theodoor Wulf en de ballontocht van Victor Hess

Het inzicht in de ionisatie van lucht maakte een verklaring mogelijk van een oud probleem. Elektroscopen (zie figuur 1.4), die men al meer dan 100 jaar gebruikte om elektrische lading aan te tonen, bleken altijd na verloop van tijd spontaan hun lading te verliezen. Toen men begreep dat ionen in de lucht hiervoor verantwoordelijk waren, was dit verschijnsel eindelijk verklaard. Men begon nu ook het ontwerp van de elektroscoop te verbeteren om aan **ioniserende straling** (d.w.z. straling die voldoende energetisch is om een elektron uit de buitenste schil van een atoom weg te slaan) metingen te kunnen doen. Zo kwam het dat Theodoor Wulf – een gevluchte Duitse priester die als leraar werkzaam was in het Limburgse Valkenburg – in 1907 een heel nauwkeurige elektroscoop bouwde. Nauwkeurig genoeg om aan te tonen dat de intensiteit van de straling afneemt als je naar een grotere hoogte boven het aardoppervlak stijgt. Want dat zou het geval moeten zijn als de straling uit de aardbodem komt, zoals men in die tijd aannam. Om dit te bevestigen beklom Wulf de Eiffeltoren. Tot zijn grote verrassing bleek de afname veel minder dan verwacht. Het resultaat inspireerde Victor Hess om in 1911 en 1912 de metingen in een luchtballon te herhalen. Hij vond dat de intensiteit van de ioniserende straling juist weer toeneemt boven een bepaalde hoogte. Latere metingen bevestigden dit steeds weer. Zo werd iets ontdekt waar oorspronkelijk niet naar werd gezocht: **kosmische straling**.

De applet 'Hess' Balloon Ride' is een simulatie van de metingen van Hess: http://sunshine.chpc.utah.edu/javalabs/java102/hess/balloon/intro1.htm

De ontdekking van nieuwe deeltjes

Toen Victor Hess de conclusie trok dat er sprake was van kosmische straling, wist hij nog niet waaruit die straling bestond. Men kende de verschillen tussen α-, β- en γ-straling en achtte het uitgesloten dat alfa- of bètastraling uit de ruimte diep in de atmosfeer kon doordringen. Daarom vermoedde men dat kosmische straling uit gammastraling bestond. Uiteindelijke ontdekte Pierre Auger 30 jaar later dat de straling die de aarde bereikt, helemaal niet de kosmische straling zelf is. Wat de aardbodem bereikt is een lawine van geladen deeltjes en fotonen die veroorzaakt wordt als kosmische straling in de dampkring komt. Zo'n lawine van deeltjes heet een **airshower**. Hoe in een airshower deeltjes kunnen ontstaan, en welke, leer je in hoofdstuk 2 van deze module.

Het onderzoek aan kosmische straling leverde veel kennis op over de bouw van de materie op de allerkleinste schaal. Zo vond Carl Anderson tijdens z'n onderzoek aan airshowers nooit eerder waargenomen deeltjes: positronen in 1932 en muonen in 1936. Men begon in die tijd ook te vermoeden dat de bijna niet waarneembare neutrino's moesten bestaan. Maar pas in 1956 werden die (indirect) waargenomen.

Vonkenkamer

Met een vonkenkamer is goed te zien dat op elke plaats op aarde geregeld deeltjes passeren. De sporen die je ziet, worden veroorzaakt door muonen. Voor een filmpje en voor een uitleg hoe de vonkenkamer werkt, zie http://www.nikhef.nl/pub/pr/vonk/

- **Positronen** zijn de **antideeltjes** van elektronen: ze hebben dezelfde massa als elektronen, maar een positieve elektrische lading. Het symbool is e+. In ziekenhuizen worden deze deeltjes dagelijks gebruikt voor het maken van PET-scans. (PET is een afkorting van Positron Emissie Tomografie.) De deeltjes in **antimaterie** zijn identiek aan de deeltjes in gewone materie, op hun lading na, die tegengesteld is.
- **Muonen** hebben dezelfde eigenschappen als elektronen, maar hun massa is 207 keer zo groot. Het symbool is μ. De muonen die in de atmosfeer ontstaan, kunnen diep in ander materiaal doordringen (>8 meter beton). Zo'n 200 muonen per seconde bereiken elke vierkante meter van het aardoppervlak.
- **Neutrino's** zijn familie van elektronen. In het heelal zijn er enorm veel van. Ze hebben geen elektrische lading en een heel kleine massa. En ze reageren nauwelijks met andere materie. Dat betekent dat ze bijna overal doorheen vliegen. Daarom worden ze wel eens 'spookdeeltjes' genoemd.

1.3 Zonnewind en andere kosmische straling

Bij kosmische straling denk je misschien aan elektromagnetische straling, zoals licht en infrarode of ultraviolette straling. De term kosmische straling werd dan ook ingevoerd omdat men aanvankelijk vermoedde dat alleen gammastraling de oorzaak was van de ionisatie in de lucht. Toen bleek dat kosmische straling ook voor een groot deel uit elektrisch geladen materie en neutrino's bestaat, bleef men de term toch gebruiken.

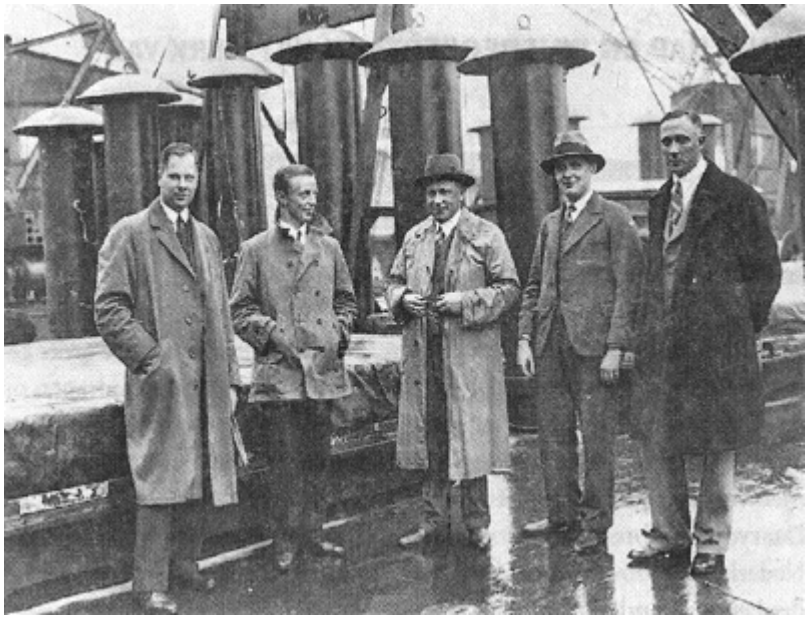


Figuur 1.6

Een voorbeeld van een flinke uitbarsting van geladen deeltjes op de zon is te zien op de website van SOHO, een satelliet die permanent de zon observeert. Link: http://sohowww.nascom.nasa.gov/pickoftheweek/old/26jan2007/

Zonnewind

De enige manier om in het begin van de twintigste eeuw tussen Nederland en Indonesië te reizen was per boot en de boottocht duurde enkele weken. Toen de Nederlandse natuurkundige Jacob Clay en zijn vrouw Tettje die tocht in 1927 moesten maken, namen zij een goede elektroscoop mee om op



Figuur 1.7 Jacob Clay staat in het midden

verschillende plaatsen de intensiteit van de kosmische straling te meten. Zij ontdekten dat er rond de evenaar veel minder ionisaties optraden dan op hogere breedtegraden. Dat gold zowel voor het Zuidelijk als voor het Noordelijk Halfrond. Hieruit concludeerde het echtpaar dat de kosmische straling buiten de atmosfeer bestaat uit geladen deeltjes, die worden afgebogen in het magnetische veld van de aarde. Verder onderzoek wees uit dat er een relatie was met de activiteit van de zon. Dit betekende dat de zon elektrisch geladen deeltjes uitstoot. Men begon toen ook te begrijpen dat het Poollicht vergelijkbaar is met het licht dat gassen uitzenden als er een bundel elektronen door gaat.

Sinds het bestaan van de ruimtevaart worden ook hoog in de dampkring en daarbuiten metingen gedaan. In 1958 is hierdoor ontdekt dat er om de aarde 'schillen' van elektrisch geladen deeltjes bestaan. Die deeltjes bewegen met grote snelheid tussen de magnetische polen van de aarde op en neer. Tegenwoordig doet men waarnemingen met allerlei satellieten buiten de dampkring. Bijvoorbeeld voor permanente en nauwkeurige observaties van het oppervlak van de zon. Op de zon vinden soms heftige uitbarstingen van heet gas plaats. Deze stroom van uitgestoten protonen en elektronen met snelheden van $3 \cdot 10^5$ tot $4 \cdot 10^5$ ms^{-1} wordt **zonnewind** genoemd.

De term **kosmische straling** gebruik je voor de overal in de kosmos aanwezige stroom van fotonen, neutrino's en elektrisch geladen deeltjes. De geladen deeltjes zijn elektronen, snelle protonen en atoomkernen die van al hun elektronen zijn ontdaan. Het grootste deel van de straling die de aarde bereikt, bestaat uit zonnewind. Dat is ook het langzaamste deel. De kosmische deeltjes die van buiten het zonnestelsel komen, benaderen de lichtsnelheid. Bij deze snelle deeltjes corresponderen kleine snelheidsverschillen met grote verschillen in energie. Daarom worden deze deeltjes niet aan de hand van de snelheid gekarakteriseerd, maar aan de hand van hun energie. Als maat voor de energie wordt de elektronvolt gebruikt. Het verband tussen snelheid en energie wordt beschreven door de relativiteitstheorie van Einstein. Meer hierover volgt in paragraaf 4.2.

Elektronvolt

Een elektronvolt is de energie die wordt overgedragen als een deeltje met de elementaire ladingshoeveelheid 1·e (elektron of proton) een spanningsverschil van 1 Volt doorloopt. (1 Volt = 1 Joule/Coulomb)

Met $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{C}$ volgt uit $E = q \cdot \Delta V$:

$$1{,}6 \cdot 10^{-19} \times \text{aantal V} = \text{aantal Joules}$$

dus

$$1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \times 1\text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

Meestal staat bij het aantal eV een voorvoegsel: keV, MeV, GeV en bij kosmische straling ook TeV, PeV of EeV.

Flux

Een maat voor de hoeveelheid straling die door een bepaald oppervlak gaat, is de **flux**. Het symbool van de flux is Φ. Bij straling die uit deeltjes bestaat, is het aantal deeltjes N een maat voor de hoeveelheid straling. En omdat de straling niet altijd even groot is, wordt vaak de flux per tijdseenheid bepaald. De definitie van de flux is dan: het aantal deeltjes N dat in een bepaalde tijd Δt door een oppervlak gaat:

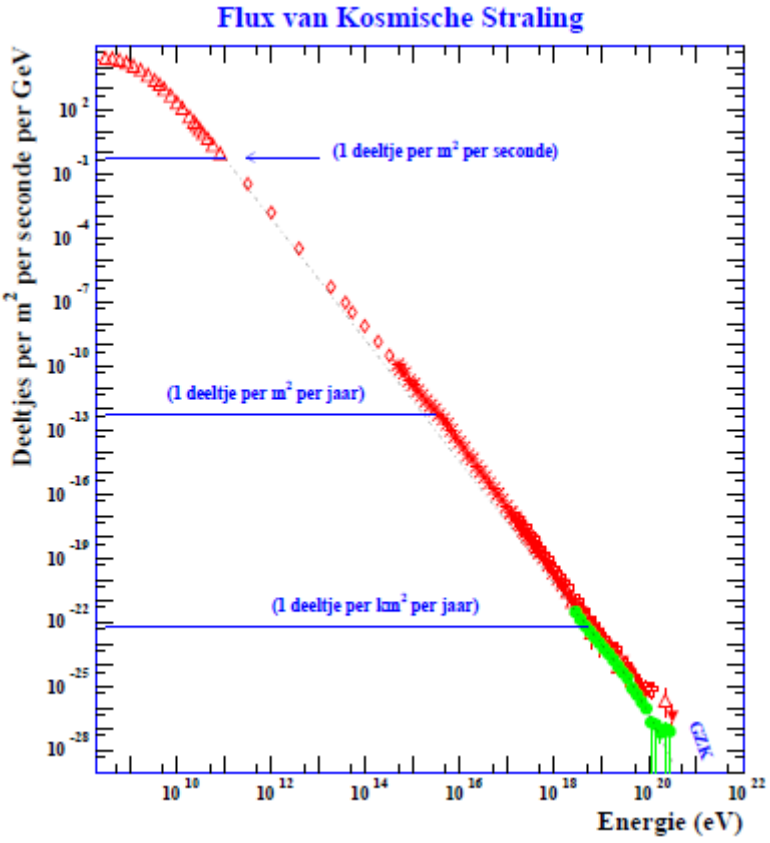
$$\Phi = \frac{N}{\Delta t} \quad \text{(eenheid s}^{-1}\text{)}$$

Meestal wordt de flux per vierkante meter genomen, dit is de **fluxdichtheid**. De fluxdichtheid is gelijk aan $\frac{\Phi}{A}$ (eenheid m^{-2} s^{-1}).

Deze grootheid is te vergelijken met het begrip intensiteit dat je in andere modules bent tegengekomen.

Kosmische straling met ultra hoge energie

De grafiek in figuur 1.8 geeft de fluxdichtheid Φ/A van de kosmische straling als functie van de energie E. We noemen dit het spectrum van de kosmische straling. De verticale en de horizontale as hebben een logaritmische schaalverdeling. De deeltjes die van de zon afkomstig zijn, vallen grotendeels buiten dit spectrum. Deeltjes met een energie tussen 10^{10} en 10^{20} eV komen gewoonlijk niet van de zon, maar van elders uit de melkweg of van nog verder. Het blijkt dat deeltjes in de kosmische straling vooral kernen van waterstofatomen (protonen dus) zijn. Maar ook kernen van helium-, koolstof-, zuurstof- en zelfs van ijzeratomen komen voor. Deze atoomkernen hebben geen elektronen om zich heen.



Figuur 1.8

Je moet de grafiek zien als een histogram waarin de flux(dichtheid) in $m^{-2}s^{-1}$ uitstaat tegen de energie, in kolommen met een breedte van 1 GeV. De flux neemt sterk af voor deeltjes met veel energie. Neemt de energie met een factor 10 toe, dan neemt de flux ongeveer met een factor 400 af!

Cut off

Het deel uiterst rechts van het spectrum is bijzonder. Dit deel van de kosmische straling heeft onvoorstelbaar veel energie. Er is berekend dat het maximum ongeveer 10^{20} eV per deeltje is. De rechte lijn in de grafiek eindigt daar, daarom noemt men dat de cutoff. Het is niet precies bekend hoe deeltjes een energie van 10^{20} eV krijgen. Misschien zijn ze een restant van de Big Bang. In dat geval kan onderzoek aan deze deeltjes ons iets leren over het ontstaan van het heelal. Het is ook mogelijk dat de deeltjes zoveel energie hebben gekregen door een reeks kosmische versnellers. Het rechterdeel van het spectrum wordt aangeduid met de naam 'ultra high energy cosmic rays' (UHECR) en is het onderwerp van grootschalig onderzoek.

1.4 Welke deeltjes zijn er?

Leptonen

Door de ontdekking van positronen en muonen in kosmische straling, is het duidelijk geworden dat het elektron familie heeft. Het elektron en zijn familieleden zijn **elementaire deeltjes**. Dat wil zeggen dat ze niet bestaan uit een combinatie van kleinere bouwstenen, tenminste voorzover we nu weten. Ze behoren tot de groep **leptonen**, die een van de drie klassen van elementaire deeltjes vormen. De andere klassen bespreken we later.

Andere typen leptonen zijn het elektronneutrino ν_e, het muonneutrino ν_μ, het tauneutrino ν_τ en hun antideeltjes. De neutrino's en hun antideeltjes hebben geen elektrische lading. Ook hebben ze vrijwel geen massa.

In tabel 1 staat de volledige groep leptonen met hun lading en hun massa. Antideeltjes hebben een streepje boven hun letter. De massa is uitgedrukt in de eenheid MeV/c^2 ; deze eenheid wordt later toegelicht.

		Generatie I		Generatie II		Generatie III
- 1 e	e^-	elektron 0,5	μ^-	muon 106	τ^- -	Tauon 1777
0	ν_e	elektronneutrino ~0	ν_μ	muonneutrino ~0	ν_τ	tauonneutrino ~0
0	$\bar{\nu}_e$	anti-elektronneutrino ~0	$\bar{\nu}_\mu$	anti-muonneutrino ~0	$\bar{\nu}_\tau$	anti-tauonneutrino ~0
+ 1 e	e^+	positron 0,5	μ^+	anti-muon 106	τ^+	anti-tauon 1777

Tabel 1 Leptonen en hun antideeltjes: namen, symbolen, elektrische lading (e), massa MeV/c^2

Quarks

Er moeten wel meer elementaire deeltjes zijn. Atomen bestaan namelijk uit elektronen én een kern. In de kern zitten protonen en neutronen. Protonen zijn positief geladen en hebben een massa van 938 MeV/c^2. Neutronen zijn ongeladen en hebben een massa van 940 MeV/ c^2. Het is geblekendat protonen en neutronen niet zijn samengesteld uit leptonen.

Murray Gell-Man publiceerde in 1964 zijn idee dat protonen geen elementaire deeltjes zijn maar uit kleinere deeltjes bestaan, die hij **quarks** noemde. Toen men 5 jaar later protonen ging beschieten met snelle elektronen bleek inderdaad dat de elektrische lading in de protonen over 3 pitjes verdeeld was. Dit waren de voorspelde quarks. Volgens de huidige stand van de wetenschap zijn quarks wel elementaire deeltjes. Opvallend is dat de groep quarks ongeveer op dezelfde manier is opgebouwd als de groep leptonen.

	Generatie I		Generatie II		Generatie III	Elektrische Lading	Kleuren
u	up 3	c	charm 1270	t	top 174.000	+⅔	R, G, B
d	down 6	s	strange 100	b	bottom 4500	-⅓	R, G, B
$\overline{d}$	antidown 6	$\overline{s}$	antistrange 100	$\overline{b}$	antibottom 4500	+⅓	$\overline{\text{R}}, \overline{\text{G}}, \overline{\text{B}}$
$\overline{u}$	anti-up 3	$\overline{c}$	anticharm 1270	$\overline{t}$	antitop 174.000	-⅔	$\overline{\text{R}}, \overline{\text{G}}, \overline{\text{B}}$

Tabel 2: Quarks en hun antideeltjes: elektrische lading (e), massa (MeV/c²) en hun kleuren

Extra

Van de website www.achievement.org

Murray Gell-Mann was born in New York City. His father was an immigrant from Czernowitz, an ancient city that was then part of the Austro-Hungarian Empire and is now known as Chernivtsi, Ukraine. The elder Gell-Mann struggled to support his family during the Great Depression but managed to instill in his son an intense interest in science and mathematics.
By his own account, the one subject in which young Gell-Mann did poorly was a high school course in physics. Although his passion at the time lay in linguistics and archeology, his father urged him to choose a major in the sciences. On a whim, he says, he decided to major in physics and soon become captivated by the subject.



Figuur 1.9 Een jonge Murray Gell-Mann

Binnen de groep quarks staan twee quarks centraal: de **up-quark** *u* en de **down-quark** *d*. Ze vormen samen de eerste generatie quarks. De up-quark is de lichtste en de meest stabiele. Alle protonen en neutronen bestaan uit deze ups en downs. En dat is bijna alle materie van het heelal op de elektronen na.

De up- en down-quark hebben ieder twee zwaardere varianten: de quarks uit de generaties 2 en 3. Die zijn in het huidige heelal echter uitgestorven. Alleen in airshowers en bij botsingen tussen deeltjes met veel energie kunnen ze weer ontstaan.

Er zijn 6 verschillende quarks. Soms zegt men daarom dat de quarks in 6 **smaken** voorkomen. Elke quark heeft ook een antideeltje. Het symbool voor de quark is de eerste kleine letter van de Engelse naam. Een antideeltje heeft een streep boven het symbool. Het overzicht staat in tabel 2. Het begrip kleurlading wordt in hoofdstuk 2 uitgelegd.

Quarks komen nooit los voor, maar altijd in combinaties die een heel aantal maal e als lading opleveren. Het proton bestaat bijvoorbeeld uit *uud*, het neutron uit *udd*.

Krachtdeeltjes

Naast de leptonen en de quarks was er vanaf begin 20ste eeuw nog een deeltje bekend, het foton. Licht bestaat uit fotonen. Het foton is massaloos en ongeladen. Het kan alleen met de lichtsnelheid bewegen. De bijzondere rol van fotonen bij interacties tussen deeltjes komt in hoofdstuk 2 aan de orde. Volgens de huidige theorie behoren fotonen tot een derde klasse van elementaire deeltjes: de 'krachtdeeltjes'

Reflectieopdracht: Volg je het verhaal?

Vul bij elke letter het juiste woord in. Sommige woorden worden meerdere keren gebruikt, niet alle woorden worden gebruikt.

Kies uit: atmosfeer, ballontocht, dracht, elektroscoop, foton, geladen, interacties, leptonen, positronen, processen, quarks, radioactiviteit, ruimte

In 1895 was …**a**… ontdekt. Men begreep dat straling uit de grond de …**b**… kan ioniseren en dat daardoor een …**c**… kan ontladen. Men verwachtte dat dit ontladen langzamer zou gaan op grotere hoogte. Dat klopte niet, bleek uit de …**d**… van Hess. De conclusie was dat er niet alleen straling uit de grond komt, maar ook uit de …**e**…. Omdat α- en β-straling een kleine …**f**… hebben, dacht men dat dit alleen maar γ-straling zou kunnen zijn. Dit klopt niet. Een raadsel dat we in deze module nog moeten oplossen, is hoe op allerlei hoogtes …**g**… deeltjes kunnen worden waargenomen die uit de ruimte lijken te komen.

Bij het bestuderen van …**h**… deeltjes moet je er rekening mee houden dat ze door magneetvelden worden afgebogen.

Bij het bestuderen van de kosmische straling werden nieuwe deeltjes gevonden. Muonen en …**i**… zijn voorbeelden van …**j**…. Met de …**k**… en het …**l**… hebben we een overzicht van bijna alle deeltjes die bestaan. Maar we weten nog niet welke …**m**… zich tussen de deeltjes afspelen, welke …**m**… ze met elkaar hebben. Dat komt in hoofdstuk 2.

Begrippen

Basisstof:

- Positron
- Neutrino
- Antideeltjes
- Elementaire deeltjes
- Leptonen, quarks, krachtdeeltjes
- Elektron, up-quark, down-quark, neutrino
- Gebroken elektrische lading van quarks

Toepassing van:

- Ionisatie
- Elektroscoop
- Rekenen met eV
- Logaritmische schaalverdeling aflezen

Verdieping:

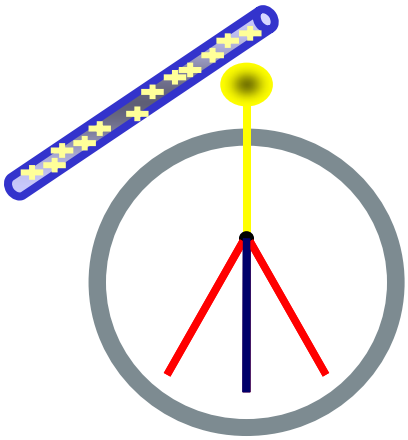
- Airshower
- Muon
- Vonkenkamer
- Kosmische straling
- Rekenen met flux(dichtheid)
- Spectrum

Samenvatting

- Er komt straling uit de ruimte: de **kosmische straling**.
- De deeltjes met relatief lage energie komen van de zon, deze vormen de **zonnewind; d**eeltjes met hogere energie komen van verderop in het heelal.
- Het magneetveld van de aarde beïnvloedt de baan van **geladen deeltjes**.
- In de kosmische straling zijn nieuwe deeltjes ontdekt, waaronder **positronen** en **muonen**.
- Elk geladen deeltje heeft een **antideeltje** met tegengestelde lading en gelijke massa.
- Het antideeltje van het elektron is het **positron**.
- Van het elektron bestaan twee zwaardere varianten, het **muon** en het **tauon**.
- **Neutrino's** zijn heel lichte, ongeladen deeltjes.
- Elektronen, muonen, tauonen, hun antideeltjes en de drie soorten neutrino's zijn **elementaire deeltjes**, ze zijn niet opgebouwd uit kleinere bouwstenen.
- De verzamelnaam voor deze groep elementaire deeltjes is '**leptonen**'.
- Protonen en neutronen zijn geen elementaire deeltjes, ze bestaan uit **quarks**.
- Het **up-quark** heeft 2/3 van de lading van een proton, het **down-quark** heeft -1/3 maal die lading. Quarks komen altijd in combinaties voor waarin de totale lading een heel aantal malen de lading van het proton is.
- Naast leptonen en quarks bestaan **krachtdeeltjes**.
- Het **foton** is een krachtdeeltje.

Opgaven

§1.2



Figuur 1.10

1 Elektroscoop

De knop, de staaf en de beweegbare bladen van een elektroscoop zijn van geleidend materiaal (zie figuur 1.10). Deze onderdelen maken geen contact met de kast eromheen. De kast is geaard.

a. Je nadert de knop met een positief geladen staaf. Leg uit waarom de bladen uitslaan.

Op een elektroscoop wordt positieve lading gebracht door de knop met een positief geladen staaf aan te raken. De uitslag van de bladen blijft bestaan als je de staaf weghaalt.

b. Leg uit dat de uitslag van de elektroscoop op den duur toch afneemt door ioniserende straling in de omgeving. Gebruik de begrippen ionisatie, positieve ionen, vrije elektronen, aantrekken, afstoten, ontladen, uitslag.

c. Leg uit of de elektroscoop ook door ioniserende straling zou worden ontladen als die in het begin negatief geladen was.

2 Metingen van de beslissende ballonvlucht van Hess in 1912

In tabel 3 staan de waarnemingen die Hess deed tijdens zijn beslissende ballonvlucht in 1912. Het leverde een Nobelprijs op. Hij heeft gemeten met 3 instrumenten ('Inst.'), waarvan de derde het halverwege begaf. De getallen in de kolommen van de instrumenten staan voor de lading die de elektroscoop in de vermelde periode verloor. De eenheid van deze getallen werd niet vermeld. Gebruik ze als een (relatieve) maat voor de ionisatie van de lucht.

	Ballon "Böhmen"(1680 cbm hydrogen)							Leader: Captain W. Hoffory	
	Meteorological observer: E. Wolf							Electr. Observer: V.F. Hess	
		Mean height		Observed radiation					
		abs.	rel.	Inst. 1	Inst. 2	Inst. 3			humidity
No.	Time	*m*	*m*	*qi*	*qi*	*qi*	red. *qi*	Temp.	%
1	15h 15-16h 15	156	0	17.3	12.9	…	… }	1½ days before	
2	16h 15-17h 15	156	0	15.9	11.0	18.4	18.4 }	the ascent	
3	17h 15-18h 15	156	0	15.8	11.2	17.5	17.5 }	in Vienna	
4	6h 45- 7h 45	1700	1400	15.8	14.4	21.1	25.3	+6.4°	60
5	7h 45- 8h 45	2750	2500	17.3	12.3	22.5	31.2	+1.4°	41
6	8h 45- 9h 45	3850	3600	19.8	16.5	21.8	35.2	- 6.8°	64
7	9h 45-10h 45	4800	4700	40.7	31.8	(ended by accident)		- 9.8°	40
		(4400-5350)							
8	10h 45-11h 15	4400	4200	28.1	22.7			…	…
9	11h 15-11h 45	1300	1200	(9.7)	11.5			…	…
10	11h 45-12h 10	250	150	11.9	10.7			+16.0°	68
11	12h 45-12h 10	140	0	15.0	11.6	(After landing at Pieskow, Brandenburg)			

Tabel 3

a. Hoe lang duurde de ballonvlucht?
b. Zet de metingen met inst. 1, 2 en 3 uit in een grafiek.
c. Kun je de conclusie trekken dat de intensiteit van de ioniserende straling op 150 m boven de grond afwijkt van die op de grond?
d. Idem wat betreft de intensiteit op 1200 tot 1400 m?
e. Leveren de resultaten van de instrumenten 1 en 2 overtuigend bewijs voor de stelling dat de intensiteit van de straling toeneemt met toenemende hoogte? Leg uit.
f. Hess wilde niet de stelling verdedigen die bij vraag e is genoemd, maar hij wilde een andere stelling weerleggen. Welke? En vond hij daarvoor overtuigend bewijs?

3 Extra - De vonkenkamer

Bezoek de webpagina http://www.nikhef.nl/pub/pr/vonk/

Op de website staat dat een elektrisch geladen kosmisch deeltje in het gas van een vonkenkamer een spoor van geladen deeltjes veroorzaakt. Dit gebeurt door ionisatie. Dit spoor zie je pas als over de platen een grote elektrische spanning staat.

a. Leg uit welk vrije ladingen in het gas door het kosmische deeltje ontstaan.
b. Welke vrije ladingen zijn vooral bij de vonkoverslag betrokken?
c. Leg uit in welke richting de vonken gaan: van + naar – , of van - naar +.

Kijk naar de sporen in de video. Deze sporen worden veroorzaakt door muonen. Per vierkante meter passeren 200 muonen per seconde.

d. Waarom komen sporen die aan de zijkant beginnen of eindigen niet voor?
e. De frequentie van de vonkoverslagen is kleiner dan je verwacht op grond van het gegeven dat er 200 muonen per seconde per m^2 passeren. Bedenk hiervoor twee mogelijke verklaringen.

Als de vonkenkamer op de plaats zou staan waar je nu zit, dan zie je hetzelfde als in de video. Muonen gaan ook door jou heen. Neem aan dat alle muonen loodrecht op aarde invallen.

f. Maak een schatting van het aantal muonen dat per seconde door je heen gaat. Maak duidelijk op welke aannames de schatting is gebaseerd.

4 Extra - Hess' Balloon Ride

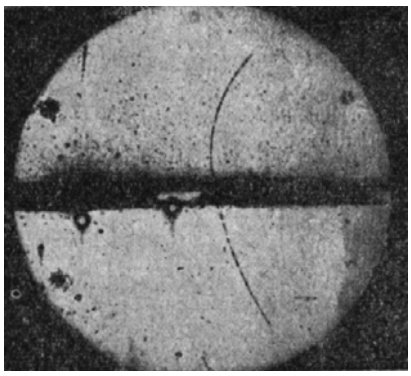
Het adres

http://sunshine.chpc.utah.edu/javalabs/java102/hess/balloon/intro1.htm

verwijst naar een website van de University of Utah. Hierop staat een applet 'Hess' Baloon Ride'. In de applet kun je de 'ballon van Hess' op een bepaalde hoogte stilzetten en op die hoogte de intensiteit van de kosmische straling meten. De resultaten komen in een tabel en kun je laten plotten in een diagram.

Opmerking: De applet suggereert dat Hess een Geigerteller als meetinstrument heeft gebruikt. Die telt het aantal 'inslagen' per seconde. Maar Geigertellers bestonden in 1909 nog niet. De applet werkt wel met realistische waarden voor de intensiteit van de straling.

a. Ga naar de website en bestudeer de toelichting.
b. Voer een serie metingen uit en interpreteer de grafiek.
c. De vraag die je moet beantwoorden is: Neemt de intensiteit van de straling recht evenredig toe met de hoogte, of meer dan recht evenredig?



Figuur 1.11 Verkleinde afdruk van de foto van Anderson. Op de echte foto is alles 1,5 maal zo groot.

5 De foto van Anderson: het positron

De foto in figuur 1.11 vormde in 1932 het bewijs van het bestaan van positronen, de antideeltjes van elektronen. Het spoor is een condensatiespoor dat het deeltje achterliet in een damp, net als de sporen die vliegtuigen hoog in de lucht achterlaten.

Het deeltje ging door een homogeen magnetisch veld. De magnetische veldsterkte B was 1,5 T en stond loodrecht op de gefotografeerde baan. De donkere horizontale streep was een plaat lood met een dikte van 6 mm.

De straal van de baan in vacuüm is bij kleine snelheden gelijk aan $R=mv/qB$. We noemen dit de Larmorstraal.

a. Leg uit dat het deeltje het spoor van onder naar boven volgt.

Voor deeltjes met bijna de lichtsnelheid wordt de Larmorstraal gegeven door $R=E/qBc$. Hierin is E de energie van het deeltje en c de lichtsnelheid.

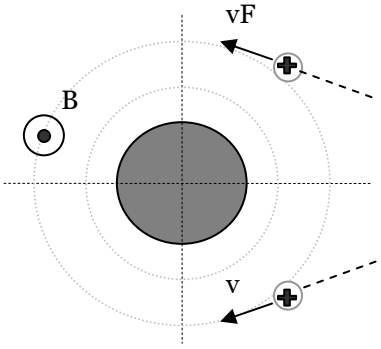
b. Maak op grond van figuur 1.11 een schatting van R en bereken hiermee de energie van het positron.

c. Enkele jaren na de positronen werden muonen ontdekt. Neem figuur 1.11 over en schets de banen die een muon en een proton zouden hebben bij dezelfde energie als het positron en onder dezelfde omstandigheden.

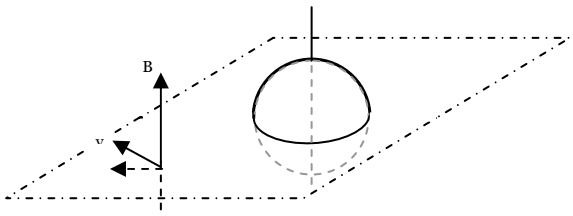
§1.3

6 Extra - Afbuiging van zonnewind

In figuur 1.12a stelt de grijze cirkel de aarde voor gezien vanuit een punt boven de Noordpool. In het vlak van de evenaar komen twee protonen met snelheid v. Het aardmagnetische veld komt uit het evenaarsvlak naar je toe. De richting van de Lorentzkracht vind je met de linkerhandregel: Houd je hand zo dat het magnetisch veld in je handpalm prikt, en houd je vingers in



Figuur 1.12a



Figuur 1.12b

de richting waarin de positieve lading beweegt. Je gestrekte duim geeft dan de richting van de Lorentzkracht.

a. Bepaal de richting van de Lorentzkracht op beide protonen.

In figuur 1.12b zijn het Noordelijk Halfrond en het vlak door de evenaar vanuit een andere positie getekend. In een bepaald punt van dit vlak passeren protonen en elektronen. De bewegingsrichting van de deeltjes staat schuin op het vlak.

Neem voor de snelheidscomponent in het vlak voor beide soorten deeltjes v = 40 km · s^{-1}. Bij deze snelheid geldt $R= mv/qB$. De magnetische veldsterk-

tee is $B = 1 \cdot 10^{-5}$ T . Verder is $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg en $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

b. Bepaal de Lorentzkracht op beide soorten deeltjes.
c. Bepaal de straal van de cirkelbanen die beide soorten deeltjes beschrijven.
d. Bereken voor beide soorten deeltjes de frequentie waarmee ze de cirkelbeweging uitvoeren.
e. Leg uit dat de deeltjes een schroefbeweging gaan volgen in de richting van de Noordpool.
f. Leg uit dat Clay bekend moet zijn geweest met de schroefbeweging van elektrisch geladen deeltjes in het aardmagnetische veld.

7 Elektronvolt, snelheid en energie

a. Bereken de kinetische energie in Joule en eV van protonen met een snelheid van 40 km · s^{-1}.
b. Een deel van de protonen dat de atmosfeer binnenkomt, heeft een energie van ongeveer 1200 keV. Reken dit om in Joule.

De energie van protonen met ultra hoge energie wordt wel eens vergeleken met de energie van een tennisbal.

c. Bereken bij welke snelheid een tennisbal (m = 58 g) een kinetische energie van 10^{20} eV heeft.
d. Stel dat je een tennisbal dezelfde snelheid kon geven als een proton met een energie van 10^{20} eV. Bereken hoeveel de energie je daarvoor aan de tennisbal moet toevoeren en vergelijk dit met het jaarlijkse energieverbruik in Nederland (ongeveer $3 \cdot 10^{18}$ J).

8 Flux

Detectoren in satellieten meten de energie waarmee kosmische deeltjes vanuit de ruimte de dampkring binnenkomen. De detector zijn uitgerust met sensoren met een oppervlak van 25 mm^2. De sensoren worden evenwijdig aan het aardoppervlak gehouden. De hoeken van inval van de kosmische deeltjes is maximaal 90^o. Op grond van de metingen wordt gesteld dat gemiddeld 1500 deeltjes per minuut een sensor treffen.

a. Bereken de flux in eenheden S.I.
b. Bereken de fluxdichtheid in eenheden S.I.

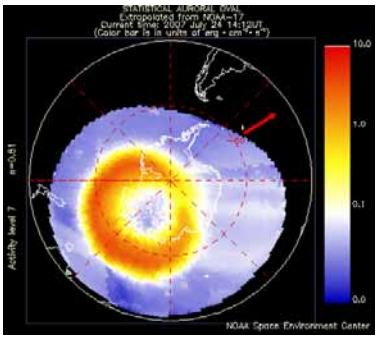
De meeste kosmische deeltjes zijn protonen. Neem aan dat de hierboven genoemde flux sinds het ontstaan van de aarde – 4,5 miljard jaar gelden – constant is geweest. De straal van de aarde is R = $6,4 \cdot 10^6$ m.
Bereken bij deze aanname hoeveel de massa van de aarde sinds haar ontstaan door kosmische deeltjes is toegenomen.

9 Extra - Spectrum kosmische straling

Beantwoord de volgende vragen aan de hand van de grafiek van het spectrum in de leestekst.

a. Bepaal de fluxdichtheid (per GeV) bij $E = 10^{10}$ eV en bij $E = 10^{20}$ eV .
b. Met welke factor neemt deze grootheid af? En met welke factor neemt de energie toe?

c. Bereken met welke factor de fluxdichtheid afneemt als de energie 10x zo groot wordt.
d. Bepaal bij welke energie de fluxdichtheid (per GeV) gelijk is aan 1 $km^{-2}s^{-1}$. Bereken de gemiddelde tijd dat er 1 deeltje met die energie door een oppervlak gaat dat gelijk is aan het oppervlak van het klaslokaal.
e. Bepaal bij welke energie de fluxdichtheid (per GeV) gelijk is aan 1 km^{-2} $jaar^{-1}$. Bereken de gemiddelde tijd dat er 1 deeltje met die energie door een oppervlak gaat dat gelijk is aan het oppervlak van het klaslokaal.



Figuur 1.13

10 Extra - Poollicht – vermogen

In figuur 1.13 is met kleuren de energie-fluxdichtheid gegeven van geladen deeltjes bij de Zuidpool op 24 juli 2007. De oranjegele ring is het gebied waar deze deeltjes het zuidelijke Poollicht veroorzaken. De getalwaarden bij de verticale balk heeft de eenheid erg · cm^{-2} · s^{-1}.

$(1\ \text{erg} = 10^{-7}\ \text{J})$

Maak een schatting van het totale ontvangen vermogen (energie per seconde). Maak daartoe eerst een schatting van het oppervlak van de oranjegele ring. De straal van de aarde is gelijk aan R = 6,4 · 10^6 m.

Kijk voor een recent beeld van het Zuidelijk Poollicht (Aurora Australis) op de website van NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): http://www.sec.noaa.gov/pmap/pmapS.html.

11 Extra - Poollicht - kleuren

De kleuren in het poollicht ontstaan door fluorescentie in zuurstof- en stikstofatomen in de atmosfeer. De volgende code geldt:

Blauw	Stikstofatomen
Geel(groen)	Zuurstofatomen
Rood	Zuurstofatomen bij zeer lage druk

Beschrijf op welke hoogte het poollicht ontstond op de fotos op www.northern-lights.no . (Gegevens over de verdeling van de druk en van stikstof- en zuurstofatomen in de atmosfeer vind je in Binas.)

Meer uitleg en foto's en video's over het poollicht vind je op de Noorse website NORDLYS, http://www.northern-lights.no.

12 Extra - Cut off

Kosmische deeltjes met een energie groter dan 10^{20} eV gaan een reactie aan met fotonen die overal in de ruimte aanwezig zijn, de zogenoemde 'kosmische achtergrondstraling' (CBR = Cosmic Background Radiation). Hierbij worden nieuwe deeltjes gemaakt (namelijk pionen) en verliezen de kosmische deeltjes veel energie. Over een afstand van 6 Mpc neemt het aantal deeltjes met meer dan 10^{20} eV met 50% af. (Het symbool pc staat voor parsec. 1 pc = 3 · 10^{16} m)

Bereken welk deel van de deeltjes de afstand tussen het Virgocluster en de aarde (0,16 · 10^{24} m) zou kunnen overbruggen.

13 Afbuiging in de ruimte

In de Melkweg is de magnetische veldsterkte gelijk aan $B = 3 \cdot 10^{-10}$ T. De straal van de melkweg is ongeveer $5.1 \cdot 10^{20}$ m. Geladen kosmische deel-

tjes worden in de galactische ruimte afgebogen. Voor de larmorstraal van zeer snelle deeltjes geldt $R = \frac{E}{q \cdot B \cdot c}$ (zie opg. 5)

a. Bereken of een proton dat in het centrum van de Melkweg een energie heeft van 10^{15} eV de Melkweg zal verlaten.

In de extragalactische ruimte (buiten de melkweg) is $B = 10^{-13}$ T .

Stel dat een proton met een energie van $3 \cdot 10^{19}$ eV de dampkring binnenkomt uit een richting die naar het Virgocluster wijst. De afstand Virgocluster-Aarde is $0{,}16 \cdot 10^{24}$ m .

b. Bereken hoe sterk het proton in de Melkweg afbuigt.
c. Bereken hoe sterk het proton in de extragalactische ruimte afbuigt.
d. Mag je concluderen dat het proton uit het Virgocluster komt?

§1.4

14 Nieuwe deeltjes

De elektrische lading van een elektron (e-) is $q = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C en de massa $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg . De massa van een proton is $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg .

a. Schrijf op hoe groot de elektrische lading en de massa van een positron (e^+) zijn en van een muon (μ^-).
b. Geef twee argumenten waarom een muon niet het antideeltje kan zijn van een elektron.
c. Geef de elektrische lading en de massa van een antiproton (symbool $\bar{p}$).
d. In 1996 werd voor het eerst antiwaterstof gemaakt. Uit welke deeltjes bestaat een antiwaterstofatoom?

15 Proton en neutron

Controleer of de volgende beweringen kloppen wat betreft de ladingen:

a. Een neutron bestaat uit de quarks udd.
b. Een proton bestaat uit de quarks uud.

2 Processen met deeltjes

Het verval van deeltjes
Creatie en annihilatie

Hoofdstukvraag	**Hoe vervallen deeltjes?** **Hoe ontstaan deeltjes en antideeltjes?** **Welke rol speken behoudswetten in processen met deeltjes?** **Hoe beschrijf je een kracht als een deeltjesproces?**

2.1 Inleiding



Figuur 2.1 Amerikaanse postzegel

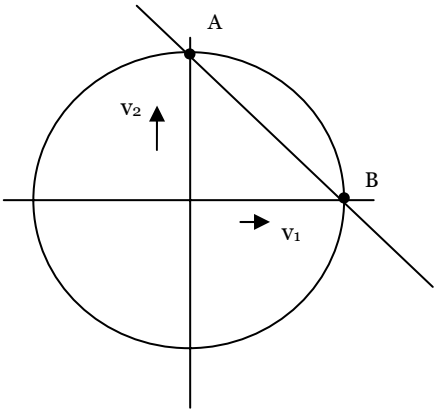
Robert Millikan was een Amerikaans experimenteel fysicus. In 1923 kreeg hij de Nobelprijs voor het bepalen van de lading van het elektron. Toen in 1925 ook Millikan zich liet overtuigen dat er straling uit de kosmos kwam en hij de term *cosmic rays* bedacht, beschouwde hij deze straling als de '*birthcries of atoms*'. Millikan was een gelovig man en hij had een religieuze verklaring voor de kosmische straling. Hij dacht dat een opperwezen buiten de atmosfeer voortdurend nieuwe atomen liet ontstaan en dat hierbij fotonen vrijkwamen die je als kosmische straling kunt waarnemen. Deze gedachte kon geen stand houden. Atoomkernen ontstaan in sterren en verbinden zich met elektronen vooral in koude gaswolken tot atomen. Bijna alle atomen op aarde zijn ouder dan de aarde zelf. Vrijwel alle protonen en elektronen in de ons bekende materie bestaan zelfs al sinds de Big Bang. Ze zijn 13,7 miljard jaar oud en kunnen nog een miljard maal een miljard keer zo oud worden. Andere deeltjes die in de enorme energieconcentraties in de Big Bang konden ontstaan, zijn verdwenen. Ze bleken minder stabiel dan de protonen, elektronen, neutrino's en fotonen die we tegenwoordig overal in de kosmos kunnen waarnemen.

Maar toch, soms ontstaat plaatselijk weer een enorme concentratie van energie waaruit nieuwe materie ontstaat. En – misschien een schrale troost voor Millikan – juist kosmische straling veroorzaakt in de atmosfeer continu zulke energieconcentraties en creëert hierdoor nieuwe deeltjes. Dat zijn geen atomen, zoals Millikan dacht, maar bijvoorbeeld positronen of muonen. Deze continue stroom is een deel van de *natuurlijke achtergrondstraling* die je op elke willekeurige plaats op aarde kunt meten, samen met deeltjes die vrij komen bij verval van radioactieve stoffen in de aardkorst.

Hoe door kosmische straling nieuwe deeltjes ontstaan en hoe ze vervallen, is het onderwerp van dit hoofdstuk. Met het bijbehorende kaartspel 'Hadronen – Big Bang kaartspel 1' kun je die processen naspelen. Aan het einde van dit hoofdstuk begrijp je iets beter waarom er in het universum protonen, elektronen, neutrino's en fotonen zijn overgebleven en waarom geen andere deeltjes. Toch blijven er ook voor de wetenschap nog grote raadsels. Zoals de vraag waarom er vooral materie is en slechts weinig antimaterie.

2.2 Wat behoudswetten doen

Deeltjes kunnen vervallen in andere deeltjes. Daarbij is niet alles mogelijk, er vinden alleen processen plaats waarbij bepaalde grootheden behouden zijn. Dat behoudswetten de mogelijke uitkomsten van een proces bepalen, zie je bijvoorbeeld ook in de mechanica, bij chemische reacties, en bij kernreacties. Voordat de processen met elementaire deeltjes aan de orde komen, bekijken we in deze paragraaf andere processen waarbij behoudswetten de mogelijke uitkomsten inperken.



Figuur 2.2 Mogelijke snelheden

Oriëntatieopdracht: Behoudend en beperkend

Vul bij elke letter uit het juiste begrip in. Kies uit: A, B, beginsituatie, cirkel, eindsituatie, energie, impuls, lijn, snelheid, snijpunten, twee, vlak. Gebruik figuur 2.2.

Een biljartbal rolt met een ...**a**... van v_1= 10 m/s recht op een even zware biljartbal af. Die andere biljartbal ligt stil. De v_2 van de beginsituatie is dus 0 m/s. Dit komt overeen met punt ...**b**... in figuur 2.2. Misschien weet je uit ervaring welke snelheden de beide biljartballen na de botsing zullen hebben. Hier gaan we *beredeneren* wat die snelheden worden. Als je niets weet, kan wat jou betreft het punt (v_1,v_2), dat de eindsituatie weergeeft, overal in het ...**c**... liggen. Maar je weet dat de totale ...**d**... behouden is. Dus

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2=\text{constant}$$

Omdat de massa's gelijk zijn, wordt dit $v_1^2+v_2^2=$ constant , en de constante is gelijk aan 100, die haal je uit de ...**e**.... Dit is de vergelijking van de ...**f**... in de figuur 2.2. De wet van behoud van ...**g**... beperkt dus de mogelijkheden, de oplossing ligt niet zomaar ergens in het ...**h**... maar op de ...**i**.... Er is ook de wet van behoud van ...**j**.... Die luidt

$$m_1v_1+m_2v_2=\text{constant}$$

Weer deel je de gelijke massa's weg en ken je de constante uit de ...**k**.... Je krijgt $v_2=10-v_1$, de vergelijking van de ...**l**... in figuur 2.2. Als je alleen de wet van behoud van ...**m**... zou hebben, wist je alleen dat de eindsituatie op de ...**n**... ligt. Ook deze wet beperkt de mogelijkheden. Als je beide wetten combineert, heb je twee eisen: de oplossing ligt zowel op de ...**o**... als op de ...**p**.... Je ziet dat daar slechts ..**q**... punten aan voldoen. Punt ...**r**... is de beginsituatie, punt ...**s**... is de eindsituatie. Biljartbal 1 ligt dan stil, biljartbal 2 heeft in de eindsituatie de ...**t**... die bal 1 had in de beginsituatie.

Oriëntatieopdracht:

Bedenk een ander voorbeeld waarin behoudswetten bepalen dat sommige uitkomsten van een proces niet mogelijk zijn.

Bij allerlei processen spelen behalve de wet van behoud van energie en de wet van behoud van impuls ook andere behoudswetten een rol. Steeds sluiten behoudswetten mogelijke uitkomsten uit. We vergelijken een aantal processen:

- **Scheikundige reacties**

Als bijvoorbeeld waterstof en zuurstof reageren, is het aantal waterstofatomen voor en na de reactie gelijk. Dat geldt ook voor het aantal zuurstofatomen. De aantallen atomen, en dus ook de aantallen kernen, zijn per soort behouden. Dit gebruik je bij het kloppend maken van de reactievergelijking:

$2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O$. Waterstof en zuurstof kunnen dus alleen in deze verhouding met elkaar reageren.

De energie opgeslagen in de bindingen neemt af, er komt warmte vrij, de totale hoeveelheid energie is behouden. De elektrische lading is ook behouden, want vooraf en na afloop is alles neutraal. Deze twee wetten gelden altijd, energie en elektrische lading zijn behouden grootheden.

- **α-verval**

Wat alchemisten voor elkaar probeerden te krijgen, het ene element in het andere veranderen, gebeurt vanzelf in vervalsprocessen. Als uranium vervalt ontstaat thorium. Daarbij wordt een α-deeltje uitgezonden, dat is niets anders dan een heliumkern. Het aantal uraniumkernen is niet behouden maar neemt af, het aantal thoriumkernen neemt toe. Zelfs het totale aantal kernen is niet behouden, er ontstaat namelijk ook een heliumkern.

Het is niet zo dat zomaar elk element kan ontstaan. Als je weet dat er sprake is van α-verval en je weet met welk element je begint, is bekend welk element ontstaat. De bepaling daarvan gaat met behulp van de wet van behoud van elektrische lading en de wet van behoud van massa:

Elke kern kun je weergeven met twee getallen: het **atoomnummer** Z is gelijk aan het aantal protonen, het **massagetal** A is gelijk aan het aantal kerndeeltjes, dus aan het aantal protonen plus het aantal neutronen. Bij α-verval is het totale aantal protonen voor en na de reactie behouden. Dat geldt ook voor het totale aantal neutronen. Zo is aan behoud van massa en aan behoud van elektrische lading voldaan. Je kunt deze regels gebruiken om de reactievergelijking kloppend te krijgen:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

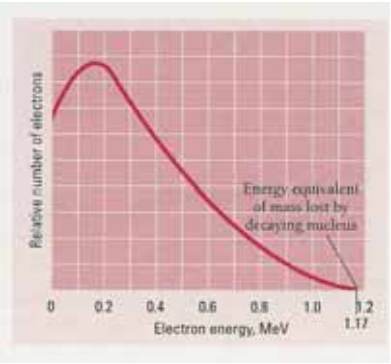
het totale aantal protonen is vooraf 92 en na afloop 90+2=92, het aantal neutronen is vooraf 146 en na afloop 144+2=146. (Merk op dat in kernreactievergelijkingen alleen de *kernen* van de elementen staan, er is niet aangegeven of het gaat om een neutraal atoom of een ion. In het voorbeeld hierboven ontstaan eigenlijk Th^{2-} en He^{2+}, maar dat is voor de kernreactievergelijking niet van belang.)

- **β-verval**

De reactievergelijking

$$^{137}_{55}\mathrm{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} + e^{-} + \overline{\nu}_e$$

is de vergelijking voor het verval van cesium. Ook deze reactie is een droom voor alchemisten: het ene element verandert in het andere. Het aantal protonen is niet behouden, dat is met één toegenomen, het aantal neutronen is ook niet behouden, dat is met één afgenomen. Er is dus geen algemene 'wet van behoud van aantal protonen' of 'wet van behoud van aantal neutronen'. De som van deze aantallen is in dit geval wel behouden. Een behoudswet die wel altijd geldig is, ook hier, is de wet van behoud van elektrische lading. Deze bepaalt welk element ontstaat.



Figuur 2.3 Energie van een elektron

N.B. In deze module noteren we een elektron als e^-, zoals hierboven. Als het gaat om het kloppen maken van een kernreactievergelijking, zoals veel gedaan wordt in de module over Medische Beeldvorming, is het handig om het elektron als ${}^{0}_{-1}e$ te noteren. Het massagetal is 0, de elektrische lading -1. Dan zie je meteen dat de elektrische ladingen (op de onderste regel) links en rechts van de pijl gelijk zijn, en de massagetallen (de bovenste regel) ook.



Figuur 2.4 Straatnaambord

Als je alleen kijkt naar behoud van elektrische lading zou het anti-neutrino niet nodig zijn. De 56 protonen en het elektron aan de rechterkant hebben samen dezelfde lading als de oorspronkelijke 55 protonen. Misschien heb je bij andere modules, bijvoorbeeld als het ging over medische toepassingen, de vergelijking wel zonder anti-neutrino gezien. Aanvankelijk dacht de wetenschap ook dat dat de volledige vergelijking was, maar er bleek een probleem te zijn met de totale energie. Zoals je in figuur 2.3 ziet, komt het elektron niet altijd met dezelfde energie uit de kern. In het voorbeeld van de grafiek zou aan de wet van behoud van energie worden voldaan als het elektron 1,17 Mev kinetische energie had, maar meestal is het minder. Wolfgang Pauli voorspelde in 1930 dat er een ander, moeilijk waarneembaar deeltje moest zijn, dat de rest van de energie mee zou nemen. Dan zou je kunnen blijven volhouden dat de wet van behoud van energie altijd geldig is. Dat deeltje dat de energie meeneemt bleek in dit geval het anti-neutrino te zijn, dat inderdaad is waargenomen, en waarvan je dus voortaan weet dat het in de reactievergelijking thuis hoort. Op de vraag waarom het een antineutrino is, en geen gewoon neutrino, komen we nog terug.

Aan de wetten van behoud van energie, impuls en elektrische lading wordt altijd voldaan. Het aantal protonen en het aantal neutronen zijn niet altijd behouden, zie bijvoorbeeld β-verval. In sommige processen zijn deze grootheden behouden, maar dat zijn geen algemeen geldende behoudswetten.

Na deze voorbeelden gaan we terug naar de processen met elementaire deeltjes. We zullen daarbij zien dat er twee nieuwe behoudswetten zijn, waar ook bovenstaande voorbeelden aan voldoen.

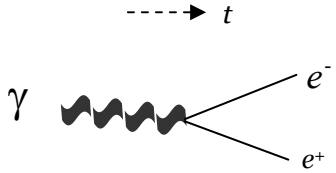
2.3 Paarvorming in airshowers

Hoe kan het dat geladen deeltjes uit de kosmos door lijken te kunnen dringen tot het aardoppervlak? Die vraag staat nog open uit hoofdstuk 1. In deze paragraaf volgt het antwoord, waarbij behouden grootheden een belangrijke rol spelen.

Wat er gebeurt als een deeltje de atmosfeer binnendringt, kun je zien in een animatie op de website van Drescher. Kijk op:
http://th.physik.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/

Als een foton met veel energie op materie botst, kan het in twee elektrisch geladen deeltjes met massa veranderen. Omdat er materie ontstaat, heet dit proces **creatie**. Fotonen uit de kosmische straling – de gammastraling - die in de atmosfeer komen, veroorzaken veel creatie. Bij dit proces wordt energie omgezet in massa via Einsteins formule $E = mc^2$, waar we in paragraaf 2.4 dieper op ingaan.

Het lichtste geladen deeltje dat uit een foton kan ontstaan is een elektron, e-. Tegelijk daarmee ontstaat een antideeltje van het elektron, het **positron**, e+. Dit is het soort deeltje dat Carl Anderson in 1932 tijdens zijn onderzoek aan airshowers ontdekte.



Figuur 2.5 Paarvorming

De creatie van het paar - na de botsing van een foton op materie - kan worden beschreven met een reactievergelijking:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

Links van de pijl in de reactievergelijking staat waar de gebeurtenis mee begint – in dit geval een foton γ – en rechts wat uit de gebeurtenis te voorschijn komt. Afhankelijk van de energie van het foton krijgen de deeltjes ook kinetische energie.

In de figuur 2.5 zie je hetzelfde proces grafisch weergegeven. De tijd verstrijkt van links naar recht, eerst is er een foton, weergegeven door een golflijntje, later is dat verdwenen maar zijn een elektron en een positron gecreëerd.

Bij creatie gelden de wetten van behoud van elektrische lading, impuls en energie, waarbij de massa via Einsteins formule ook meetelt bij de energie. Vanwege de wet van behoud van elektrische lading verschijnen bij creatie uit ongeladen fotonen altijd paren van identieke deeltjes waarvan het ene positief geladen is en het andere negatief. Vandaar dat men in plaats van de term creatie ook de term **paarvorming** gebruikt. Een paar bestaat uit een deeltje en zijn **antideeltje**. Dit is weer een voorbeeld van wat behoudswetten doen: ze perken de mogelijke uitkomsten van een proces in. Er kunnen bijvoorbeeld niet twee elektronen ontstaan uit een foton.

Voorbeeld - Paarvorming

Vraag
Bereken de energie E_f die een foton minstens moet hebben om een elektron-positronpaar te maken. Bereken daarbij de bijbehorende golflengte λ.

Antwoord
De massa van een elektron of positron is $9{,}1\cdot10^{-31}$ kg . De lichtsnelheid is $3{,}0\cdot10^{8}$ m×s^{-1}. Voor de energie van het foton geldt:

$$E_f = 2\cdot m\cdot c^2$$
$$E_f = 2\cdot 9{,}1\cdot10^{-31}\ \text{kg}\cdot(2{,}98\cdot10^{8}\ \text{m}\times\text{s}^{-1})^2 = 1{,}6\cdot10^{-13}\ \text{J}$$

De golflengte volgt uit $E_f = \dfrac{h\cdot c}{\lambda}$, waarin h de constante van Planck is:

$$\lambda = \frac{h\cdot c}{E} = \frac{6{,}6\cdot10^{-34}\ \text{J}\times\text{s}\cdot 3{,}0\cdot10^{8}\ \text{m}\times\text{s}^{-1}}{1{,}6\cdot10^{-13}\ \text{J}} = 0{,}12\cdot10^{-11}\ \text{m}$$

De creatie van een paar is omkeerbaar. Het positron verdwijnt als het botst met een elektron, die in de atmosfeer in grote aantallen aanwezig zijn. Voor de twee deeltjes met massa komen twee fotonen zonder massa in de plaats. Dit proces heet **annihilatie**. De reactievergelijking is:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Soms ontstaan zelfs meer dan twee fotonen. Het is niet mogelijk dat er slechts 1 foton ontstaat, omdat dan niet aan de wet van behoud van impuls kan worden voldaan. Het duidelijkst zie je dat als het elektron en het positron met gelijke snelheden op elkaar af komen. Dan is de totale impuls nul. Een foton, dat niet stil kan staan, kan nooit impuls nul hebben. Twee fotonen samen wel, als ze in tegengestelde richting bewegen.

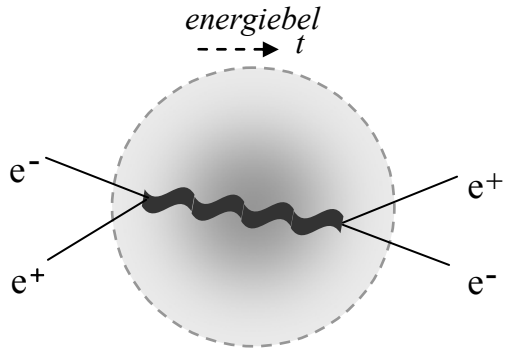
Veranderingen beschrijven

Een proces waarbij een of meer deeltjes van eigenschap veranderen, kun je op twee manieren beschrijven:

1 *Met een reactievergelijking*. Die begint met de symbolen van de deeltjes voor de verandering, gevolgd door een pijl met daarachter de symbolen van de deeltjes na de verandering. Bijvoorbeeld, de reactievergelijking die je kent voor een annihilatie is

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

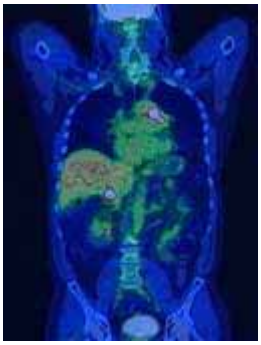
2 *Met een diagram*. In figuur 2.5b staat voor het proces waarbij een elektron en een positron annihileren en daarna niet twee fotonen maar op-



Figuur 2.5b

nieuw een elektron en positron ontstaan. De oorspronkelijke deeltjes staan links, de deeltjes na de verandering rechts. De richting wordt vastgelegd door een pijl voor de tijd t . Quarks en leptonen worden altijd getekend met getrokken lijnen, krachtdeeltjes met golfjes. De hellingen van de lijnen en golfjes hebben geen betekenis. In het diagram zijn de veranderingen binnen een energiebel, dat is een tijdelijke concentratie van energie, getekend. Wat daar gebeurt wordt niet waargenomen, daarom noemen we de processen binnen de energiebel 'virtueel'. De deeltjes buiten de energiebel voor en na het deeltjesproces worden wel echt waargenomen, dit is het reële proces.

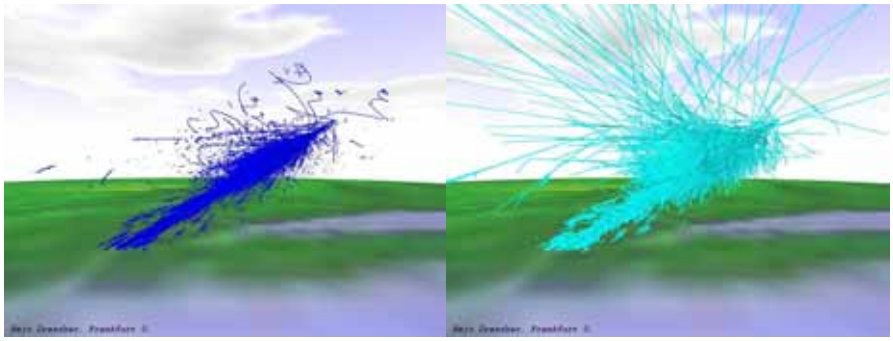
Annihilatie bij een PET-scan


Figuur 2.6 PET-scan

Bij de medische beeldvormingstechniek PET (Positron Emission Tomography) wordt van annihilatie, en vooral van het feit dat daarbij *twee* fotonen vrijkomen, gebruik gemaakt om te zien waar in een orgaan veel stofwisseling is en waar weinig. Daartoe wordt een radioactieve stof geïnjecteerd die in het orgaan doordringt. Men kiest hiervoor een radioactie stof die bij verval positronen uitzendt, zogenoemde β^+ straling. Die positronen staan al snel bijna stil door botsingen. Dan treedt annihilatie op met een elektron (die zijn overal in het weefsel aanwezig) waarbij twee fotonen in tegengestelde richtingen worden uitgezonden. Dit wordt waargenomen met een ring van detectoren. Alleen metingen waarbij tegenover elkaar liggende detectoren gelijktijdig een foton registreren, tellen mee. Die zijn niet afkomstig van de achtergrondstraling (wat voor een los foton best zou kunnen), maar van de annihilatie in het te onderzoeken orgaan.

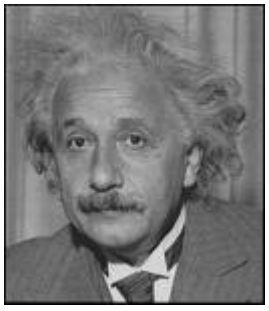
Airshowers

Een foton uit de kosmische straling brengt een kettingreactie van creaties en annihilaties teweeg. De twee nieuwe fotonen uit een annihilatie hebben minder energie dan het oorspronkelijke enkele foton. Toch kan deze hoeveelheid voldoende zijn om een nieuw paar van een e^+ en een e^- te maken. Dat heeft dan wel minder kinetische energie dan een voorafgaand paar. Enzovoort, tot de energie van de fotonen onvoldoende is om een deeltjespaar zonder kinetische energie te maken. Voor het zover is, neemt het aantal elektronen en positronen exponentieel met de tijd toe. Een dergelijke kettingreactie in de atmosfeer, waarbij een lawine van deeltjes en fotonen ontstaat, noemt men een airshower.



Figuur 2.7 Airshower. Het linker plaatje laat zien waar elektronen en positronen in een airshower voorkomen. Rechts staat een verdeling van de fotonen in dezelfde airshower. Bezoek http://th.physik.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/ voor een animatie.

2.4 Massa, energie en impuls



Figuur 2.8 Albert Einstein

Deeltjes met massa veranderen in fotonen zonder massa, en omgekeerd. Hoe kan dit? Wat verandert er niet en wat verandert wel bij deeltjesprocessen? Bij deze vragen moeten we eerst iets zeggen over de relativiteitstheorie.

Albert Einstein besefte als eerste dat massa correspondeert met energie. Hij drukte dit uit in de formule

$$E = mc^2$$

Hierin is m de massa van een deeltje in kg en is c de lichtsnelheid in ms^{-1}. Bij deze eenheden is E de energie van het deeltje in J. Alleen als het deeltje in rust is, heeft het een energie gelijk aan $E = mc^2$. Bij deze **rustenergie** komt nog kinetische energie als het deeltjes beweegt. Meer daarover staat in hoofdstuk 4.

Dit betekent dat er niet twee afzonderlijke behoudswetten zijn, van energie en van massa, maar één gezamenlijke behoudswet. Bij een scheikundige reactie is het nog heel zinvol om het behoud van energie los te zien van het behoud van massa, want de hoeveelheid materie (het aantal atoomkernen) verandert daarbij nooit. Bij elementaire deeltjes kan er wel materie verdwijnen en in energie veranderen, of omgekeerd. Daarom rekenen we daarbij de massa van het materiële deeltje eerst om in rustenergie en tellen daar vervolgens andere vormen van energie bij op.

Massa en energie in airshowers

Van een kosmisch deeltje dat een airshower veroorzaakt kan nooit alle energie in massa worden omgezet. Het kosmische deeltje heeft immers een grote hoeveelheid impuls en volgens de wet van behoud van impuls blijft die in de airshower voortdurend aanwezig. Vandaar dat een airshower een gerichte bundel deeltjes is, zoals je in de animaties kunt zien. Dit is alleen mogelijk als de deeltjes in de airshower voldoende snelheid hebben. Van de energie van het kosmische deeltjes blijft dus aan het einde altijd een deel als kinetische energie aanwezig.

Bewegende deeltjes hebben niet alleen energie vanwege de corresponderende massa maar ook kinetische energie en impuls. Bij de reacties in airshowers en deeltjesversnellers moet daarmee rekening worden gehouden. Daarbij gelden namelijk de wetten van behoud van energie en impuls:

- de totale energie blijft behouden, ofwel $\Sigma E_{\text{voor}} = \Sigma E_{\text{na}}$
- de som van de impuls blijft behouden, ofwel $\Sigma \vec{p}_{\text{voor}} = \Sigma \vec{p}_{\text{na}}$

Voor deeltjes met massa geldt daarbij dat de kinetische energie gelijk is aan $E_{\text{kin}} = 1/2\ mv^2$ en de impuls aan $p = m \cdot v$. Voor fotonen is de energie gelijk aan $E = h \cdot f$ en de impuls is gelijk aan $p = h \cdot f / c$.

Voor airshowers betekent dit dat de energie van de kosmische deeltjes nooit volledig in massa kan worden omgezet. Voor het behoud van de impuls is immers snelheid en dus bewegingsenergie nodig.

De eenheid MeV/c^2

Gebaseerd op de formule van Einstein gebruikt men in de deeltjesfysica een andere eenheid van de massa dan de kilogram, namelijk de eenheid $\frac{\text{MeV}}{c^2}$.

Als je de energie uitdrukt in MeV, wordt de eenheid voor massa:

$$m = \frac{E}{c^2} \quad \rightarrow \quad \text{eenheid } \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

$$1\ \frac{\text{MeV}}{c^2} = 1\ \frac{10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 1{,}8 \cdot 10^{-30}\ \text{kg}$$

Rekenvoorbeeld

Vraag

De massa van een muon (μ) is gelijk aan $106\ \frac{\text{MeV}}{c^2}$. Reken dit om in kg.

Antwoord

$$m_\mu = 106\ \frac{\text{MeV}}{c^2} = \frac{106 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{(3{,}0 \cdot 10^8\ \text{m} \times \text{s}^{-1})^2} = 19 \cdot 10^{-29}\ \text{kg}$$

Om uit fotonen nieuwe deeltjes met een massa te laten ontstaan, moet er in elk geval genoeg energie bij elkaar komen om die massa te maken. Het hangt van het soort deeltje af, hoeveel dat is.

Rekenvoorbeeld

Vaak wordt voor de massa van een elektron $m = 0,51 \ \frac{\text{MeV}}{c^2}$ gegeven. In de formule van Einstein vallen dan de c^2 in de teller en noemer tegen elkaar weg. De energie die een foton minstens moet hebben om een elektron-positronpaar te maken is dan:

$$E_f = 2 \cdot 0,51 \, c^2 \cdot \frac{\text{MeV}}{c^2} = 1,02 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Creatie van zwaardere leptonen, quarks en baryonen

Er kan ook paarvorming optreden van zwaardere leptonen. Bijvoorbeeld een muon en een anti-muon, de leptonen van de tweede generatie uit tabel 1 van hoofdstuk 1. De reactievergelijking bij creatie uit een foton is dan:

$$\gamma \rightarrow \mu^- + \mu^+$$

Er kan bij paarvorming uit een foton zelfs een tauon τ^- en antitauon τ^+ ontstaan met massa's die ruim 3500 keer zo groot zijn als die van elektronen volgens de reactievergelijking

$$\gamma \rightarrow \tau^- + \tau^+$$

Er worden deeltjes uit de derde generatie gecreëerd. Daarvoor is dan wel een foton met veel energie nodig. Tijdens de Big Bang was de concentratie van energie groot genoeg om muonen of tauonen te creëren. Later was dit niet meer het geval en vervielen ze in elektronen en neutrino's, die in het huidige heelal dominant zijn. Verderop, in de extra paragraaf over de zwakke kernkracht, wordt uitgelegd waarom zware naar lichte leptonen vervallen. Daar komen we ook terug op de rol van neutrino's. In het huidige stadium van het heelal ontstaan muonen en tauonen alleen bij heftige botsingen. Bijvoorbeeld bij botsingen met kosmische straling of in speciale botsingsexperimenten.

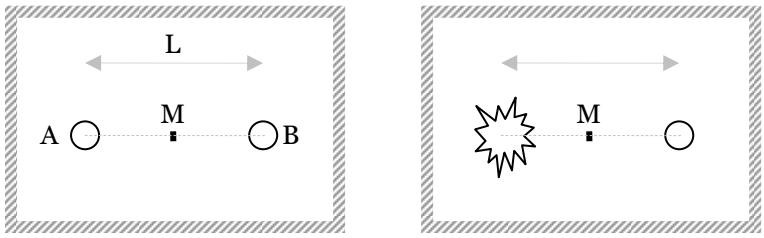
Ook quark-antiquarkparen kunnen uit een foton worden gecreëerd. Complicatie is dat quarks en antiquarks nooit los kunnen voorkomen. De meest voorkomende combinaties zijn uud, het proton, en udd, het neutron. De algemene term voor deze deeltjes die bestaan uit drie quarks, is **baryon**. Ook deze deeltjes met massa kunnen uit fotonen worden gecreëerd, en als een baryon en een antibaryon elkaar tegenkomen annihileren ze tot fotonen.

Extra - equivalentie van energie en massa

Tot aan het einde van de 19de eeuw beschouwde men massa en energie als twee los van elkaar staande grootheden. Nog altijd worden beide begrippen tegenover elkaar geplaatst alsof ze elkaar uitsluiten. De formule van Einstein legt men bijvoorbeeld vaak uit alsof massa in energie wordt omgezet en dan als massa verdwijnt. Of dat energie verdwijnt als er massa uit energie ontstaat. Dat is onjuist. De energie en de massa bestaan tegelijkertijd: massa is energie, en energie heeft massa! Om dit aannemelijk te maken beschrijven we een gedachte-experiment.

Beschouw een systeem van twee stilstaande deeltjes A en B met de massa *m*. De afstand tussen hun middelpunten is L. Het systeem is in rust, dit wil zeggen er werken geen krachten tussen dit systeem en de omgeving: de impuls van het systeem is gelijk aan 0. Samen vormen de deeltjes een systeem met het zwaartepunt M halverwege tussen A en B.

Extra – (vervolg)



Stel nu dat de massa van A plotseling in energie wordt omgezet volgens $E=mc^2$ en dat deze energie geen massa zou hebben. Er zou dan een systeem overblijven met het zwaartepunt M in het middelpunt van B. Maar een verplaatsing van het zwaartepunt houdt in dat het systeem een impuls heeft ten opzichte van de omgeving. Dat is niet te rijmen met de aanname dat er geen krachten werken tussen het systeem en de omgeving. De impuls van het systeem blijft alleen gelijk aan 0 als de vrijgekomen energie een massa m heeft in het oorspronkelijke middelpunt van A. Ook al is er bij A geen sprake meer van 'materie, er is wel massa. Energie heeft massa!
De massa van een systeem die bij elk proces behouden blijft, noemt men de invariante massa.

2.5 Nog meer behoudswetten

Er zijn nog meer behoudswetten die de mogelijke uitkomsten van een deeltjesproces beperken, dan de behoudswetten die behandeld zijn. We bekijken eerst waarom dat wel zo moet zijn: er zijn processen die volgens de behandelde wetten zouden kunnen, maar die in de natuur niet plaatsvinden.

Als alleen de wetten van behoud van energie, impuls en elektrische lading zouden gelden, zou

- uit een foton een elektron en een proton kunnen ontstaan
- een proton kunnen vervallen in twee positronen en een elektron
- een proton kunnen veranderen in een elektron en twee positieve pionen (positief geladen deeltjes die bestaan uit een quark en een antiquark).

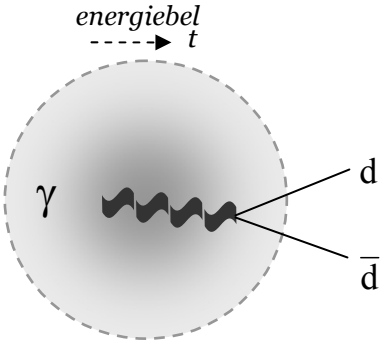
Zo zijn er talloze voorbeelden te bedenken, maar ze gebeuren niet.

Behoudswetten van leptongetal, quarkgetal

Het blijkt dat deeltjesprocessen aan extra eisen voldoen:

- Bij een deeltjesproces blijft de som van de **leptongetallen per generatie** gelijk. Als het aantal leptonen met één toeneemt, neemt het aantal antileptonen ook met één toe. Als het aantal leptonen met één afneemt, neemt het aantal antileptonen ook met één af. Hierbij heeft elk lepton het getal +1 en geldt elk antilepton als -1 deeltje. Dit geldt *voor elke generatie apart*, dus uit een foton kan niet een elektron met een antimuon ontstaan, of een muon met een positron, maar wel een elektron met een positron.

- Bij een deeltjesproces blijft de som van de **quarkgetallen per generatie** gelijk. Als het aantal quarks met één toeneemt, neemt het aantal antiquarks ook met één toe. En als het aantal quarks met één afneemt, neemt het aantal antiquarks ook met één af. Hierbij heeft elke quark het getal +1 en elke antiquark -1. Ook deze regel geldt voor elke generatie apart.



Figuur 2.9 Quark-antiquarkpaar

In het voorbeeld uit figuur 2.9 creëert een foton een quarkpaar. Het foton heeft geen quarkgetal (het quarkgetal is gelijk aan 0), dus ook de quarks moeten samen het quarkgetal 0 hebben. Dat kan alleen met een quark en een antiquark van dezelfde generatie, een down- en een antistrange-quark kunnen bij dit proces niet ontstaan.

De bovengenoemde behoudswetten gelden voor alle processen met elementaire deeltjes. En de gevolgen ervan zijn ook waarneembaar in processen met grotere en samengestelde deeltjes.

Samengestelde deeltjes

Klassiek is de beschrijving van het verval van een neutron in een proton. Aanvankelijk dacht men 90 jaar geleden nog dat een neutron verandert in een proton en een elektron. Nu weten we dat dit niet kan. Weliswaar kloppen de elektrische ladingen, maar het leptongetal zou met 1 toenemen. Er moet dus nog een niet-elektrisch geladen antilepton ontstaan van dezelfde generatie als het elektron. In de tabel in hoofdstuk 1 vind je dat dit het anti-elektronneutrino is. De juiste reactievergelijking is:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \overline{\nu}_e$$

Dit is het proces dat ook binnen een grotere kern kan plaatsvinden. Bij een β-verval als

$${}^{137}_{55}\mathrm{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} + e^- + \overline{\nu}_e$$

verandert er binnen de kern een neutron in een proton. Ook deze vergelijking voldoet, net als het onderliggende verval van het neutron, aan de wet van behoud van leptongetal. Het verval van een neutron is de meest voorkomende oorzaak van radioactiviteit die gepaard gaat met β-straling.

De behoudswetten voor de quarks doen zich bij samengestelde deeltjes ook op grotere schaal gelden. Je hebt gelezen dat baryonen bestaan doordat drie quarks bij elkaar blijven. Als niet elke quark tegelijk annihileert met z'n antiquark, dan blijft het groepje (het baryon) altijd bestaan. Met noemt dit **de wet van behoud van baryongetal**.

In de reactievergelijking voor het neutronverval hierboven is aan het begin van het deeltjesproces het baryongetal van het neutron gelijk aan +1. Na het deeltjesproces heeft alleen het proton een baryongetal en dat is gelijk aan +1. Aan de behoudswet is dus voldaan. Dit geldt ook voor de reactievergelijking van het radioactieve verval van Cs. Voor en na de reactie is het aantal baryonen 157, terwijl de som van de leptongetallen gelijk is aan 0.

Bij kernfysica en in de scheikunde speelt de wet van behoud van baryongetal een grote rol: de som van de massagetallen (het totale aantal protonen en neutronen) blijft bij elk proces gelijk.

Redeneervoorbeeld:

In het eerste foutieve voorbeeld dat in deze paragraaf werd genoemd, werd verondersteld dat uit een foton een elektron en een proton ontstaan. Maar dat voldoet niet aan de wet van behoud van leptongetal (want dat aantal zou met één toenemen) en ook niet aan de wet van behoud van baryongetal (want dat aantal zou ook met één toenemen).

Symmetrie: meestal kan het omgekeerde proces ook plaatsvinden

Als een proces wat betreft de wet van behoud van leptongetal en de wet van behoud van baryongetal kan plaatsvinden, dan geldt dat automatisch ook

voor het omgekeerde proces. Creatie van een elektron-positronpaar is mogelijk, annihilatie van zo'n paar ook.

Toch is het niet altijd zo eenvoudig. Als je in de vervalsvergelijking

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \overline{\nu}_e$$

de pijl omdraait, krijg je een proces dat in principe mogelijk is. Maar het is erg onwaarschijnlijk, omdat dan drie deeltjes elkaar op hetzelfde moment moeten tegenkomen. Van die drie deeltjes is het antineutrino ook nog eens zeldzaam.

Een proces met een neutrino bij de vervalsproducten in plaats van een antineutrino bij de begindeeltjes, voldoet ook aan de wet van behoud van leptongetal. Je krijgt dan

$$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

Dit proces heet K-vangst. Het vindt soms plaats in zware atomen, waar de binnenste elektronen (de K-elektronen) zich dicht bij de kern bevinden.

Wat betreft de wet van behoud van baryongetal en de wet van behoud van leptongetal kan een proton vervallen volgens

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Er is dan geen elektron bij de deeltjes waarmee het proces begint, maar een positron bij de vervalsproducten. Dit proces kost energie. Daarom zal een vrij proton nooit vervallen. In kernen kan dit wel plaatsvinden. Dit heet β^+ verval. Er wordt door de kern een positron uitgezonden, in plaats van het elektron dat wordt uitgezonden bij gewoon β verval.

2.6 Kracht als uitwisseling van virtuele fotonen

De volgende stap in het verhaal lijkt heel vreemd. Maar hiermee kunnen eigenschappen van krachten worden verklaard, en het vreemde valt aan het eind toch weer mee.

De wet van behoud van impuls en de wet van behoud van energie zijn geldig voor alle processen. Maar de quantummechanica zegt dat de energie helemaal niet precies vastgelegd kan worden. In de keuzemodule *Quantumwereld* wordt de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg uitgelegd, hier gebruiken we alleen het resultaat. Als je een heel korte tijd bekijkt (in formuletaal: als Δt klein is), dan is er een onzekerheid in hoe groot de energie is. De grootte van die onzekerheid in energie is ΔE. Het verband wordt gegeven door

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

De letter *h* stelt de constante van Planck voor. Dus voor kortere tijden is er een grotere onbepaaldheid in de energie.

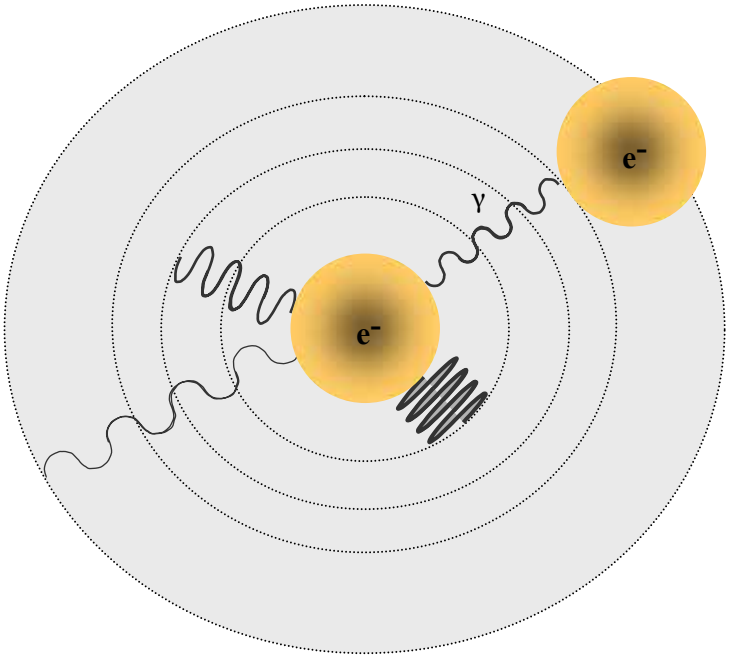
Dit betekent dat er energie kán zijn, maar dat er even later niets meer van te merken is. Een elektron is door deze onbepaaldheid in de energie omringd door een 'wolk' van fotonen die uit het niets opduiken en ook weer snel verdwijnen. Ze heten virtueel omdat ze niet zelf worden waargenomen, alleen de gevolgen van hun korte bestaan zijn zichtbaar. In figuur 2.10 zijn vier virtuele fotonen om een elektron getekend. Deze fotonen hebben verschillende hoeveelheden energie en omgekeerd evenredig daarmee een verschillende

'virtuele' levensduur. Bereikt een foton tijdens zijn virtuele leven een ander elektrisch geladen deeltje, bijvoorbeeld een elektron, dan draagt dit zijn energie echt aan dat deeltje over. Het wordt geabsorbeerd door het andere elektron.

Noch bij het uitzenden van een virtueel foton noch bij het absorberen is aan de wet van behoud van energie voldaan, maar over het geheel wel. Wonderlijk, als het maar heel kort duurt dan kan er eventjes extra energie zijn.

Het effect lijkt op wanneer iemand een basketbal naar iemand anders gooit. De werper voelt een soort terugstoot, de vanger voelt ook een kracht. Het uitwisselen van virtuele fotonen leidt tot een kracht tussen de elektronen. (De basketbal is natuurlijk maar een analogie, op deze manier kun je wel een afstotende kracht verklaren, niet een aantrekkende.) We noemen daarom het foton het 'krachtdeeltje' van de elektromagnetische kracht.

Als de elektronen verder uit elkaar zijn, moeten de fotonen langer bestaan om de afstand te overbruggen. Δt is dan groter, dus ΔE moet kleiner zijn. Er zijn dus minder mogelijkheden voor het overzenden van virtuele fotonen. Dit is een intuïtief argument waarmee je kunt begrijpen dat de kracht op grotere afstand kleiner is. En dat is inderdaad het geval voor de elektrische (Coulomb) kracht tussen ladingen.



Figuur 2.10 Virtuele fotonen tussen elektronen

Reflectieopdracht: Als het goed is weet je nu meer over deeltjes en hun interacties dan toen je aan deze module begon. Maak nu de opdrachten op bladzijde 7 opnieuw. Geef bij de lijst beweringen niet alleen aan of ze waar of onwaar zijn, maar leg ook steeds uit waarom je dat antwoord kiest. Geef ook aan wat je nog steeds niet weet.

Reflectieopdracht: Schrijf een uitleg van een halve bladzijde waarin je inzoomt op een mens: “Een mens is een paar meter groot, heeft een massa van enkele tientallen kilogrammen. Ze is opgebouwd…”. Zoom in tot het allerkleinste niveau. Je uitleg moet geschikt zijn voor iemand die deze module niet heeft gelezen.

Reflectieopdracht: Geef met voorbeelden aan welke rol behoudswetten spelen in deeltjesprocessen.



Figuur 2.10 't Hooft licht toe

Vraag van Lucas aan Gerard ‘t Hooft: Uit de analogie van het overgooien van een basketbal tussen twee mensen die op het ijs staan, begrijp ik dat het uitwisselen van fotonen een kracht kan opleveren tussen geladen deeltjes. Maar ik begrijp niet hoe dit een aantrekking kan opleveren. Is er een voorbeeld dat daar gevoel voor geeft?

Inderdaad: fotonen leveren een afstotende kracht als de ladingen een gelijk teken hebben en een aantrekkende kracht als de ladingen verschillend van teken zijn. Je moet eigenlijk quantummechanica gestudeerd hebben om goed te begrijpen hoe dat kan, want dan leer je te BEREKENEN hoe die krachten werken en dan laten we alle vage praatjes voor wat ze zijn: vage praatjes. Maar goed, je hebt verscheidene jaren universitaire studie nodig om dit een beetje te leren begrijpen, en tot die tijd moeten we ons dus behelpen met vage praatjes. Hier komt er dan zo eentje:

Datgene wat we LEGE RUIMTE (vacuüm) noemen, is helemaal niet zo leeg, hij zit tot berstens toe vol met "virtuele fotonen". Het vacuüm is niets anders dan precies die toestand waarin die fotonen kunnen verkeren die zodanig is dat de TOTALE ENERGIE zo klein mogelijk is. Dat betekent dat je een foton uit het vacuüm kunt "lenen" als je hem maar snel weer teruggeeft. De onzekerheidsrelatie van Heisenberg geeft als voorwaarde dat

$$\Delta E \cdot \Delta t = \text{ongeveer } \frac{h}{4\pi}.$$

Hier is ΔE de onzekerheid in de energie en Δt de onzekerheid in de tijd. h is de constante van Planck. Komt erop neer dat je ΔE aan energie uit het vacuum mag halen als je die maar binnen een tijdsinterval Δt weer teruggeeft. Fotonen in het vacuüm komen van alle kanten op je af, dus een geladen deeltje kan best een foton uit het vacuüm halen dat komt vanuit een punt diametraal tegenover waar die andere lading zit. Die andere lading ziet een "gat" op zich afkomen: een plaats waar een foton had moeten zitten dat er niet is. Dat deeltje stopt weer een foton in dat gat. En dat foton vervolgt zijn weg, weer diametraal tegenovergesteld van de richting waar het eerste deeltje zat. Het vacuüm is dan weer hersteld: de energie is weer minimaal. Maar nu hebben de twee (tegengesteld) geladen deeltjes een "gat" uitgewisseld in plaats van een foton. Dat gat had negatieve energie en brengt daarom een aantrekkende kracht teweeg in plaats van een afstotende. Je kunt je ook de fotonen voorstellen als een"gas" onder zekere druk, en de druk in de ruimte tussen de geladen deeltjes is wat lager. Die ruimte wordt dus ineengeperst, zodat de deeltjes elkaar aantrekken.

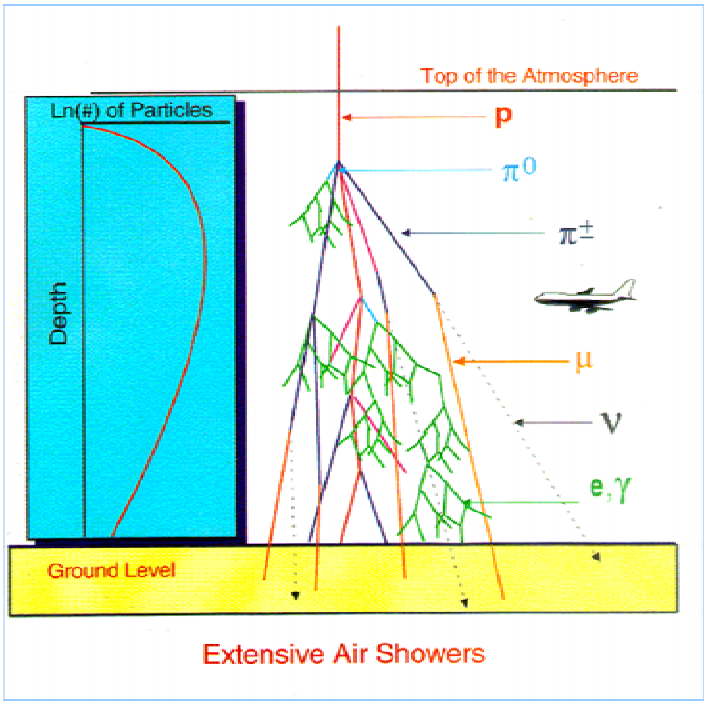
De basisstof van hoofdstuk 2 gaat tot hier. Je weet nu hoe deeltjes ontstaan en verdwijnen en je hebt gezien hoe behoudswetten bepalen welke processen zich tussen deeltjes kunnen afspelen. Ook heb je gezien dat de elektrische kracht kan worden gezien als uitwisseling van virtuele deeltjes. Al deze processen kun je beschrijven met reactievergelijkingen en met diagrammen.

Nu volgt een verdiepingsparagraaf waarin processen tussen quarks worden beschreven. Hoofdstuk 3 is extra stof, waarin het hele bouwwerk van het standaardmodel, inclusief de zwakke kernkracht wordt beschreven. In hoofdstuk 4 gaat de basisstof verder met het bekijken van een aantal meer technische toepassingen en experimenten die met deeltjesprocessen te maken hebben.

2.7 Verdieping: De `kleurlading' van quarks

Airshowers die veroorzaakt zijn door de protonen of zwaardere atoomkernen hebben een andere samenstelling dan airshowers veroorzaakt door fotonen. In figuur 2.11 is schematisch een door een proton veroorzaakte airshower getekend. Er komen deeltjes in voor die nog niet genoemd zijn: eerst ontstaan bijvoorbeeld veel pionen (π), zowel positief en negatief geladen pionen ($\pi^{\pm}$) als ongeladen pionen (π^{o}). Dichter bij het aardoppervlak vervallen de pionen in muonen (μ^{-}), elektronen (e^{-}), neutrino's (ν) en fotonen (γ). De fotonen kunnen weer het begin zijn van een kettingreactie van creaties en annihilaties. De grafiek in figuur 2.11 laat zien dat het aantal deeltjes per m^2 maximaal is op ongeveer 10 km hoogte (boven de gebruikelijke vlieghoogtes).

Dat een proton of een zwaardere atoomkern een ander type airshower veroorzaakt dan een foton komt door de samenstelling van die deeltjes. Nog maar enkele decennia geleden werd aangetoond dat in protonen en neutronen drie elementaire deeltjes bij elkaar gehouden worden, de zogeheten **quarks**. In deze paragraaf noemen we eerst de eigenschappen van quarks. Daarna leggen we uit welke combinatie van quarks in een proton of een neutron aanwezig is, en welke andere deeltjes mogelijk zijn.



Figuur 2.11 Deeltjes in een airshower

Eigenschappen van quarks

Typerend voor quarks is dat, zolang ze heel dicht bij elkaar zijn, ze vrij kunnen bewegen. Maar naarmate ze verder van elkaar zijn, werkt er een aantrekkingskracht die sterker is bij grotere afstand. Quarks trekken elkaar aan, alsof er een koord tussen zit. De kracht die dit doet, is de sterke kernkracht. Deze kracht geeft de deeltjes die bestaan uit quarks, zoals het proton en het neutron, een grote stabiliteit.

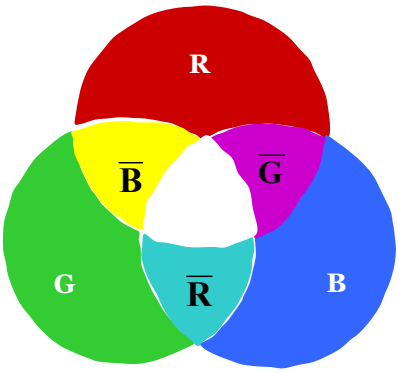
Een andere bijzonderheid van quarks is dat hun elektrische lading gelijk is aan ±1/3 of ±2/3 keer de elementaire lading (dit is de lading van een proton.) Door de sterke kernkracht kunnen quarks echter niet verder dan ongeveer 1 fm (1 femtometer is 10^{-15} m) van elkaar weg zijn. Dat is dan ook de diameter van protonen en neutronen. Van de afzonderlijke (gebroken) ladingen van de quarks (±1/3 e of ±2/3 e) merk je daarbuiten niets meer. De elektrische lading van deeltjes die je vrij kunt waarnemen is altijd een geheel aantal keer de elementaire elektrische lading.

Sterke kracht en kleur

In analogie met elektrische kracht en elektrische lading wordt verondersteld dat quarks een nieuw soort lading hebben die hoort bij de sterke kernkracht. Deze bijzondere soort lading wordt de **kleurlading** genoemd, en komt voor in drie verschillende kleuren rood, groen of blauw. Antiquarks hebben een tegengestelde elektrische lading en een ook tegengestelde kleurlading.

Let wel, quarks hebben in werkelijkheid geen kleur; het is slechts een aanduiding van een nieuwe eigenschap. De reden is dat quarks slechts in bepaalde combinaties blijken voor te komen. Natuurkundigen hebben hier regels voor opgesteld. Deze regels blijken precies overeen te komen met regels van de kleurendriehoek. Hoe dit werkt, lees je hieronder. Vandaar de benaming kleurlading. De kleurlading wordt meestal kortweg kleur genoemd.

Kleuren, antikleuren en wit



Figuur 2.12 Kleurendriehoek

De 3 kleurlading van quarks worden met de 3 primaire kleuren rood (R), blauw (B) en groen (G) aangeduid. De sterke kernkracht bindt deze kleuren aan elkaar en maakt er een *wit* mengsel van. Wit ontstaat door menging van de primaire kleuren (RGB), zoals wordt weergegeven in een kleurendriehoek.
Antiquarks zijn als het ware het spiegelbeeld van gewone quarks, als je let op de kleur en op de elektrische lading. Hun elektrische lading is tegengesteld aan die van de gewone quarks. Verder hebben ze altijd een antikleur. Dit kan antirood $\overline{R}$, antigroen $\overline{G}$ of antiblauw $\overline{B}$ zijn. In de kleurendriehoek zijn dit de complementaire kleuren: cyaan (groen + blauw), magenta (rood + blauw) en geel (groen + rood). Een antikleur is niets anders dan 'wit-min-de-kleur-zelf'. Het mengen van $\overline{R}$, $\overline{G}$ en $\overline{B}$ geeft wit. Ook ontstaat wit als een kleur met zijn antikleur mengt, bijvoorbeeld B en $\overline{B}$.

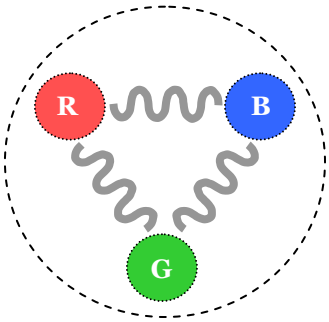
Quarks kunnen geen antikleur hebben en antiquarks geen gewone kleur.
In de volgende paragraaf wordt uitgelegd hoe uit quarks allerlei soorten deeltjes ontstaan, zoals protonen en neutronen. Met het Big Bang kaartspel 1 kun je dit ook naspelen.

Hadronen

De combinaties van gebonden quarks heten hadronen. Deze combinaties zijn altijd 'wit'. Het maakt niet uit welke quark welke kleur heeft. **Gluonen** zor-

gen ervoor dat de kleuren voortdurend van plaats veranderen, ze wisselen de kleuren tussen de quarks binnen het hadron uit.
Protonen, neutronen en pionen zijn voorbeelden van hadronen. Uit de beschrijving hierboven volgt dat hadronen ontstaan uit tweetallen of drietallen van quarks en antiquarks.

- Drietallen heten baryonen. Hiervan zijn protonen en neutronen voorbeelden.
- Tweetallen heten mesonen. Pionen horen bij deze groep.



Figuur 2.13 Baryon

Baryonen

In een baryon komen de kleuren R, G en B voor. Bestaat het baryon uit antiquarks dan zijn de kleuren $\overline{R}$, $\overline{G}$ en $\overline{B}$. In beide gevallen is het resultaat 'wit'. Protonen zijn de meest stabiele en bekendste baryonen. Ze bestaan uit 2 up-quarks en 1 downquark (*uud*) met de kleurcombinatie RGB.
In figuur 2.13 is een eenvoudig model van een baryon getekend. Van de quarks is de kleur ingevuld: R, G en B. De golfjes staan voor de sterke kernkracht die tussen op de kleur(ladingen) van de quarks werkt.

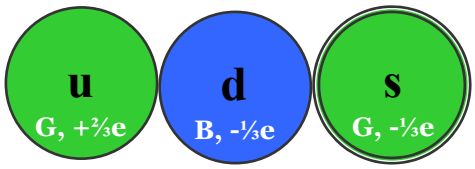
Voorbeeld - baryon

Er kan een neutraal baryon gemaakt worden met een u- een d- en een s-quark. De som van de elektrische ladingen is dan immers

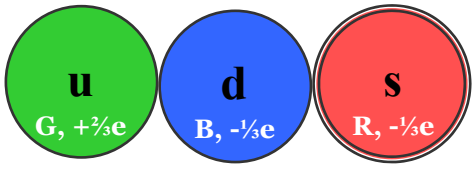
$+\frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e = 0$. Maar ook de som van de kleuren moet wit zijn.

We geven de quarks door gekleurde cirkels voor. In het midden is het symbool voor de quark. Daaronder staan de kleur en de elektrische lading. De dubbele ring om de s-quark geeft aan dat deze quark van de 2de generatie is.

Een uds-baryon kan *niet* bestaan uit de combinatie:



maar *wel* uit

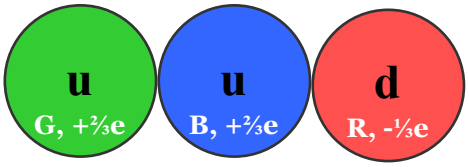


Dit is een zogeheten Σ^0-deeltje, ook wel Λ-deeltje genoemd.

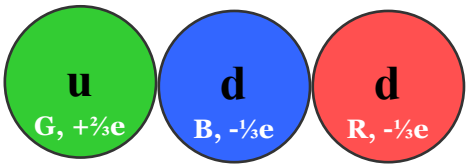
De kleuren kunnen op 6 verschillende manieren over de 3 quarks zijn verdeeld.

Voorbeeld –proton en neutron

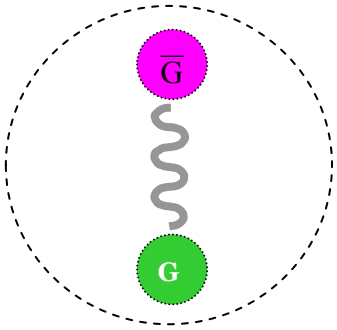
Een proton kan bestaan uit een combinatie van up- en downquarks waarvan de som van de elektrische ladingen gelijk is aan +1 e. De som van de kleuren is gelijk aan 0, 'wit'.



Een neutron bestaat uit een up- en twee downquarks. De som van de elektrische ladingen is gelijk aan 0 en de kleur is wit:



In beide deeltjes kunnen de kleuren op 3 verschillende manieren zijn verdeeld (Het aantal is hier niet 6 omdat twee quarks dezelfde smaak hebben).



Figuur 2.14 Meson

Mesonen

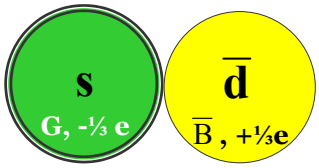
De mesonen bestaan altijd uit een quark en een antiquark. Alleen de kleurencombinaties $R\,\overline{R}$ of $G\,\overline{G}$ of $B\,\overline{B}$ maken – een wit – hadron. In figuur 2.14 is een meson getekend.

Dat alle hadronen als geheel "wit" zijn, houdt ook in dat "kleurlading" een behouden grootheid is. Naast impuls, energie, elektrische lading, leptongetal en baryongetal is dat een extra beperking die bepaalt welke reacties mogelijk zijn en welke niet.

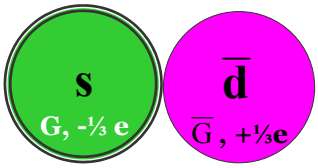
Voorbeeld - meson

De som van de elektrische ladingen van een *s*-quark en een $\overline{d}$ -quark is gelijk aan 0. Ze kunnen daarom samen een neutraal meson maken Maar dit gebeurt alleen als de som van de kleuren gelijk is aan 0, dus wit is.

Dus niet:



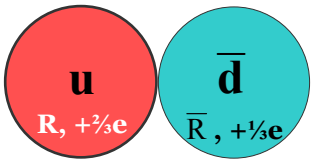
maar wel:



Het geldige meson is een zogeheten K^0-meson.

Voorbeeld - π^+

In airshowers komt het volgende π^+-meson voor:



De combinatie is 'wit' en heeft de lading +1e. Er zijn 2 andere kleurencombinaties mogelijk.

Energiebellen

Een botsing van een proton met de kern van een zuurstof- of stikstofatoom in de atmosfeer is een botsing van drie quarks met een grote groep quarks. De botsing is nog gecompliceerder dan een botsing op een poolbiljart, het is alsof je een handvol kiezels in een ballenbak gooit.

In korte tijd wordt zoveel energie in de verzameling quarks geconcentreerd dat hieruit meerdere deeltjes met een massa kunnen ontstaan. Er is even sprake van een 'energiebel' waarbij de energie in nieuwe deeltjes uit elkaar spat: quarks, leptonen en fotonen. De sterke kernkracht zorgt er vervolgens voor dat de quarks snel worden gegroepeerd. Er ontstaan combinaties die tijdens de Big Bang heel gewoon waren, maar intussen allang verdwenen zijn. Bijvoorbeeld de pionen, waarvan de meeste amper 10 ns bestaan en dan weer in muonen vervallen. En ook die vervallen weer. Van een enkel kosmisch deeltje met veel energie blijft uiteindelijk een enorm aantal stabiele deeltjes met weinig energie over: fotonen, elektronen, protonen en neutrino's.

In airshowers vinden dus processen met quarks en leptonen plaats die ook in een vroeg stadium van het universum plaatsvonden. Je zou kunnen zeggen dat kosmische straling hoog in de atmosfeer een permanente reeks Mini Bangs veroorzaakt.

Begrippen

Basisstof:

- Annihilatie en creatie/paarvorming
- Deeltjesreactievergelijking
- Reactiediagram
- Virtueel deeltje
- Leptongetal
- Quarkgetal
- Baryongetal

Toepassing van:

- Behoud energie en impuls
- E, f en λ van fotonen
- Annihilatie, creatie
- Reactievergelijkingen en diagrammen
- PET-scan

Verdieping:

- Kleurlading
- Hadron (wit, heeltallige elektrische lading)
- Baryon, Meson
- Gluon

Samenvatting

- In de mechanica, de scheikunde en de kernfysica zorgen **behoudswetten** dat bij veranderingsprocessen een beperkt aantal uitkomsten mogelijk is.
- Uit een foton kunnen deeltjes met massa ontstaan, dit heet **creatie**.
- Behoudswetten leggen vast dat uit een foton niet zomaar van alles kan ontstaan, maar alleen bepaalde combinaties van deeltjes: Er ontstaat altijd een deeltje met zijn **antideeltje.** Daarom wordt creatie ook wel paarvorming genoemd.
- Uit een paar kunnen weer fotonen ontstaan, het paar verdwijnt daarbij. Dit omgekeerde proces van creatie heet **annihilatie**.
- De **wet van behoud van impuls** legt vast dat bij annihilatie altijd twee fotonen ontstaan die in tegengestelde richting bewegen. Bij het maken van een PET-scan wordt daar gebruik van gemaakt.
- Bij *alle* processen wordt voldaan aan de **wet van behoud van energie**, van **impuls**, en van **elektrische lading**.
- De massa van deeltjes die ontstaan of verdwijnen telt daarbij mee voor de energie, via $E=mc^2$. **Massa is een vorm van energie**.
- De elektrische kracht tussen deeltjes komt tot stand door de uitwisseling van **virtuele fotonen**.
- Alle processen voldoen aan de wet van **behoud van leptongetal**. Leptonen hebben leptongetal +1, antileptonen hebben leptongetal -1. Het behoud van leptongetal geldt per generatie, dus apart voor elektron en positron met de bijbehorende neutrino's; voor muon, antimuon en de daarbij horende neutrino's; en voor tauon, antitauon en bijbehorende neutrino's.
- Daarom verschijnt bij **β- verval** behalve een elektron ook een anti-elektronneutrino.
- Alle processen voldoen aan de wet van **behoud van quarkgetal**. Quarks hebben quarkgetal +1, antiquarks hebben quarkgetal -1.
- Daardoor is er ook **behoud van baryongetal**. Baryonenzijn deeltjes die bestaan uit drie quarks. Baryonen hebben baryongetal +1, antibaryonen hebben baryongetal -1.

Extra stof

- Bij processen tussen quarks speelt ook **behoud van kleurlading** een rol.

Opgaven

§2.2

16 Welke wetten?

a. Door welke twee wetten wordt de uitkomst van een botsing tussen twee biljartballen bepaald?
b. Zijn deze wetten ook geldig bij β-verval?
c. Leg uit dat de regels 'de totale lading is behouden' en 'het totale aantal protonen en het totale aantal neutronen zijn elk afzonderlijk behouden' geldig zijn bij een scheikundige reactie.
d. Leg uit dat de regels 'de totale lading is behouden' en 'het totale aantal protonen en het totale aantal neutronen zijn elk afzonderlijk behouden' geldig zijn bij α-verval.
e. Leg met een voorbeeld uit dat één van de twee bovenstaande regels geen algemeen geldende behoudswet is. Geef dus een voorbeeld waarin niet aan die regel is voldaan.

17 In de zon

In het centrum van de zon worden netto vier protonen en twee elektronen omgezet in een ^{4}He-kern en twee neutrino's

a. Geef de reactievergelijking van dit proces.
b. Noem zoveel mogelijk behoudswetten waaraan hier is voldaan.

18 Splijting

Bij een splijtingsreactie in een kerncentrale wordt eerst een neutron opgenomen in een uraniumkern. De kern die ontstaat is instabiel en valt in twee grote brokken uit elkaar. Er ontstaan nieuwe neutronen. In een boek staat de vergelijking als volgt weergegeven:

$$n + {}^{235}U \rightarrow {}^{236}U^{*} \rightarrow {}^{90}Kr + {}^{143}Ba + 3n$$

a. Alle deeltjes horen een getal linksonder en een getal linksboven te hebben. Schrijf de vergelijking over, maar nu met de atoomnummers er bij, en met massagetallen bij alle deeltjes.
b. Leg uit hoe je kunt afleiden dat er inderdaad drie neutronen ontstaan, als je weet dat Kr-90 en Ba-143 ontstaan.
c. Leg uit dat dit proces tot en kettingreactie kan leiden: een zichzelf versterkend proces.

§2.3

19 Postiljon d'amour

Een foton kan pas veranderen in een elektron-positronpaar als het in de atmosfeer botst met materie. Hoe dit samenhangt met behoudswetten is

ingewikkeld, maar je kunt toch weten dat het wel zo moet zijn, dat zonder andere materie paarvorming niet zomaar gebeurt. Leg uit welke waarneming aantoont dat fotonen niet in een vacuüm tot paarvorming kunnen overgaan.

20 Reactievergelijkingen

a. Het muon heeft ook een antideeltje, het antimuon μ^+. Een foton kan een muon en een antimuon creëren. Geef hiervoor de reactievergelijking.

Het antideeltje van het proton is het antiproton. Symbool $\overline{p}$. Uit de annihilatie van een proton en een antiproton kunnen verscheidene nieuwe deeltjes voortkomen. Stel dat onmiddellijk na de annihilatie alleen een elektron-positronpaar wordt gevormd (er worden geen fotonen waargenomen).

b. Geef van dit proces de reactievergelijking.

c. Stel dat uit de annihilatie wel fotonen vrijkomen en dat beide fotonen een elektron-positronpaar vormen. Geef de reactievergelijking voor de hele keten.

21 Airshower

Bij de eerste botsing van een bepaald geladen kosmisch deeltje met een atoom in de atmosfeer ontstaat een positron met een energie van $2 \cdot 10^{12}$ eV . Dit positron botst en annihileert met een stilstaand elektron. Hierna volgt een reeks creaties en annihilaties van elektron-positronparen.

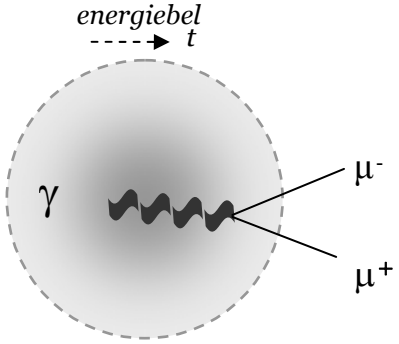
Neem aan dat elk foton in de reeks opnieuw tot paarvorming leidt als de energie van het foton groter is dan 1 MeV. Neem gemakshalve ook aan dat een positron 50% van de energie heeft van het positron dat het laatst is geannihileerd.

a. Bereken hoeveel stappen de reeks maximaal telt.

b. Bereken bij deze aannames hoeveel positronen in de reeks minimaal ontstaan.

c. Geef twee redenen waarom het aantal dat bij vraag b is berekend hoger kan uitvallen.

d. Tot nu toe is buiten beschouwing gebleven dat bij elke stap van de reeks voldaan moet zijn aan de wet van behoud van impuls. Leg zonder berekening uit dat het minimum in werkelijkheid lager zou kunnen zijn dan in vraag b wordt bedoeld.



Figuur 2.17

22 Vergelijkingen en diagrammen

a. Hoe heet het proces in figuur 2.17?

b. Schrijf dit proces als reactievergelijking.

c. Hoe heet het proces $e^+ + e^- \rightarrow \gamma+\gamma$?

d. Teken het diagram van dit proces.

23 PET-scan

Bij een patiënt wordt een PET-scan gedaan. Hij krijgt F-18 ingespoten. Dit zorgt voor positronen, via een proces dat lijkt op β-verval. In plaats van een elektron wordt een positron uitgezonden. Het proces het β^+ verval. Er komt behalve een positron ook een neutrino vrij.

a. Geef de reactievergelijking van het vervalproces.

b. Leg uit dat voor het beantwoorden van de vraag “Welk element ontstaat in deze vervalsreactie?” het neutrino niet belangrijk is.

c. Noem een behoudswet waarvoor het neutrino niet belangrijk is.

d. Het neutrino is wel van belang voor twee andere behoudswetten. Welke?

Het ontstane positron en een deeltje uit het weefsel annihileren even later.

e. Wat voor deeltje is dat andere deeltje?

f. Leg uit hoe bij het maken van een PET-scan gebruik wordt gemaakt van de wet van behoud van impuls.

§2.4

24 Massa is energie

a. Bereken hoeveel energie de massa van je eigen lichaam vertegenwoordigt.

b. Welk percentage is dit van het jaarlijkse energieverbruik in Nederland ($3,4 \cdot 10^{18}$ J)?

c. Bereken de energie die nodig is voor de creatie van een paar van muon en een antimuon, in J en eV.

d. Een kernenergiecentrale produceert gemiddeld ongeveer 2 GW. Bereken hoeveel massa hierdoor in 1 jaar verdwijnt.

25 Massa MeV/c²

a. Van een muon is de massa $106\ \frac{\text{MeV}}{c^2}$. Reken dit om in kg.

b. Bereken de massa in kg die overeenkomst met $9 \cdot 10^{13}$ eV.

c. Bereken de massa van een proton ($1,67 \cdot 10^{-27}$ kg) in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$.

d. De detector die wordt gebruikt bij een PET-scan is gevoelig voor fotonen met energie 511 keV. Leg uit waarom

26 In een versneller

Bij botsingen van protonen en antiprotonen in grote deeltjesversneller ontstaan soms paren van τ^- en τ^+. De massa van een proton is $0,94\ \frac{\text{GeV}}{c^2}$ en van een tauon $1,8\ \frac{\text{GeV}}{c^2}$.

a. Schrijf de reactievergelijking op als gegeven is dat er geen fotonen vrijkomen.

b. Leg uit dat aan de paarvorming energie moet worden toegevoerd.

§2.5

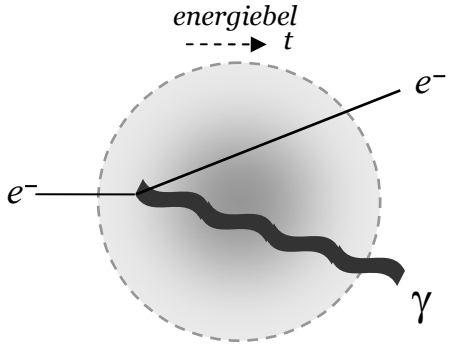
27 Processen die voldoen aan alle wetten

Leg bij elk van de volgende wetten uit hoe ze voldoen aan de wet van behoud van leptongetal en aan de wet van behoud van baryongetal.

a. α-verval

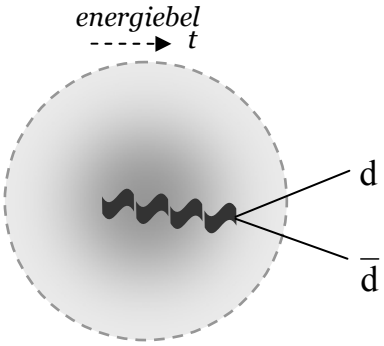
b. β-verval, bijvoorbeeld ${}^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + \text{e}^- + \overline{\nu_e}$

c. Het proces in figuur 2.18



Figuur 2.18

d. Paarvorming van elektronen en positronen.
e. Annihilatie van een proton en een antiproton.



Figuur 2.19

28 Voldoet dat aan de wetten?

Leg bij elk van de volgende processen uit of het mogelijk is, of dat het vanwege een behoudswet niet kan plaatsvinden. Leg in het laatste geval uit welke behoudswet zou worden geschonden.

a. Uit een foton ontstaan een elektron en een proton.
b. Het proces in figuur 2.19.
c. Uit een foton ontstaan een proton en een antiproton.
d. Een proton vervalt in twee positronen en een elektron.
e. Uit een foton ontstaan een tauon en een positron.



Figuur 2.20

29 PET en de wet

Een patiënt krijgt N-14 ingespoten. Dit zendt een positron uit.
Daarbij ontstaat nog een deeltje. Is dat een neutrino of een antineutrino?

§2.6

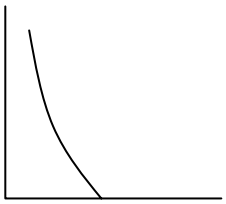
30 Zware virtuele deeltjes uitwisselen

De (elektrische) Coulombkracht is evenredig met $\frac{1}{r^2}$. Je kunt deze kracht begrijpen als uitwisseling van virtuele fotonen.

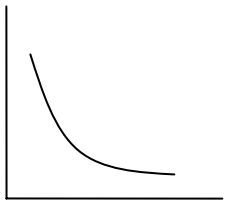
W-bosonen zijn de krachtdeeltjes van een andere kracht, de zwakke kernkracht. Ze hebben een massa van 80.000 MeV/c^2.
De zakke kern kracht, die verantwoordelijk is voor radioactief verval, komt dus tot stand door de uitwisseling van virtuele W-bosonen. Dit zijn zware deeltjesWe beredeneren of de zwakke kernkracht sneller naar nul gaat dan $\frac{1}{r^2}$, even snel, of langzamer.

a. Wat kun je zeggen over de massa van een W-boson vergeleken met de massa van een foton?
b. Wat heeft dit voor gevolgen voor de energieën van de virtuele W-bosonen in vergelijking met fotonen?
c. Wat heeft dit voor gevolg voor hoe lang deze deeltjes kunnen bestaan?

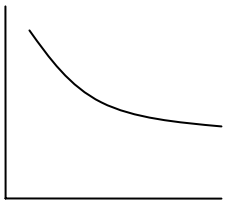
d. Waarom betekent dit dat W-bosonen minder ver kunnen komen dan fotonen?
e. Welke figuur, 2.21a, 2.21b, of 2.21c geeft het beste weer hoe de zwakke kernkracht verandert als functie van de afstand?
f. Geef een argument waarom te verwachten is dat het graviton, als het direct wordt aangetoond, massa nul zal hebben.



Figuur 2.21a



Figuur 2.21b



Figuur 2.21c

§2.7

31 Quarks bij elkaar

Quarks zijn altijd zo gegroepeerd dat de totale kleurlading 'wit' is. Leg uit dat dit op twee manieren kan.

32 Gebroken ladingen

Quarks hebben lading ±1/3 of ±2/3 van de lading van een elektron, waarbij het teken ± niet 'plusminus' betekent, maar '+ of –'. Ze kunnen niet los bestaan, deeltjes die je waarneemt hebben altijd heeltallige lading.

Leg uit dat er combinaties van drie quarks kunnen bestaan.

a. Geef een voorbeeld van zo'n combinatie.
b. Kan een combinatie van een quark en een anti-quark bestaan?

33 Extra - Protonen en neutronen

a. Waarom zijn protonen en neutronen geen elementaire deeltjes?
b. Wat is de quarksamenstelling van een proton en een neutron?
c. Ga na op hoeveel verschillende manieren de kleurladingen in een proton verdeeld kunnen zijn over de quarks.
d. Idem in een neutron

34 Quarks uit elkaar trekken?

Als quarks uit elkaar worden getrokken, kost dat een energie $E=F\cdot u$, met F de min of meer constante kracht, en u de uitrekking. Als het uitrekken te ver gaat, worden uit deze energie een quark en een anti-quark gecreëerd. De quarks kunnen daarna in verschillende combinaties gegroepeerd worden. Dit proces voldoet aan een aantal behoudswetten.

a. Aan welke behoudswetten moet het eindresultaat voldoen?
b. Hoeveel energie is minimaal nodig om een quark-antiquarkpaar te laten ontstaan?
c. Al na enkele femtometers uitrekking ontstaat een quark-antiquarkpaar. Maak een schatting van de grootte van de veerconstante C.

3 Extra: Standaardmodel

Hoofdstukvraag	**Hoe zit het bouwwerk van alle deeltjes en alle krachtdeeltjes in elkaar?**

3.1 Wat is het standaardmodel?

De theorie over de elementaire deeltjes heet het **standaardmodel**. Dit standaardmodel beschrijft de eigenschappen van afzonderlijke elementaire deeltjes en de krachten die tussen de deeltjes werken. Het verklaart hoe deeltjes ontstaan, veranderen en verdwijnen. Deze paragraaf gaat over de manier waarop het standaardmodel deeltjesprocessen beschrijft. Als toepassing daarvan bekijken we opnieuw de annihilatie en paarvorming via de elektromagnetische kracht.

Wisselwerking: Behoudswetten en kracht

In het universum zijn de totale energie, impuls, elektrische lading en kleurlading constant. Wat wel kan veranderen is de hoeveelheid van elk van die eigenschappen voor een afzonderlijk deeltje. Deeltjes kunnen eigenschappen uitwisselen. Bijvoorbeeld: de elektrische lading van een deeltje verandert alleen als er uit de omgeving lading bij komt of als er lading aan de omgeving wordt afgegeven. Bij elementaire deeltjes gebeurt het uitwisselen van eigenschappen met de omgeving door krachtdeeltjes.

Omdat de deeltjes die een eigenschap uitwisselen een impuls hebben, manifesteert de wisselwerking tussen deeltjes zich altijd als een kracht. Kracht is immers impulsverandering per tijdseenheid. Daarom noemen we zulke uitwisselingsdeeltjes **krachtdeeltjes**.

Er zijn 3 verschillende manieren waarop elementaire deeltjes elkaar beïnvloeden. Namelijk door:

1 het uitwisselen van kleur tussen quarks. Dit manifesteert zich als de **sterke kernkracht**. Het krachtdeeltje dat kleuren overbrengt is een **gluon** en dat koppelt ook alleen aan de eigenschap kleur. De gluonen houden quarks en antiquarks in witte combinaties bij elkaar.

2 het uitwisselen van elektrische energie tussen elektrisch geladen deeltjes. Dit is de werking van de **elektromagnetische kracht**. De energie wordt overgebracht door een **foton**, dat dus ook tot de groep krachtdeeltjes behoort. Fotonen koppelen alleen aan de elektrische lading van een deeltje, daarom hebben ze geen vat op neutrino's. Enkele processen met de elektromagnetische kracht worden beschreven in deze en de volgende paragraaf.

3 tenslotte is er de **zwakke kernkracht** die wordt overgebracht door **W- en Z- deeltjes**. Deze koppelen aan elk type quark of lepton, ongeacht de lading of de kleur, dus ook aan neutrino's. Door deze kracht veranderen

een quark of een lepton in een ander type deeltje. Een W-deeltje brengt zowel energie als elektrische lading over. De zwakke kernkracht wordt beschreven in paragraaf 3.2. Op het elektrisch ongeladen Z-deeltje gaan we in dit hoofdstuk niet in.

Hiermee zijn drie van de vier natuurkrachten genoemd. Het 'standaardmodel' verenigt deze drie krachten binnen een en dezelfde theorie. De vierde natuurkracht manifesteert zich tussen elementaire deeltjes vrijwel niet. Dat is de **gravitatiekracht**. Die werkt op de massa.

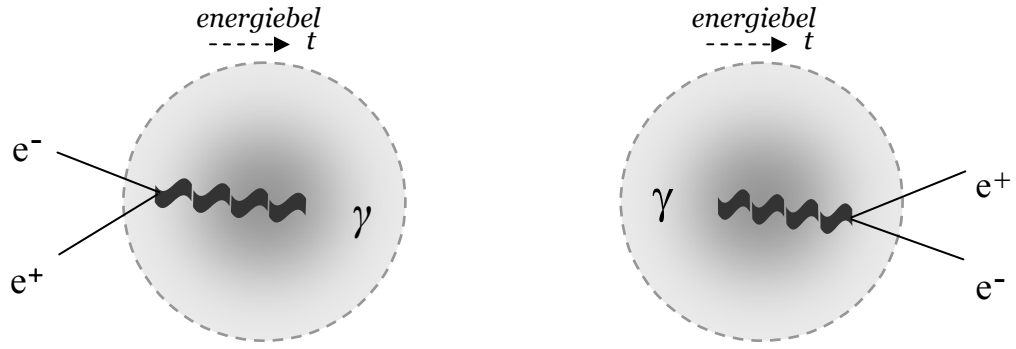
Hieronder staat een overzicht van de 3 soorten krachtdeeltjes met hun eigenschappen. Het krachtdeeltje van de gravitatiekracht is misschien het graviton, maar dit is (nog) niet aangetoond.

hoort bij	Naam Symbool	Koppelt aan	Massa MeV/c^2	Elektrische lading (e)	Kleuren
Sterke kernkracht	Gluon g	Kleurlading (kleur)	0	0	Kleur+ antikleur
Elektromagnetisme	Foton γ	Elektrische lading	0	0	0
Zwakke kernkracht	W- en Z-deeltje W^+ W^- Z^0	'Zwakke lading' Dit staat in feite voor elk type deeltje. Bij quarks noemt men de 'zwakke lading' ook wel 'smaak'.	80.000 80.000 91.000	+1 -1 0	0 0 0

Tabel 3 Drie soorten krachtdeeltjes

We laten deeltjesprocessen altijd in een energiebel plaatsvinden. De virtuele krachtdeeltjes binnen de energiebel gaan heel snel over in reële deeltjes.

Deze afspraak leidt ertoe dat we een reëel proces in twee stappen moeten beschrijven. Bij de eerste stap ontstaat er een virtueel deeltje. Bij de tweede stap gaat het virtuele deeltje over in twee reële. In figuur 3.1 ontstaat na de annihilatie van een elektron en een positron een nieuw elektron-positronpaar.



Figuur 3.1

Symmetrie

Elk proces dat bestaat kan ook in de omgekeerde richting plaatsvinden. Je kunt de figuur omklappen en de pijl voor de tijd andersom zetten. Men noemt dit tijdsymmetrie. Bedenk daarbij wel dat de wetten van behoud van energie en impuls gelden.

Een andere vorm van symmetrie is ladingsymmetrie. Van elk proces met gewone quarks of leptonen bestaat ook het spiegelbeeld: een proces waarbij de deeltjes de tegengestelde elektrische ladingen en –bij quarks- de tegengestelde kleur hebben.

Voorbeelden

Hieronder staan enkele voorbeelden van reactievergelijking en diagrammen met virtuele deeltjes.

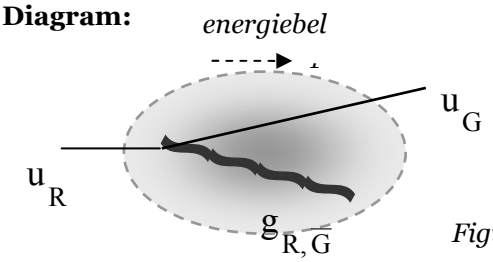
Voorbeeld - kleur verwisselen

Een u-quark (*u*) kan van rood (R) in groen (G) veranderen door het uitzenden van een virtueel gluon (*g*). In het diagram noteren we de kleur met een letter bij het symbool van de quark en het gluon. We tekenen alleen de u-quark en niet de groep quarks waar die deel van uit maakt.

Reactievergelijking:

$$u_R \rightarrow u_G + g$$

Diagram:



Figuur 3.2

Uitleg aan welke behoudswetten is voldaan:

Aan dit proces zie je dat een gluon een gemengde kleur heeft. Hier geldt de wet van kleurbehoud en dit betekent dat in het gluon rood achterblijft. Bovendien moet het gluon anti-groen zijn om de nieuwe kleur van de quark te neutraliseren.

Een quark kan ook van kleur veranderen door een gluon op te nemen. Dan verandert de kleur van de quark van rood naar groen als het gluon de kleuren antirood en groen heeft.

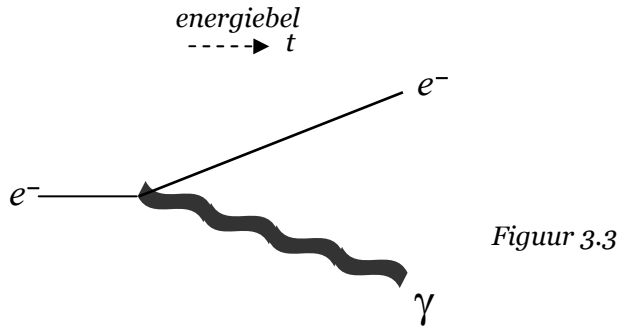
Voorbeeld - reëel foton

In het 2de voorbeeld staat een elektron (e^-) energie af, bijvoorbeeld als het in een atoom uit een aangeslagen toestand terugvalt naar de grondtoestand. Er komt dan een foton (γ) vrij.

Reactievergelijking:

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma$$

Diagram:



Figuur 3.3

Na de reactie heeft het elektron minder energie. Het foton voert energie naar de omgeving af. Het is een reëel foton, het blijft buiten de energiebel bestaan.

Extra - een nieuwe visie op kracht

Standaardmodel: een nieuwe visie op kracht

- In de antieke wereld zag men kracht uitsluitend als de bron van verandering. De Griekse filosoof Aristoteles bijvoorbeeld meende dat een beweging altijd door een kracht werd aangedreven. Omdat volgens hem vacuüm niet kon bestaan, dacht hij bovendien dat er bij het uitoefenen van een kracht altijd fysiek contact moest zijn. Het idee van kracht als bron van beweging verwees ook naar iets buiten de natuur: de 'onbewogen beweger' is in de filosofie van Aristoteles de ultieme – goddelijke - oorsprong van alle bewegingen door alle tijden heen.

- Newton luidde in de 17de eeuw het begin van de klassieke opvatting van kracht in. Hij geloofde dat er voor het uitoefenen van een kracht geen direct contact nodig was. De zon trekt immers de planeten aan terwijl er niets tussen zit. Bovendien dacht hij dat een kracht op elke afstand onmiddellijk werkt. Belangrijker is dat Newton krachten niet in de eerste plaats als oorsprong van verandering ziet – en zeker niet van beweging- maar als verschijningsvorm van een dieperliggend proces. Volgens Newton is in het universum de totale 'hoeveelheid beweging' (impuls) constant. En dat geldt voor elk systeem dat volledig van de omgeving is afgesloten. Wel kan er impuls tussen een systeem en de omgeving worden uitgewisseld. De som van de impulsen van het geheel verandert daarbij niet. Wel veranderen dan de impulsen van het systeem en de omgeving afzonderlijk. Wat de een erbij krijgt, gaat van de ander af. Newton definieert kracht nu als de impulsverandering per tijdseenheid.

Extra - een nieuwe visie op kracht (vervolg)

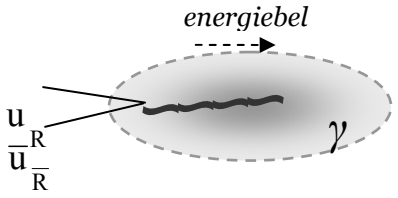
- Maxwell en Einstein hadden het inzicht dat een verstoring van de elektrische kracht, respectievelijk van de zwaartekracht, zich met een eindige snelheid (de lichtsnelheid) over de ruimte verbreidt. De moderne opvatting van het begrip kracht heeft daarna pas echt vorm gekregen in het standaardmodel. Volgens dit model is kracht een verschijnsel dat kan worden verklaard. Er wordt niet getwijfeld aan het bestaan van vacuüm, maar men ontkent dat kracht 'op afstand', dit wil zeggen: zonder fysieke tussenkomst van deeltjes, mogelijk is. Kracht is het gevolg van het uitwisselen van krachtdeeltjes. De krachtdeeltjes dragen eigenschappen als kleurlading, energie of elektrische lading van het ene elementaire deeltje naar het andere over. De som van die eigenschappen blijft daarbij onveranderd. Omdat deze krachtdeeltjes met zeer grote snelheid bewegen, hebben ze volgens de relativiteitstheorie een impuls. Het uitwisselen van kleurlading, energie en elektrische lading tussen elementaire deeltjes gaat daarom altijd gepaard met impulsverandering, dus met krachten. Het standaardmodel biedt tegenwoordig een beschrijving van 3 van de 4 fundamentele natuurkrachten: de sterke wisselwerking, de elektromagnetische – en de zwakke wisselwerking. Het standaardmodel heeft nog grote moeite met het beschrijven van de gravitatiekracht, omdat deze kracht op het niveau van de elementaire deeltjes bijna onwaarneembaar is.

3.2 Paarvorming volgens het standaardmodel

Eerder heb je gezien dat een elektron en een positron kunnen annihileren. Annihilatie en creatie komen ook bij quarks voor.

Annihilatie van quarks en elektrisch geladen leptonen

De dragers van elektromagnetische energie, de fotonen, koppelen aan alle elektrisch geladen deeltjes, dus ook aan quarks. Dit betekent dat creatie en annihilatie van quarks met fotonen mogelijk is. Net als bij elektronen en andere leptonen. In figuur 3.4 staat het diagram voor de annihilatie van een rood *u*-quark met een anti-rood anti-*u*-quark.



Figuur 3.4

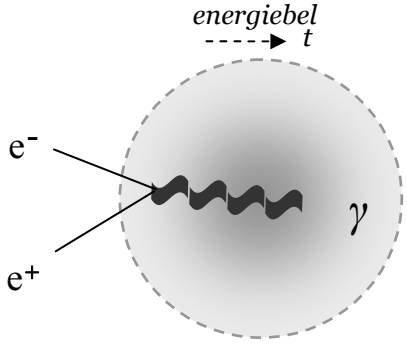
Merk op dat aan de wet van behoud van kleur is voldaan. Voor de annihilatie was de som van de kleuren gelijk aan 0 (wit) en ook het virtuele foton heeft geen kleur. Het foton is ook elektrisch ongeladen, en voor het proces was de som van de elektrische ladingen ook gelijk aan 0. De quarks moeten van dezelfde generatie zijn.

Dezelfde quarkcombinatie kan ook een gluon of een π^o-meson vormen. Dat gebeurt dan via de sterke kernkracht. Ook het gluon of meson zijn elektrisch neutraal en kleurloos.

Bij twee quarks met een geringe energie is de kans op het ontstaan van een foton groter dan de kans op een meson. Mesonen hebben immers een massa

en daarom is meer energie nodig om ze te produceren dan voor de massaloze fotonen.

De annihilatie van een lepton en een antilepton van dezelfde generatie kun je met een vergelijkbaar diagram beschrijven (zie figuur 3.5).



Figuur 3.5

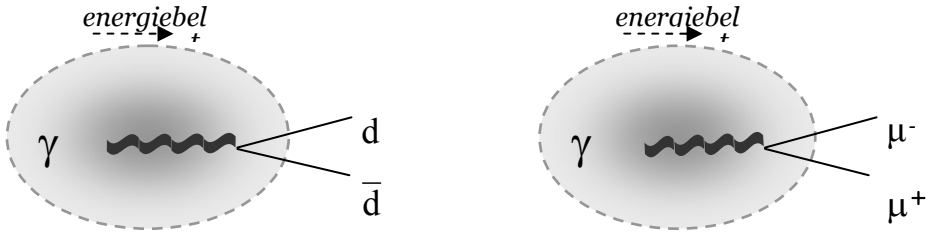
Bedenk dat het foton in dit diagram virtueel is, in tegenstelling met het geval dat beschreven is in paragraaf 2.2. Het virtuele foton moet zeer snel veranderen in twee deeltjes. Twee fotonen komen hiervoor niet in aanmerking, want fotonen koppelen niet aan fotonen. Ze zijn immers niet elektrisch geladen. Aan het ontstaan van twee reële fotonen bij annihilatie ligt een ander proces ten grondslag, dat we hier niet bespreken.

Creatie van quarks en elektrisch geladen leptonen

Zoals beschreven in paragraaf 2.2 is de creatie van een elektron en een positron uit een foton mogelijk. Het is ook mogelijk dat uit een foton een paar van twee quarks ontstaat. Fotonen koppelen immers alleen aan elektrische lading en quarks hebben elektrische lading. De kleur of de generatie van de quarks is voor fotonen niet relevant. Wel geldt volgens de behoudswetten dat

- beide quarks tot dezelfde generatie behoren
- de som van hun kleuren 'wit' is
- de som van de elektrische ladingen gelijk is aan 0.

In figuur 3.6 geven we 2 voorbeelden van creatie uit een virtueel foton. Namelijk van een $d\bar{d}$ -paar en van een $\mu^- \mu^+$ -paar.



Figuur 3.6

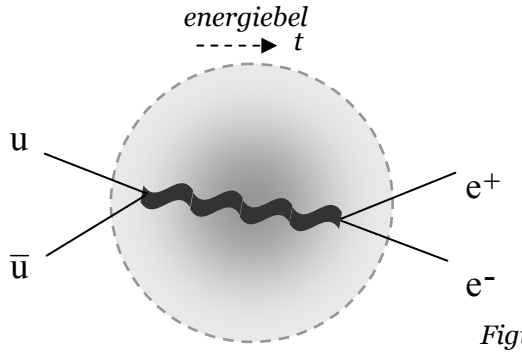
Fotonen koppelen niet aan neutrino's en niet aan andere fotonen

Omdat fotonen alleen koppelen aan elektrische lading, gaan ze geen reactie aan met neutrino's. Die hebben immers geen elektrische lading. En ook niet aan elkaar. In tegenstelling tot fotonen koppelen gluonen wel aan elkaar.

Gluonen hebben immers zelf ook kleur en daarom worden ze zowel door quarks als door andere gluonen aangetrokken. Hierdoor is te verklaren dat fotonen wel door het universum kunnen reizen, maar gluonen zich buiten atoomkernen niet manifesteren.

Redeneervoorbeeld

Beschouw het proces in figuur 3.7. Welke type wisselwerking speelt zich in de energiebel af?



Figuur 3.7

Bij een deeltjesproces moet je je altijd afvragen welk van de drie natuurkrachten werkzaam is. Maak daarbij gebruik van de beschrijving van de krachten en van de tabel met de krachtdeeltjes.

Je kunt als volgt redeneren:

- De sterke kernkracht komt niet in aanmerking. Deze kan namelijk niet koppelen aan leptonen.
- Het proces is mogelijk via de elektromagnetische kracht. Alle betrokken deeltjes hebben immers een elektrische lading en fotonen kunnen daaraan koppelen. Voor en na het proces is de som van de elektrische ladingen gelijk aan 0. Het krachtdeeltje draagt daarom geen elektrische lading en een foton is dus niet uitgesloten.
- Het proces is ook mogelijk via de zwakke kernkracht. Deze koppelt immers aan elk type elementair deeltje. Omdat het elektron en het positron elkaar neutraliseren, mag het krachtdeeltje geen elektrische lading hebben. Daarom komt alleen een ongeladen *Z*-deeltje in aanmerking.

Er komen dus twee oplossingen in aanmerking, een foton en een *Z*-deeltje. (In praktijk is bij lage energie de kans op een foton groter.)

Overigens, volgens de tijdsymmetrie is ook het omgekeerde proces mogelijk. Maar let wel: voor het ontstaan van de (veel zwaardere) quarks moeten het elektron en positron dan voor het proces veel energie en impuls hebben. Het veranderen van een quarkpaar in een lichter leptonpaar kan spontaan, omgekeerd niet.

3.3 De zwakke kernkracht

In hoofdstuk 2 heb je al gelezen dat in airshowers veel muonen voorkomen die ontstaan uit pionen. Dat is opmerkelijk: elementaire deeltjes van de ene familie veranderen in deeltjes van de andere familie. Je weet dat dit in bepaalde gevallen via annihilatie en creatie kan plaatsvinden. Maar er is nog een andere mogelijkheid, namelijk via de zwakke kernkracht, die een belangrijke oorzaak is van radioactiviteit in atoomkernen.

Verval van quarks en leptonen

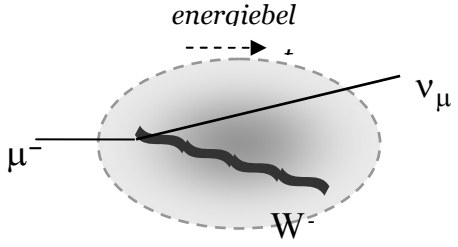
De zwakke kernkracht werkt op elk type elementair deeltje, op alle quarks en alle leptonen. Het is de enige kracht die ook op neutrino's werkt. De kleur van de quarks of de generatie vormen voor de zwakke kernkracht geen belemmering. Het is de enige kracht waarbij rechtstreeks een quark in een andere quark verandert of een lepton in een ander lepton. Het transport van elektrische lading en energie dat hierbij nodig is, vindt plaats via een *W*-deeltje. Het W^+ deeltje is positief geladen, het W^- deeltje negatief.

Verval van leptonen

Het eerste voorbeeld beschrijft de veranderingen van een muon in een muonneutrino en een *W*-deeltje. Het *W*-deeltje draagt de elektrische lading en het grootste deel van de energie van het oorspronkelijke muon. Het bestaat maar heel kort en vervalt even later in 2 andere deeltjes.

Reactievergelijking: $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^-$

Reactiediagram:



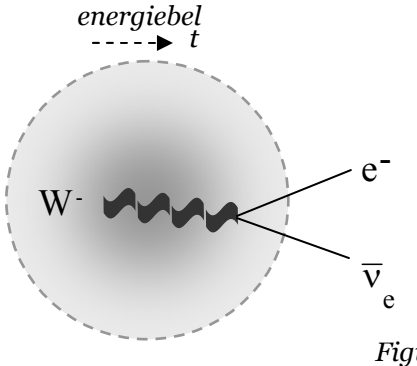
Figuur 3.8

Bij dit proces moet aan een aantal behoudswetten zijn voldaan:

1 Elektrische lading: het muon gaat met een lading van -1 e het proces in en het neutrino en *W*-deeltje komen er samen ook met -1 e uit.
2 Kleur: deze is voor en na het proces gelijk aan 0.
3 Generatie: als er voor het proces 1 lepton van generatie 2 was, dan moet er ook na het proces 1 deeltje van generatie 2 zijn. Dat kan in dit geval alleen het muonneutrino zijn. (Antideeltjes tellen voor -1, dus als het proces met een muon en een muonneutrino begint, dan is de som gelijk aan 0 en ontstaat alleen een *W*-deeltje dat voor de generaties neutraal is.)
4 Energie en impuls: uit een muon met weinig kinetische energie ontstaat via het *W*-deeltje alleen een lichter lepton of een lichter quark.

Na het beschreven proces ontstaan uit het *W*-deeltje nieuwe deeltjes. Uit wat hierboven bij punt 3 is gezegd volgt dat dit een deeltje en een antideeltje van dezelfde generatie moeten zijn. Samen zijn ze dan voor die generatie +1-1=0. Immers, het *W*-deeltje is voor de generaties neutraal (dus gelijk aan 0).

Uit het W^--deeltje kan bijvoorbeeld een elektron en een anti-elektron-neutrino ontstaan, zoals volgens het volgende reactiediagram:



Figuur 3.9

Dus eerst:

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^-$$

en daarna:

$$W^- \rightarrow e^- + \overline{\nu}_e .$$

De nettoreactie van de reële deeltjes is:

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \overline{\nu}_e$$

Dit is het eindstation van de muonen van alle airshowers.

Verval van quarks

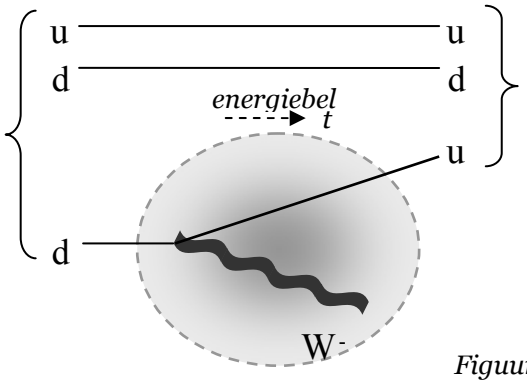
Ook bij quarks binnen een generatie treedt door de zwakke kernkracht verval op. Het voorbeeld hieronder beschrijft het spontane verval van een down-quark in een up-quark. Dit gebeurt spontaan in een vrij neutron, dat dan verandert in een proton.

Reactievergelijking:

$$d \rightarrow u + W^-$$

Bedenk hierbij dat de quarks nooit geïsoleerd voorkomen. De beschreven reactie is een onderdeel van een groter geheel, namelijk het proton.

Reactiediagram:



Figuur 3.10

Je zou het verval als volgt kunnen schrijven:

$$ddu \rightarrow duu + W^-$$

Bij dit verval van een quark gelden dezelfde behoudswetten als genoemd zijn bij het verval van muonen. Hier geldt het behoud van:

1 Elektrische lading: voor het verval $-\frac{1}{3}\mathrm{e}$, erna $+\frac{2}{3}\mathrm{e}-1\mathrm{e} = -\frac{1}{3}\mathrm{e}$.

2 Kleur: *u* houdt de kleur van *d*.

3 Generatie: voor het proces is er 1 quark van generatie 1. Het *W*-deeltje heeft geen generatie. Er moet dus een quark van generatie 1 uitkomen.

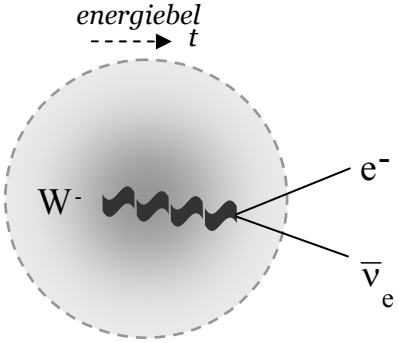
4 Energie en impuls: de *d*-quark is zwaarder en kan op deze manier spontaan vervallen. In een vrij neutron - buiten een atoomkern - gebeurt dit met een halveringstijd van 15 minuten. Vrije protonen vervallen niet omdat de *u*-quarks lichter zijn dan de *d*-quarks. De halveringstijd van protonen is maar liefst 10^{35} s.

Het W^- deeltje vervalt binnen zeer korte tijd tot een deeltje en een antideeltje van dezelfde generatie. Dit hoeft niet de generatie te zijn van het deeltje waarmee het proces begon. Bij spontane processen is het een lager generatie.

Voorbeelden zijn:

$$W^- \rightarrow e^- + \overline{\nu}_e$$

Reactiediagram:



Figuur 3.11

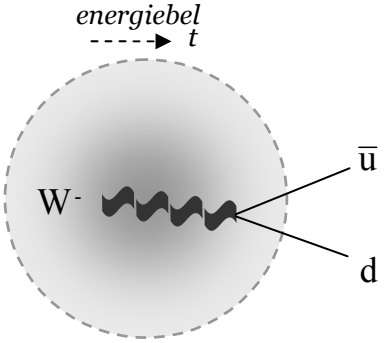
Merk op dat aan de behoudswetten voor kleur, elektrische lading en generatie is voldaan.

Bij deze reactie verlaten het elektron en het anti-elektronneutrino het proton. Men spreekt dan van β- straling.

Een andere reactie is:

$$W^- \rightarrow \overline{u} + d$$

Reactiediagram:



Figuur 3.12

Merk op dat aan de behoudswetten voor kleur, elektrische lading en generatie is voldaan.

β^+ verval

Het verval van *d*-quarks naar *u*-quarks in neutronen manifesteert zich in het dagelijkse leven als **radioactiviteit**. Het beschreven verval is de oorzaak van β^- -straling uit atoomkernen.

Binnen een atoomkern gaat een proton soms ook over in een neutron, maar dan is daar de hulp van een foton met veel energie bij nodig. Ga na dat dan β^+ (positronen) straling vrijkomt. Ook in sterren wordt aan veel protonen genoeg energie toegevoerd om te veranderen in een neutron. Op die manier ontstaan de neutronen die nodig zijn in atoomkernen.

Waarom werken kernkrachten niet buiten de atoomkernen?

In tegenstelling tot fotonen en gluonen hebben de *W*- deeltjes een aanzienlijke massa (80x de massa van een proton). Vanwege hun massa bewegen ze niet met lichtsnelheid, in tegenstelling tot (massaloze) deeltjes zoals gluonen en fotonen. Bovendien bestaan ze maar een zeer korte tijd. Daarom reikt de zwakke kernkracht minder ver dan de elektromagnetische kracht.

De sterke kernkracht reikt minder ver omdat de gluonen kleur hebben en zich daardoor niet van quarks en andere gluonen kunnen verwijderen. Bovendien groeperen quarks zich tot witte combinaties, de hadronen. Buiten het hadron wordt geen kleur uitgewisseld, dus is daar ook geen sterke kernkracht.

In de evolutie van de elementaire deeltjes vervallen quarks en leptonen van zwaar naar licht. Twee mechanismen die hiertoe leiden zijn in de voorgaande paragrafen besproken: via fotonen door middel van annihilatie en creatie en via *W*-deeltjes door middel van verval.

Extra - verder onderzoek ...

In de voorafgaande paragrafen is al gebleken dat er nog veel raadsels zijn.

Massa

Het is een raadsel hoe de elementaire deeltjes een rustmassa krijgen (dus in de dagelijkse ervaring: hoe ze 'materie' worden.) Peter Higgs heef hiervoor in 1964 een theorie bedacht. Deze voorspelt de naar hem vernoemde Higgs-deeltjes. Bestaan die inderdaad? In paragraaf 4.2 wordt beschreven dat de Large Hadron Collider in Genève dit moet gaan uitwijzen.

Verdwenen antimaterie

Een groot raadsel is waarom er in het universum veel meer materie dan antimaterie is, voorzover we althans kunnen nagaan. Tot voor kort ging men er van uit dat antimaterie zich alleen door een tegengestelde lading en kleur van gewone materie onderscheidt. De overige eigenschappen zouden volkomen identiek zijn. Als dat waar is, dan moeten deeltjesprocessen tussen antimaterie volkomen *symmetrisch* zijn met processen tussen materie. Bij annihilatie en creatie blijft de hoeveelheid materie en antimaterie steeds in evenwicht. Ook de kans op verval via de zwakke kernkracht zou hetzelfde moeten zijn. Bijvoorbeeld van

$$\bar{c} \rightarrow \bar{s} + W^- \text{ en } c \rightarrow s + W^+$$

evenals van

$$\bar{c} \rightarrow \bar{d} + W^- \text{ en } c \rightarrow d + W^+.$$

Extra - verder onderzoek ... (vervolg)

Vergelijkbare overgangen in die schema's zouden met dezelfde waarschijnlijkheid plaats vinden. Men heeft echter ontdekt dat bij het verval van quarks via de zwakke kernkracht de generaties soms niet behouden zijn. En mogelijk verschilt dit ook nog voor materie en antimaterie. In 2002 is met de SLAC-versneller in Stanford (California) experimenteel bevestigd dat er een schending is van de lading-symmetrie. Tenminste bij het verval van *B*-mesonen en hun antideeltjes. *B*-mesonen bestaan uit een *u*- of *d*-quark met een anti-*b*-quark. Blijkbaar heeft de natuurkunde nog geen compleet beeld van de antimaterie.

De massa van neutrino's
Neutrino's werden in 1930 door Pauli voorspeld en met behulp van een bellenvat pas in 1970 voor het eerst (indirect) waargenomen. Aanvankelijk dacht men dat neutrino's geen massa hadden. Halverwege de jaren 90 werd in het Kamiokande experiment in Japan echter vastgesteld dat de massa van neutrino's waarschijnlijk niet gelijk is aan 0. De formulering verraadt de onzekerheid. Omdat er in het universum enorm veel neutrino's zijn, zou dit grote consequenties hebben voor massaberekeningen in het universum.

Als neutrino's wel massa hebben, kan ook voor leptonen soms schending van behoud van generaties en van ladingsymmetrie worden verwacht. Er zijn grote nieuwe neutrino-experimenten in voorbereiding.

Donkere materie
Niet alleen de massa op kleine schaal (van elementaire deeltjes) is een raadsel, ook van de massa in het universum bestaat geen helder beeld.
Natuurkundigen denken tegenwoordig dat de materie die we kunnen zien slechts 4% van alle materie in het universum uitmaakt. Zo wijzen onregelmatigheden in de beweging van melkwegen op het bestaan van 'donkere materie', dat wil zeggen materie die we niet kunnen zien. Met 'zichtbare materie' wordt materie bedoeld die uit elektrisch geladen deeltjes bestaat en daarom via elektromagnetische straling kan worden waargenomen.
Op grond van satellietmetingen van na 2001 wordt vermoed dat 23% van de massa van het heelal donkere materie is. Niemand weet echter zeker wat de samenstelling van donkere materie is. Het is een grote uitdaging voor de kosmologie en de Astroparticle Physics om de aard van donkere materie te verklaren. Een mogelijke hypothese is het bestaan van een nieuwe klasse elementaire deeltjes die een nauwelijks waarneembare wisselwerking met hun omgeving hebben, de WIMP deeltjes (Weakly Interacting Massive Particles). In het vak NLT is een module beschikbaar waarin op de speurtocht naar donkere materie wordt ingegaan.



Figuur 2.16 't Hooft licht toe

Vraag van Marina: Kunt u iets uitleggen over welk probleem moest worden opgelost, of over wat een belangrijke stap was bij het oplossen, in het werk waarvoor u de Nobelprijs hebt gekregen?

Dit is uiteraard een heel technische vraag. We zaten inderdaad met een weerbarstige moeilijkheid in de deeltjesfysica. We wisten hoe de uitwisseling van deeltjes krachten kan voortbrengen, en we kenden uit de vele experimentele waarnemingen de ZWAKKE KRACHT, een heel speciale kracht die bij bijna alle deeltjes voorkomt, maar die zich alleen dan doet gelden als, om wat voor reden dan ook, de veel sterkere STERKE KRACHT en de elektromagnetische kracht afwezig zijn. Vele vervalsprocessen, processen waar deeltjes uiteenvallen in andersoortige deeltjes, zijn uitsluitend aan de zwakke kracht toe te schrijven. De waarnemingen leken er heel sterk op te wijzen dat bij de zwakke kracht de uitgewisselde deeltjes spin 1 hebben. Als biljartballen met effect (spin). Als je aannam dat er meestal precies een zo'n deeltje wordt uitgewisseld dan klopten de berekeningen heel aardig, met een typische foutenmarge van een procent of zo. Maar je kon uitrekenen dat er toch echt ook wel eens twee of meer deeltjes tegelijk kunnen worden uitgewisseld. En daar gingen alle bestaande berekeningen de mist in. Die gaven als resultaat dat het effect van twee gelijktijdig uitgewisselde deeltjes "oneindig" moest zijn: een oneindig sterke kracht. Dat kon natuurlijk niet waar zijn. Nou ja, de situatie was dan ook ingewikkeld: die oneindige krachten konden elkaar wel eens uitdoven, maar ja, hoe reken je de netto kracht uit als oneindige krachten in tegenovergestelde richtingen werken?

Het antwoord was "renormalisatie". De deeltjes krijgen van huis uit "oneindige" eigenschappen mee: oneindige massa en oneindige koppeling tussen deeltjes. Dat lijkt natuurlijk niet zo'n goede remedie en de meeste collega's geloofden hier daarom geen biet van. Maar wat wij konden uiteenzetten is dat die krachten volgens heel speciale principes moeten werken (het "ijkprincipe": je moet op verschillende manieren kunnen rekenen en er dan hetzelfde uit krijgen. Dit moest gelden als je wilde dat het geheel klopt met Einsteins speciale relativiteitstheorie). We konden laten zien dat dit de enige manier is om de formules op te schrijven, en dat je dan niet alleen eindige, dus zinvolle uitkomsten krijgt, maar dat die ook volstrekt eenduidig zijn. De theorie werkte dus, en hiermee kon je nu de effecten van gelijktijdig willekeurig veel uitgewisselde deeltjes uitrekenen. Wel worden de berekeningen ingewikkeld, maar de wiskundigen staan voor niets, die hebben al fantastisch ingewikkelde diagrammen van uitgewisselde deeltjes (de Feynmandiagrammen) kunnen doorrekenen. En het klopt. Met deze berekeningen konden de eigenschappen van een nieuw soort quark, het "top-quark" worden uitgerekend, en dit quark, met de van tevoren berekende eigenschappen, werd inderdaad gedetecteerd in Fermilab, nabij Chicago.

4 Deeltjes gebruiken, maken en waarnemen

Hoofdstukvraag	Hoe gebruiken we de kennis over deeltjes, hoe ontwikkelen we de kennis over deeltjes verder?







Figuur 4.1

Oriëntatieopdracht: Grote ideeën in grote installaties.
De drie foto's in figuur 4.1 zijn van een kerncentrale, een fusiereactor en een deeltjesversneller. Weet je al of (en zo ja, hoe) bij elke installatie de volgende principes worden toegepast?

- $E=mc^2$
- Geladen deeltjes kunnen worden afgebogen door een magneetveld.
- Als een proces bij elke stap zichzelf versterkt, krijg je een kettingreactie.
- Bij een botsing moeten zowel de wet van behoud van energie als de wet van behoud van impuls worden toegepast.

De kennis over deeltjes die in de twintigste eeuw is ontwikkeld, wordt op grote schaal toegepast bij de productie van kernenergie via kernsplijting. In grote internationale samenwerkingsverbanden werken natuurkundigen aan de ontwikkeling van kernfusie. Ook het verdere onderzoek naar de opbouw van materie gebeurt in internationale onderzoeksgroepen, die met grote versnellers werken. We gaan eerst in op de toepassingen van deeltjesprocessen, dan op het maken van deeltjes en als laatste op het detecteren van deeltjes.

4.1 Kernreacties

De sterke en de zwakke kernkracht spelen zich op heel kleine schaal af, toch zien we er de gevolgen op grote schaal van: het grootste deel van de materie die we kennen bestaat uit hadronen (p en n) die door de sterke kernkracht zijn gevormd, en van de radioactiviteit die door de zwakke kernkracht wordt veroorzaakt maakt men op veel manieren gebruik.

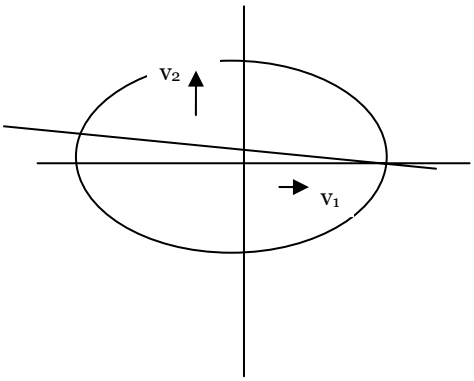
Kernreacties kunnen energie opleveren. Kernsplijting wordt al lang gebruikt in kerncentrales. Kernfusie is het proces waar de zon en de sterren hun energie vandaan halen. In deze paragraaf beschrijven we hoe energie wordt opgewekt door kernsplijting en kernfusie.

Kernsplijting

Een belangrijke splijtingsreactie is de splijting van uranium-235. De reactie wordt op gang gebracht door een langzaam neutron, dat een uraniumkern instabiel maakt. De zware uraniumkern splijt in twee grote brokken en een aantal kleintjes:

$$n + {}^{235}\mathrm{U} \rightarrow {}^{236}\mathrm{U}^{*} \rightarrow {}^{90}\mathrm{Kr} + {}^{143}\mathrm{Ba} + 3n$$

Bijzonder is dat de reactie drie neutronen oplevert. Als die allemaal een nieuwe reactie opleveren, neemt het aantal kernen dat meedoet exponentieel toe in de tijd. Dit is te vergelijken met een airshower, waarin een foton een elektron-positronpaar oplevert, waarna het positron annihileert met een elektron, wat twéé fotonen oplevert die elk weer een paar kunnen vormen. Zolang de fotonen genoeg energie hebben, zal het aantal fotonen oplopen via de reeks 1,2,4,8,16,32,..... Als bij de kernsplijting elk neutron een nieuwe reactie oplevert, is de reeks 1,3,9,27,81. Dit heet een **kettingreactie**.



Figuur 4.2 Behoud van massa en van impuls bij botsing van ongelijke massa's

Zo sterk hoeft het niet toe te nemen, als per reactie gemiddeld maar meer dan 1 neutron een nieuwe reactie laat plaatsvinden, neemt de energieproductie toe. Daar zijn twee dingen voor nodig:

- Er moet veel uranium-235 bij elkaar zijn. Als het een klein brokje is, vliegen er in verhouding teveel neutronen het brokje uit voordat ze iets hebben kunnen doen. De kettingreactie komt dus op gang als genoeg uranium-235 bij elkaar zit, de **kritische massa** moet zijn bereikt.
- De neutronen moeten worden afgeremd, langzame neutronen zijn effectiever in het op gang brengen van kernreacties dan snelle. Dit is te vergelijken met een knikker die in een putje moet rollen. Snelle knikkers schieten door, langzame knikkers hebben meer kans om in het putje te eindigen. Zo heeft ook een snel neutron te weinig tijd om een kans te hebben de kern te laten splijten.
- Om te bereiken dat de neutronen worden afgeremd, moeten ze tegen lichte kernen botsen. Bij botsingen tegen zware kernen is het net alsof een stuiterbal tegen een basketbal botst, de stuiterbal kaatst terug zonder veel verlies aan snelheid. Bij een botsing met een lichte kern lijkt het meer op de botsing tussen twee biljartballen, waarbij de botsende bal energie overdraagt aan de stilliggende bal. Dit is de reden waarom in een kernreactor als 'moderator' stoffen met lichte kernen worden gebruikt, zoals water.
- Extra: Waarom dit zo is zie je in figuur 4.2, een variant van figuur 2.2 waarbij twee gelijke massa's op elkaar botsten. Nu is v_1 de snelheid van het neutron en v_2 die van de zware kern waar het neutron op botst. De ellips geeft aan welke eindsnelheden voldoen aan de wet van behoud van energie, de lijn geeft aan welke voldoen aan de wet van behoud van impuls. De verschillen met figuur 2.2 komen doordat nu de massa's verschillend zijn. Dat het linker snijpunt, dat de eindsituatie aangeeft, zo ver naar links en zo dicht bij de horizontale as ligt, betekent dat de grote massa bijna geen snelheid krijgt, en de lichte bijna dezelfde snelheid heeft als in het begin, alleen in tegengestelde richting.

Kernfusie

Bij een fusiereactie versmelten kleinere kernen tot grotere. Door dit proces wekken de zon en andere sterren hun energie op. De zon zet per seconde 600 miljoen ton waterstof om in 596 miljoen ton helium. Het verschil in de massa, vier miljoen ton, wordt in energie omgezet. De verdwenen massa heet het **massadefect.**

Voor het plaatsvinden van kernfusie moet het plasma van kleine kernen heel heet zijn. De reden is dat de kernen eerst heel dicht bij elkaar moeten komen voordat de sterke kernkracht voor voldoende aantrekking zorgt. Voordat ze zo dicht bij elkaar zijn moet de elektrische afstoting worden overwonnen. Pas bij grote snelheden van de kernen lukt dat.

Er wordt veel onderzoek gedaan naar de mogelijkheid ook op aarde fusiereactoren te bouwen. Voorlopig gaat het nog alleen maar om experimenten. Bij de kernfusie die voor gebruik in fusiereactoren toegepast wordt, worden een deuteriumkern (waterstof met 1 neutron) en een tritiumkern (waterstof met 2 neutronen) omgezet in een heliumkern, energie, en een neutron:

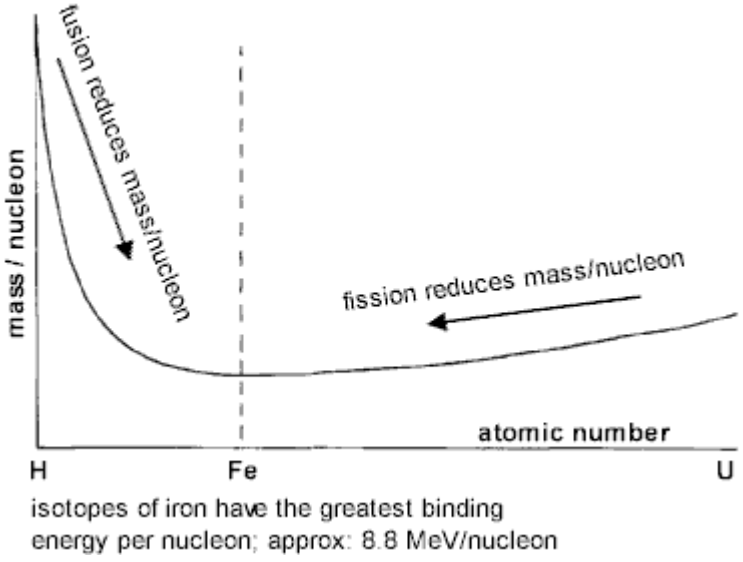
$$^2\mathrm{H} + {}^3\mathrm{H} \rightarrow {}^4\mathrm{H} + n + 17{,}6\ \mathrm{MeV}$$

Het plasma is zo heet dat het niet tegen de wanden mag komen. Die zouden smelten. In een torus, een fietsbandvormig vat, wordt het plasma opgesloten door middel van magneetvelden. Dat magneetvelden de baan van geladen deeltjes beïnvloeden, zagen we al bij de zonnewind in het aardmagnetisch veld, ook in grote cirkelvormige versnellers wordt deze beïnvloeding door de lorentzkracht gebruikt. De processen zijn zo moeilijk te beheersen dat het onderzoek heel veel tijd en geld kost. Daarom werkt bijna de hele wereld samen in één project, ITER. ITER staat voor International Thermonuclear Experimental Reactor, en is een project tussen Europa, Rusland, de VS, Japan, China, India en Zuid-Korea. ITER, die naar verwachting rond 2018 in bedrijf komt, moet aantonen dat fusie op aarde mogelijk is. ITER zal 500 megawatt produceren, tien maal meer dan nodig is om de reactie op gang te brengen. De reactor zal in Cadarache in Zuid-Frankrijk gebouwd worden.

Als kernfusie kan worden beheerst op aarde, is het een onuitputtelijke bron met weinig risico's. Grootste probleem is dat de kosten voor de ontwikkeling heel hoog zijn en dat men niet verwacht dat voor 2050 een bruikbare kernfusiecentrale beschikbaar zal zijn.

Massa en energie

Het lijkt vreemd dat je zowel met fusie als met splijting energie kunt vrijmaken. De achtergrond is weergegeven in figuur 4.4, waarbij de massa per kerndeeltje staat uitgezet tegen het aantal kerndeeltjes in de kern, dus links staat waterstof, rechts elementen als uranium en plutonium. Je zou verwachten dat de massa per kerndeeltje steeds hetzelfde is, omdat alle kernen bestaan uit dezelfde kerndeeltjes, namelijk protonen en neutronen. Maar de massa hangt niet alleen af van de massa van de afzonderlijke deeltjes, hij wordt ook bepaald door de manier van binding. Rond massagetal 50 is de massa per nucleon het laagst, deze kernen zijn het meest stabiel. Ze hebben de grootste **bindingsenergie**. Kleinere en grotere kernen zijn relatief zwaar. Zowel bij fusie van hele kleine kernen als bij splijting van hele grote, is de massa van de reactieproducten kleiner dan die van de kernen waarmee je begon. Het verschil heet het **massadefect.** Met $E=mc^2$ kun je uitrekenen hoeveel joule energie dat oplevert.

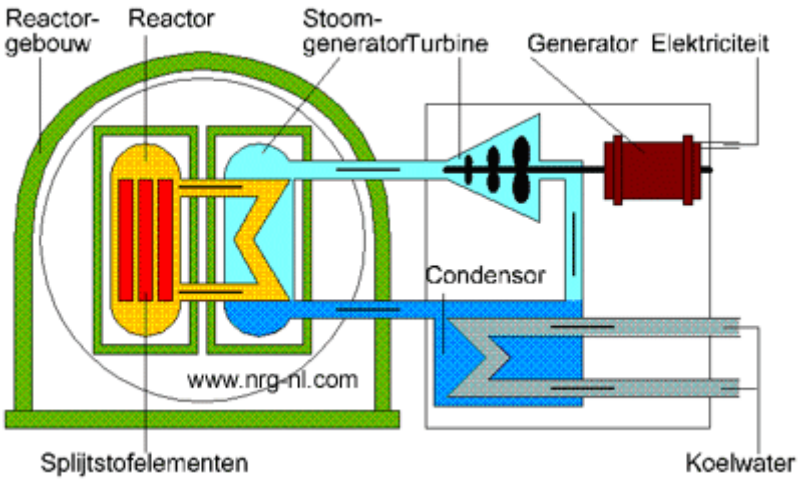


Figuur 4.4

Kernenergie

Om elektriciteit op te wekken via kernenergie is kernsplijting voorlopig de enige techniek die wereldwijd wordt gebruikt. Alle 440 huidige kerncentrales werken op dit principe. Overigens produceert een kernreactor eigenlijk geen elektriciteit, maar warmte. Daarmee wordt een stoomturbine aangedreven,

die op zijn beurt een grote dynamo of generator aandrijft (zie figuur4.5). Het bijzondere zit dus in de eerste stap: het gebruiken van kernreacties om warmte te produceren.



Figuur 4.5 Schema van de kernreactor in Borssele

De enige werkende reactor in Nederland die bedoeld is voor de energieopwekking staat in het Zeeuwse Borssele. Hij heeft een vermogen van bijna 500 MW elektriciteit. Deze centrale wekt gemiddeld zo'n 450 MW aan elektriciteit op. Het totale binnenlandse elektriciteitsgebruik is gemiddeld ongeveer 11.500 MW. De kerncentrale in Borssele draagt daaraan dus zo'n 4% bij.

Rekenvoorbeeld

Hoeveel energie vrijkomt bij kernreacties blijkt uit een berekening.
Stel dat bij een kernreactie 0,1% van de massa wordt omgezet in energie (en dat is geen overdreven aanname), en we gaan uit van 1 kg kernbrandstof. Daarvan wordt dus 1 gram omgezet. Dan is de energie die vrijkomt via $E = mc^2$ gelijk aan

$$\Delta E_{\text{kern}} = 0{,}001 \,.\, \left(3 \,.\, 10^8\right)^2 \text{ J} \;=\; 9 \,.\, 10^{13} \text{ J}$$

Als we dit vergelijken met olie, die bij verbranding per liter ca. 40 MJ ofwel $4 \,.\, 10^7$ J oplevert, dan zien we dat de energie van die ene gram overeenkomt met het verbranden van ruim 2 miljoen liter olie. Met die energie kunnen we aardig wat water van 0 naar 100°C opwarmen. Voor 1 liter water kost dat 420 kJ, aangezien de soortelijke warmte van water 4,2 kJ kg^{-1} K^{-1} bedraagt

De hoeveelheid energie die kernsplijting nu levert, is ongeveer 15 % van het wereldelektriciteitsverbruik. Als ook moeilijker winbaar uranium rendabel wordt om te gebruiken, is de voorraad genoeg voor tientallen jaren energieproductie op basis van 100 % gebruik van kernenergie.

Bron: '*Energie Survival Gids*' (Jo Hermans, Betatekst, 2008). In dit boek staat een overzicht met uitgebreide toelichting van alle bronnen die ons in de toekomst van energie zouden kunnen voorzien.

Er zijn drie problemen met kernenergie:

1. Voor gebruik in een splijtingsreactor moet U-235 worden gescheiden van U-238, omdat alleen de eerste isotoop geschikt is. Dit heet **verrijking**. Er moet voor worden gezorgd dat deze techniek niet in verkeerde handen valt, omdat bij nog betere verrijking het uranium ook

geschikt wordt voor wapens. Gelukkig is de techniek lastig en bewerkelijk.

2. Er is een heel kleine kans op een ongeluk met een centrale, maar als er iets gebeurt kunnen de gevolgen groot zijn. Slimme ontwerpen zorgen er onder andere voor dat een centrale automatisch stilvalt als er iets gebeurt.
3. De brokstukken die na de splijting vrijkomen zijn radioactief. De halfwaardetijd is ongeveer 30 jaar. Ook ontstaat plutonium. Dat is ook radioactief, met een halfwaardetijd van 24000 jaar. Dit radioactief afval moet heel lang veilig worden opgeslagen.

Groot voordeel is dat geen CO_2 wordt geproduceerd, zodat kernsplijting niet bijdraagt aan de versterking van het broeikaseffect.

Reflectieopdracht: Oude woorden op nieuwe plaatsen

Vul de juiste woorden in op de juiste plaats. Kies uit:
alfastraling, bètastraling, fusie, geladen, halfwaardetijd, isotoop, kernbom, kerncentrale, kritische massa, neutronen, opslag, protonen, U-235, U-238, splijting, verrijkt.

Uranium wordt gewonnen in mijnen. De ...**a**... voor spontaan verval is heel groot, zodat de afgegeven ...**b**... vrij zwak is en de mijnwerkers geen gevaar lopen. Dat de ...**c**... zo groot is, is overigens weer een nadeel bij de ...**d**... van het uranium na gebruik, als het 'kernafval' is geworden.

In de erts is 0,7 % van het uranium het ...**e**... dat gespleten kan worden, namelijk ...**f**.... De rest is ...**g**.... Om de ...**h**... te bereiken moet het uranium worden ...**i**..., tot 3-4 % voor gebruik in een ...**j**..., tot 80 % voor gebruik in een ...**k**....

(vervolg van de vorige pagina)

...**l**... kunnen met een lage snelheid een kern treffen. Dat maakt de kans op een ...**m**... zelfs groter, omdat ze anders al voorbij zijn voordat ze iets hebben kunnen doen. Bij ...**n**... gaat het altijd om ...**o**... deeltjes, die een grote snelheid nodig hebben om bij elkaar in de buurt te kunnen komen.

De splijtingsproducten hebben in hun kernen relatief teveel ...**p**.... Ze zenden meestal ...**q**... uit, met een relatief korte ...**r**....

4.2 Onderzoek naar elementaire deeltjes

Net als het fusieonderzoek, is ook verder onderzoek naar de bouw van materie een kwestie van grote projecten met veel onderzoekers en grote installaties.

Sinds er GPS-satellieten om de aarde draaien en men via Internet veel gegevens kan versturen, worden metingen aan airshowers gedaan met grote netwerken op de grond. Maar tot bijna het jaar 2000 waren de mogelijkheden om aan airshowers te meten zeer beperkt. Dat was vooral zo omdat niet te voorspellen is wanneer en waar een deeltje de atmosfeer binnenkomt. Daar-

om wilden wetenschappers experimenten in laboratoria doen en gingen zij zelf energiebellen produceren. Door middel van deeltjesversnellers geven ze deeltjes zoveel energie dat bij een botsing weer zware quarks en leptonen of krachtdeeltjes van de zwakke en sterke kernkracht ontstaan. Ze proberen dus op een gecontroleerde manier een Mini Bang te maken. Het nadeel van deze laboratoriumexperimenten is dat nog niet zulke hoge energieën gehaald worden als in kosmische straling met ultrahoge energie. En het bouwen van zulke zware versnellers is enorm kostbaar. Het voordeel is dat de experimenten gecontroleerd plaatsvinden. Daardoor kun je grote detectoren heel dicht in de buurt van de botsing brengen en heel precies meten.

Verschillende technieken die in de deeltjesfysica werden gebruikt, zijn overgenomen op andere terreinen. Het World Wide Web is bijvoorbeeld uit het deeltjesonderzoek voortgekomen. Het werd bedacht om de samenwerking tussen wetenschappers uit veel verschillende landen mogelijk te maken. Voor medische apparaten als CT- en PET-scanners kon op detectoren uit de deeltjesfysica worden voortgebouwd. Deze paragraaf 4.2 gaat over de grote deeltjesversnellers op aarde – de grootste tot 2007 bij Chicago of de grootste na 2007 bij Geneve. Paragraaf 4.3 gaat over het waarnemen van muonen door de fluorescentie die ze veroorzaken in plastic platen, een detectietechniek die wijd verbreid is.

Aardse versnellers



Figuur 4.6 Versnellertje

Een eenvoudige deeltjesversneller die iedereen kent is de al bijna ouderwetse beeldbuis in een TV of in het beeldscherm van een computer. Daarin worden elektronen versneld door een elektrische spanning van 15 á 25 kV. Voor botsingsexperimenten is dat veel te weinig.

Het doel van deeltjesfysici is om op een bepaalde plaats een energiebel te produceren en allerlei deeltjesreacties te laten plaatsvinden en te bestuderen. Aanvankelijk richtte men daartoe een bundel snelle deeltjes op een stilstaand doel (fixed target) en deze methode zal ook in de toekomst voor allerlei doeleinden worden toegepast. Een botsing is echter heftiger als twee bundels uit de tegenovergestelde richting tegen elkaar botsen. Daarom worden in grote botsingsexperimenten twee bundels van geladen deeltjes gemaakt die met grote snelheid op elkaar botsen. Onderzoekers weten vooraf waar en wanneer de botsing plaatsvindt (daar staan hun detectoren opgesteld en starten ze hun waarnemingen).

Deeltjes versnellen en afbuigen

Een experiment begint dus met het versnellen van elektrisch geladen deeltjes. Dit gebeurt met behulp van een elektrisch veld. Uit een eerder behandelde module weet je dat de kinetische energie van een deeltje met elektrische lading q verandert als het een potentiaalverschil ΔV doorloopt,

$$\Delta E_{\text{kin}} = q \cdot \Delta V$$

Een voorbeeld van eenvoudige deeltjesversneller is een beeldbuis van een (oude) tv. Daarin zorgt een hoogspanning tussen twee platen voor een elektrisch veld. Maar de hoogste spanningen die gemaakt kunnen worden, leveren bij lange na niet voldoende energie voor een botsingsexperiment. Daarom gaat men in de voorbereiding van een botsingsexperiment stapsgewijs te werk en laat men de deeltjes een reeks kleine versnellers doorlopen. Het elektrische veld in een dergelijke versneller is veranderlijk en wordt elektronisch aangepast aan de snelheid en de lading van de deeltjes.

Staan de kleine versnellers in een rechte lijn, dan spreekt men van een lineaire versneller. De grootste nog in gebruik zijnde lineaire versneller is SLAC van Stanford (Bay Area, westkust VS).

Voor grote experimenten geeft men de voorkeur aan zogeheten magnetische versnellers. Die bestaan uit een ring van kleine versnellers en daarbij zorgen magneten voor het afbuigen van de deeltjes. De deeltjes kunnen hierdoor de versnellers vele malen passeren. Hun energie neemt bij elk rondje verder toe.

Het zijn dus niet de magneten die voor de versnelling zorgen, ze zorgen dat de deeltjes vaak langs een elektrisch veld komen.

Het is daarbij natuurlijk erg belangrijk dat de deeltjes hun energie behouden tot ze met een doel (target) botsen. Daarom gebruikt men de ring ook om de snelle deeltjes op te sluiten, dit wil zeggen: te bewaren tot de botsing, zonder ze in aanraking te laten komen met gasmoleculen of met de wanden van de buis waarin ze bewegen. Dit betekent dat de ruimte waar ze doorheen gaan volkomen vacuüm moet zijn. Het opsluiten vereist ook dat de bundel deeltjes niet uit elkaar waaiert; deze moet voortdurend met magneten worden gefocusseerd.

Extra - energie en relativistische snelheid

De verandering van de snelheid van de deeltjes houdt geen gelijke tred met de verandering van de kinetische energie. Volgens de relativiteitstheorie geldt voor de totale energie:

$$E = mc^2 + E_{\text{kin}}$$

Hierin is m de massa, c de lichtsnelheid en E_{kin} de kinetische energie.

De relativiteitstheorie drukt de *totale* energie E van een deeltje uit als functie van snelheid v, volgens de formule:

$$E = mc^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Met schrijft dit ook als

$$E = \gamma mc^2$$

Daarin is gebruik gemaakt van de zogenoemde gammafactor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

De factor γ drukt de verhouding uit van de totale energie ten opzichte van de rustenergie van het deeltje, die correspondeert met de massa. Bijvoorbeeld, voor protonen ($m \approx 1 \frac{\text{GeV}}{c^2}$) met een energie van 10 TeV geldt $\gamma = 10^4$ en de snelheid $v = 0,999999995 \cdot c$.

De keuzemodule *Relativiteit* gaat hier verder op in.

Extra - afbuiging snelle deeltjes

De impuls van heel snelle deeltjes is volgens de relativiteitstheorie

$$p = \frac{E}{c}.$$

E is hierin de totale energie van het deeltje (zie boven).

De formule voor de straal van de baan van elektrisch geladen deeltjes in een homogeen magnetisch veld – de Larmorstraal – is

$$R = \frac{p}{q \cdot B}$$

Daarin staat p voor de impuls, die bij lage snelheden gelijk is aan *mv*. Vullen we de impuls bij hoge snelheden in dan vind je

$$R = \frac{E}{q \cdot B \cdot c}$$



Figuur 4.7 Melvin Meijer

Interview met Melvin Meijer, promovendus aan de Radboud Universiteit Nijmegen

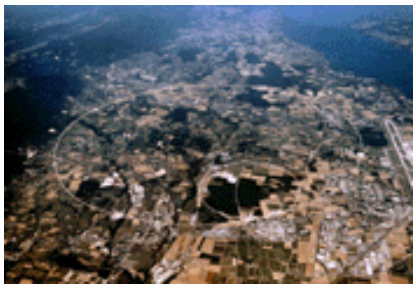
Op welke vraag is jouw eigen onderzoek gericht? Ik ben op zoek naar het laatste missende elementaire deeltje: het Higgs-deeltje. Om de allerkleinste deeltjes te onderzoeken, zijn een paar grote deeltjesversnellers gebouwd, waaronder bij FermiLab in Chicago. Vanuit de Radboud Universiteit Nijmegen onderzoek ik, samen met een grote groep andere natuurkundigen van over de hele wereld, de data die in Chicago wordt gemaakt om te kijken of er Higgs-deeltjes zijn gemaakt. Dat is zeker nu erg spannend, omdat onze grote concurrent, CERN in Genève, ook bijna klaar is om het Higgs-deeltje te vinden. Het is dus echt een race wie hem als eerste zal ontdekken.

Wat doe je op een dag? Mijn werkdagen kunnen erg van elkaar verschillen. De ene dag ben ik veel aan het programmeren, de andere moet ik vergaderen of mijn bevindingen presenteren. Verder ben ik vaak in het buitenland, zo ga ik vier keer per jaar naar Chicago, maar ook voor conferenties en onderzoeksscholen ben ik regelmatig op reis, zoals naar Praag, Dresden en Mexico City. Ik steek ook ongeveer 10% van mijn tijd in onderwijs, zoals het helpen van natuurkundestudenten bij opgaven of het begeleiden van een practicum.

Wat vind je boeiend aan natuurkunde? Mijn interesse om van alles te willen weten hoe het werkt en te begrijpen wat voor mechanismen erachter zitten, is voor mij een grote drijfveer in de natuurkunde. En vooral hoe je de grotere systemen opgebouwd kan zien uit de kleinste bouwstenen vind ik erg interessant. Je snapt dan als het ware wat de basisprincipes van de natuur en dus van de realiteit zijn.

Heb je nog andere dingen die je graag doet, hobby's of een sport? Ik squash regelmatig op de universiteit en ga bij mooi weer wel eens wielrennen. Verder ben ik geïnteresseerd in internationale politiek en economie. Vandaar dat ik betrokken ben bij een organisatie die evenementen organiseert waar bijvoorbeeld de Verenigde Naties na worden gespeeld door studenten. Hierbij moeten de deelnemers verschillende landen vertegenwoordigen en in onderhandelingen en door toespraken een zo goed mogelijk resultaat voor hun land bereiken.

Bij de grootste botsingsexperimenten werkt men met twee bundels die in tegengestelde richtingen door de ring gaan. Men laat de bundels botsen in het centrum van de detector. Hier volgen enkele voorbeelden van grote botsingsexperimenten.



Figuur 4.8 Ligging van de ring bij Geneve

LEP

De Large Electron Positroncollider (LEP) was een groot Europees project waarin men een bundel elektronen liet botsten met een bundel positronen. (Het Engelse woord voor botsing is 'collision', vandaar collider.) De opstelling heeft van 1989 tot eind 2000 gefunctioneerd in een tunnel in de buurt van Genève. De tunnel heeft een omtrek van 27 km en ligt 100 m onder de grond. (Zie de grote witte ring op de foto. In de kleine witte ring met een omtrek van 7 km werd in de jaren 70-80 gebouwd voor botsingen van protonen met antiprotonen.) Antiprotonen ontstaan als protonen op een target (iridium) botsen. De kunst is ze uit het overige materiaal te selecteren, tot subrelativistische snelheid af te remmen en te bewaren door ze in een vacuum ring te laten rondgaan.

LEP heeft met grote precisie de geldigheid van het standaardmodel aangetoond. In 1996 bereikte men in Genève 161 GeV per bundel, voldoende om de massa te produceren van een paar *W*-deeltjes: een W^+ met een W^- deeltje. Een van de processen die zich hierbij afspeelde was:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma \rightarrow W^+ + W^-$$

Omdat de levensduur van de *W*-deeltjes heel kort is, worden ze alleen waargenomen via hun vervalproducten. En daarvoor zijn er allerlei kandidaten, quarks en leptonen.

Tevatron

Door de grote massa van de topquarks konden die tot 1995 niet worden geproduceerd en waargenomen. Dit lukte pas met de Tevatronversneller in de buurt van Chicago. Deze heeft een ring met een diameter van 2 km waarin protonen en antiprotonen op elkaar botsen met een energie van 1,8 TeV (1800 GeV).

De reactie die in 1995 in de Tevatronversneller optrad en het bestaan van topquarks bevestigde, wordt beschreven in de volgende reactievergelijking

$$t + \bar{t} \rightarrow b + W^+ + \bar{b} + W^-$$

Dit betekent niet dat deze zes deeltjes zelf direct zijn waargenomen. Maar uit alle deeltjes die men wel waarnam, kon deze reactievergelijking worden gereconstrueerd. Het *t*- en anti-*t*-quark zijn uiterst instabiel. Ze vervallen vrijwel onmiddellijk. Men heeft nog geen baryonen of mesonen met deze quarks waargenomen.



Figuur 4.9. Simon van der Meer, experimentator bij CERN, won in 1984 samen met Carlo Rubbia de Nobelprijs.

LHC

De 27 km lange ring van het LEP-experiment is voorzien van nieuwe apparatuur voor de Large Hadron Collider (LHC). Na enige opstartproblemen zijn in 2010 de metingen begonnen. In het LHC-experiment gaan een bundel protonen en een bundel antiprotonen tegen elkaar in. Om dan met 10 TeV tegen elkaar te botsen. Later wordt dit 14 TeV. Overigens moet je een bundel niet voorstellen als een lange sliert protonen, maar als een reeks pakketjes van een paar centimeter lang.

Verwacht wordt dat in de energiebel van de botsende protonen *H*-deeltjes (Higgs-deeltjes) ontstaan. De *H*-deeltjes zijn nog nooit waargenomen, maar worden voorspeld door de theorie om de massa te verklaren. Als er *H*-deeltjes zijn, zullen ze snel vervallen en zijn ze aan de vervalproducten herkenbaar. Een van de mogelijkheden waarop het onderzoek zich richt, is het

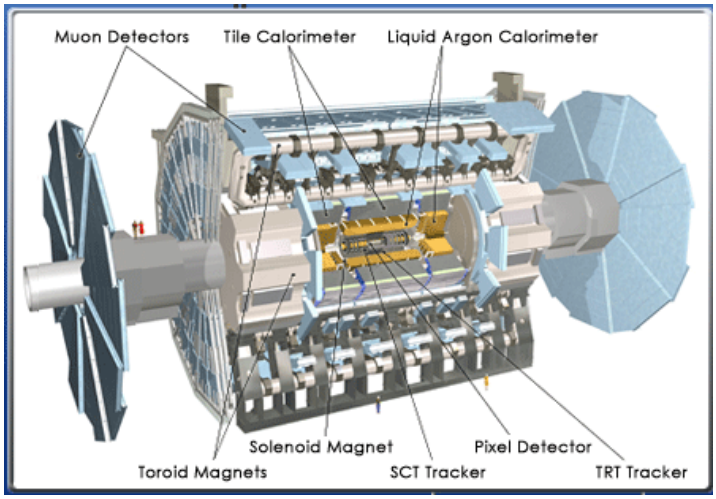
verval van een H-deeltje in twee Z^0-deeltjes, die vervolgens elk in een muonpaar kunnen vervallen. Reactievergelijking:

$$H \rightarrow Z^0 + Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+ + \mu^- + \mu^+$$

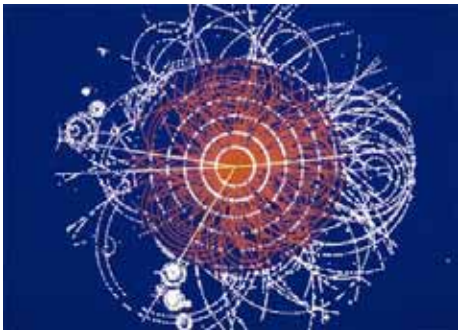
Deze muonen hebben zeer veel energie in vergelijking met deeltjes uit andere reacties en maken een opvallend spoor in de voor dit experiment ontworpen ATLAS-detector.

4.3 Detectie

Hoe neem je de muonen uit een airshower of een botsingsexperiment waar? In de loop van de vorige eeuw zijn voor het detecteren van straling allerlei technieken en apparaten ontworpen. Van elektroscopen en nevelvaten die je zelf kunt maken, tot GM-tellers en vonkenkamers en de kolossale verzameling instrumenten die in grote deeltjesversnellers wordt gebruikt. Een voorbeeld hiervan is de ATLAS-detector voor de Large Hadron Collider in Geneve (zie figuur 4.11).



Figuur 4.11 Tekening van de ATLAS-detector van de Large Hadron Collider. In concentrische mantels om de buis waarin de botsing tussen twee protonenbundels plaatsvindt, bevinden zich verschillende typen detectoren. Het geheel is 40 m lang, heeft een diameter van 20 m en weegt 7000 ton.



Figuur 4.10 Experimenten beginnen met voorspellingen. Hier een plaatje van een computersimulatie van het verval van een Higgsdeeltje in 4 muonen. De banen van de muonen zijn de rechte gele sporen. Bron: CERN

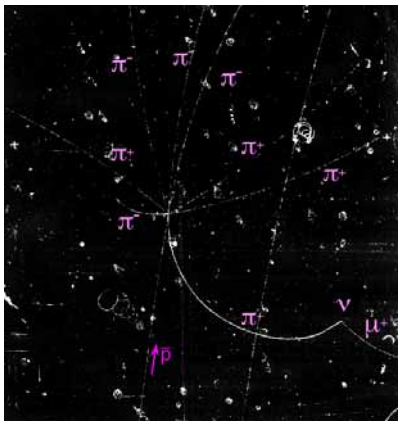
Ionisatie

Muonen en elektronen zijn goed waarneembaar omdat ze gemakkelijk atomen ioniseren. Door dergelijke ionisaties werd kosmische straling een eeuw geleden ook ontdekt. En van dit verschijnsel wordt in detectiemethoden nog altijd gebruik gemaakt.

Vonkenkamer en GM-teller

Handzamer dan de vonkenkamer, die in hoofdstuk 1 werd beschreven, is de Geiger-Mueller-teller. Kortweg GM-teller. De GM-teller heeft slechts een compartiment waarin de straling een ionisatiespoor maakt. Meestal is dat een kleine met gas gevulde cilinder en loopt er langs de as van de cilinder een metalen draad die een positieve elektrische spanning heeft ten opzichte van de wand. Een ioniserend deeltje van buitenaf veroorzaakt in de ruimte ionisatie, waarbij positief geladen ionen en vrije elektronen overblijven. De posi-

tief geladen draad trekt de vrije elektronen aan en versnelt ze waardoor ze op hun beurt ionisaties veroorzaken. Er ontstaat een kleine lawine. Als de lawine van elektronen de centrale draad bereikt, daalt daarvan de spanning. Tussen de draad en de wand van de cilinder ontstaat een elektrische puls die wordt gebruikt om de inslag van het oorspronkelijke deeltje te registreren. Vaak alleen door het te laten horen als een tik.



Figuur 4.12 Bellenvat

Nevelvat en bellenvat

De condensatie van een damp of de verdamping in een vloeistof treedt het gemakkelijkst op rond ionen. Daardoor laat ioniserende straling in een damp een condensatiespoor achter, dat kan worden gefotografeerd. Denk aan de sporen van vliegtuigen hoog in de dampkring. Men noemt dit een nevelspoor. Het apparaat waarin volgens dit principe ioniserende straling zichtbaar wordt gemaakt, heet een nevelvat.

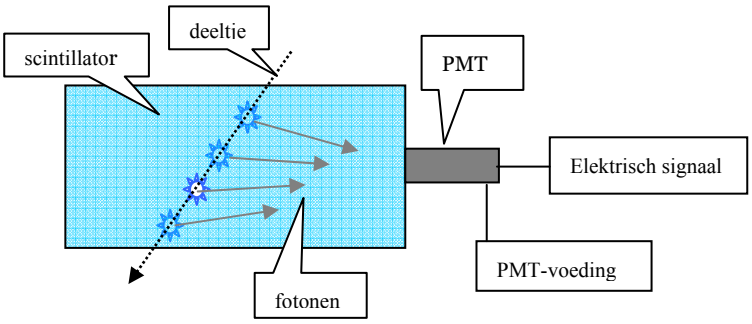
In een vloeistof die bijna kookt, veroorzaakt ioniserende straling een bellenspoor. Van dit principe maakt het bellenvat gebruik. Een voorbeeld van een bellenvatfoto zie je in figuur 4.12 Daarop is de botsing van een antiproton en een proton te zien. Er ontstaan 8 pionen en ook is te zien dat een pion uiteenvalt in een muon en een neutrino. Het nadeel van nevel- en bellenvaten is dat er een vrij grote hersteltijd (ook wel 'dode tijd' genoemd) nodig is voordat je een nieuwe opname kunt maken.

Fluorescentie en lichtflitsjes

Atomen raken in een hogere energietoestand als ze botsen met fotonen en bewegende geladen deeltjes. En als ze weer terugvallen naar een lagere energietoestand zenden ze licht uit. Dit spontane proces staat bekend als fluorescentie. Het poollicht ontleent bijvoorbeeld zijn kleuren aan de fluorescentie van zuurstof- en stikstofatomen. Je zou de atmosfeer daarom als detector van zonnewind kunnen opvatten.

Van fluorescentie wordt tegenwoordig veel gebruik gemaakt in detectoren voor straling. De straling wordt dan opgevangen door een kristal of een stuk plastic waarin fluorescentie optreedt. Door ze met speciale atomen te verontreinigen wordt de gevoeligheid van het kristal of het plastic verhoogd. Zo'n geprepareerd kristal of stuk plastic voor een detector noemt men een scintillator. ('scintillatie' betekent 'lichtflitsje')

Langs het hele traject dat een muon door een scintillator aflegt, worden atomen geïoniseerd. De elektronen die daarbij vrijkomen, veroorzaken ook nieuwe ionisaties. Als een geïoniseerd atoom weer een vrij elektron aan zich bindt wordt er (deels zichtbaar) licht uitgezonden. Dit komt omdat dit elektron binnen het atoom een lager energieniveau bezet. De verzameling van al het uitgezonden licht langs het spoor van een muon manifesteert zich als een

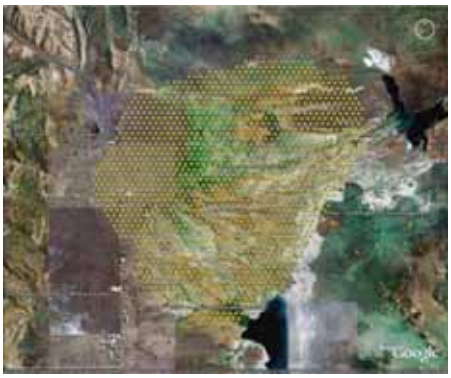


Figuur 4.13 Een deeltje dat door de scintillator gaat produceert fotonen. Hierdoor ontstaat een kort lichtflitsje. Een Photo Multiplier Tube (PMT) zet dit lichtflitsje om in een elektrisch signaal en versterkt het.

lichtflitsje. Deze lichtflits wordt voor verdere bewerking en analyse omgezet in een elektrische puls. Een veel gebruikt apparaat hiervoor is de fotoversterkerbuis (Engels: Photo Multiplier Tube – PMT.). Scintillators worden ook gebruikt voor het detecteren van gammastraling in CT- en PET-scanners.

Netwerken

Een enkele airshower verspreidt muonen en andere deeltjes over een gebied van meer dan 30 km^2 van het aardoppervlak. Dit gebied noemt men de voetafdruk (of footprint) van de airshower. Met een netwerk van gekoppelde detectoren is de omvang van de footprint vast te stellen. HISPARC is een experiment waarin met een dergelijk netwerk aan airshowers wordt gemeten. Aan dit experiment nemen ook veel middelbare scholen deel. Een heel groot project voor het zelfde doel (maar met een ander type detectoren) is het Pierre Auger Observatory in Argentinië. Daar staan 1600 detectoren opgesteld in een gebied van ruim 3000 km^2.



Figuur 4.14

In een Google-Earthplaatje zijn de 1600 detectoren van het Pierre Auger experiment ingetekend. Met dit experiment wordt kosmische straling gemeten met een energie groter dan 10^{19} eV. Nederland neemt deel aan dit experiment.

Een belangrijke vraag bij een netwerk is hoe je weet dat de signalen van verschillende detectoren van dezelfde airshower zijn? Zijn 2 deeltjes die na elkaar door een detector gaan van dezelfde airshower? Hoe groot kan het tijdverschil zijn tussen de signalen van 2 verschillende detectoren? Omdat de tijdstippen waarop de detectoren getroffen worden zeer nauwkeurig bekend moeten zijn, maken grote netwerken gebruik van 'tijdstempels' met behulp van de atoomklokken van het GPS- (en in de toekomst ongetwijfeld van het Europese Galileo-) systeem. De signalen van de verschillende detectoren worden met tijdstempel via Internet naar een grote computer gestuurd. Door de noodzaak van GPS en snelle internetverbindingen kan deze techniek pas sinds het einde van de 20ste eeuw worden toegepast.



Figuur 4.15 José Coppens

Interview José Coppens, promovendus aan de Radboud Universiteit Nijmegen

Op welke vraag is jouw eigen onderzoek gericht?

Mijn onderzoek is gericht op het meten van radiostraling afkomstig van kosmische stralen. Kosmische stralen zijn hoogenergetische deeltjes die door het heelal vliegen en botsen op de aardatmosfeer. Hier creëren ze een hele lawine aan secundaire deeltjes, waarvan een groot deel elektrisch geladen is (elektronen en positronen). Deze geladen deeltjes worden afgebogen in het magnetisch veld van de aarde en zenden daarbij radiostraling uit. Dit proberen we te meten met simpele radiodetectoren die we opbouwen en testen op de pampa in Argentinië, bij het Pierre Auger Observatorium, waar al op twee andere manieren kosmische stralen worden gemeten.

Wat doe je op een dag?

Dat hangt er van af of ik in Nederland aan het werk ben of in Argentinië. Ik ga ongeveer 2 keer per jaar voor 3-4 weken naar Argentinië om aan de opstelling te werken. Dat betekent echt het veld in met een gereedschapsdoos en een laptop om te testen en te sleutelen. Daarnaast is er in Argentinië twee keer per jaar de vergadering van het Auger samenwerkingsverband, waarbij veel van de 400 onderzoekers samenkomen om resultaten en technische problemen te bespreken.

In Nederland ben ik vooral bezig met het analyseren van de data die we in Argentinië hebben gemeten. Dat is dus veel achter de computer zitten maar ook overleggen met directe collega's. Wij werken samen met een groep uit Groningen en overleggen één keer per week met hen via een videoconferentie.

Daarnaast geef ik les aan studenten natuur- en sterrenkunde van de RU. Als AIO volg ik zelf ook nog onderwijs, ik ga bijvoorbeeld één keer per jaar naar een zomerschool (meestal is dit in het buitenland). Tot slot ga ik één keer per jaar naar een wat grotere conferentie waar ik dan ook een presentatie geef over mijn onderzoek.

Wat vind je boeiend aan natuurkunde?

Wat mij altijd heeft aangesproken bij natuurkunde (en sterrenkunde, wat ik heb gestudeerd) is dat je probeert antwoorden te vinden op fundamentele vragen, bijvoorbeeld over ons heelal. Hoe is het ontstaan, waar bestaat het uit, etc. Het feit dat we hier op aarde deeltjes kunnen meten die uit de ruimte komen, en op die manier iets te weten kunnen komen over de aard van het universum, vind ik bijzonder en fascinerend.

Wat doe je verder nog naast natuurkunde?

Ik speel volleybal bij een studentenvereniging en ga vaak hardlopen. Daarnaast hou ik veel van reizen, ik heb voor mijn afstuderen in India gezeten en ben daar sindsdien vier keer geweest voor reizen en vrijwilligerswerk. Ik heb afgelopen oktober een trekking gemaakt in de Himalaya en van de zomer ga ik in India weer op bezoek bij Tibetaanse vluchtelingen, waar ik als vrijwilliger een paar jaar geleden Engelse les heb gegeven.



Figuur 4.16 Marina Sabbadini en Lucas de Haas interviewen Nobelprijswinnaar Martinus Veltman

Marina Sabbadini en Lucas de Haas, leerlingen van klas 5 van het Stedelijk Gymnasium Leiden, interviewen Martinus Veltman, emeritus hoogleraar Universiteit van Michigan te Ann Arbor, USA en NIKHEF, Amsterdam.

Lucas: Als ik mij voorstel dat elektronen fotonen naar elkaar gooien, dan kan ik mij voorstellen dat dat tot een afstotende kracht leidt. Net als wanneer ik een basketbal naar Marina gooi: ik krijg een terugstoot, zij krijgt een duw als ze hem vangt. Maar hoe verklaar je de aantrekkende kracht tussen een proton en een elektron?

Veltman: Daar houdt de analogie met de klassieke mechanica op! Het zit in de quantummechanica, daar is afstoting en aantrekking een ingewikkelde kwestie. Als je klassiek kijkt, wordt een elektron dat bovenlangs een proton beweegt naar beneden afgebogen. Als het onderlangs beweegt, wordt het naar boven afgebogen. Maar als je quantummechanisch kijkt, is er een onzekerheid in de plaats, Δx. Je weet helemaal niet of het boven- of onderlangs beweegt. Dus de vraag welke kant het elektron op buigt, ligt ingewikkelder.

Marina: Wat is voor uw werk belangrijker geweest, inzicht in wiskunde of natuurkunde?

Veltman: Natuurkunde! Natuurlijk is de wiskunde het gereedschap waarmee je werkt. Maar het gaat erom te willen begrijpen hoe de natuur functioneert. Toen ik bij CERN werkte als theoreticus, maakte ik elke week een rondje langs de experimenten. Die geven de hints. Een goede fysicus haalt daaruit de ideeën, gaat denken: “Dat moet het zijn!”.

(vervolg van de vorige pagina)

Marina: Kunt u iets vertellen over hoe de theorie waarvoor u de Nobelprijs kreeg tot stand is gekomen?

Veltman: Je moet in ieder geval niet denken dat het één moment is waarop je het ineens ziet. Het is een heel lange weg. Eerst moet je weten wat er te koop is in de wereld, wat de problemen zijn die de experimenten je voorschotelen. Aan berekeningen werkte ik als een beest, vaak nachtenlang, tot 5 uur. Pas na maanden was ik een eind op scheut. Ik had computerprogramma's nodig, die bestonden niet, toen heb ik Schoonschip ontwikkeld. Dat is later door anderen verder ontwikkeld, daar zijn de commerciële pakketten als Mathematica en Maple uit voortgekomen. Maar ik moest pionieren. Belangrijk is dat je doorzet. Ik was lange tijd alleen bezig, weinig mensen geloofden erin. Maar daar trok ik me geen fluit van aan.

Lucas: Waarom zijn die berekeningen zo ingewikkeld?

Veltman: Wat één proces lijkt, zijn er in feite een heleboel. Als bijvoorbeeld een deeltje langs een ander deeltje beweegt, en dat systeem heeft een gebonden toestand, dan kan er niet alleen één virtueel foton worden uitgewisseld, maar het kunnen er ook een heleboel zijn. Intussen kunnen paren ontstaan en weer verdwijnen. Of er worden *W*-bosonen uitgewisseld. Dat moet je allemaal meenemen.

Lucas: Kunt u iets zeggen over onderwijs in de natuurkunde, hoe moet dat volgens u gegeven worden?

Veltman: Het schoolboek waar ik uit leerde was veel te saai. En tijdens mijn studie op de universiteit was het onderwijs abominabel, achterhaald, je leerde gewoon niet wat er aan de hand was. Toen ik in Utrecht verantwoordelijk was voor het onderwijs heb ik gezorgd dat experts in de eerste jaren van de studie korte colleges gaven. Ik vind dat het niet gaat om feitjes, maar om leren wat er te koop is in de wereld.

Marina: Wat vindt u belangrijk om tegen ons en andere leerlingen te zeggen, als slot?

Veltman: Doe wat je wilt én kunt. Succes met het leven. Het is niet eenvoudig, maar maak er wat van.

Martinus Veltman won in 1999 de Nobelprijs voor natuurkunde, samen met Gerard 't Hooft. Hij schreef een populair-wetenschappelijk boek over elementaire deeltjes: Feiten en mysteries in de deeltjesfysica, ISBN 9789076988443.

Reflectieopdracht:
Leg in tien regels de rol uit van experimentatoren en theoretici in het wetenschappelijk onderzoek.

Begrippen

Basis stof:

- Kernsplijting
- Kettingreactie
- Kritische massa
- Kernfusie
- Massadefect
- Deeltjesversneller
- GM teller
- Bellenvat
- Scintillator

Toepassing van:

- $\Delta E_{kin} = q\Delta V$
- $R = mv/qB$
- Atoomfysica: aangeslagen toestanden, fluorescentie, ionisatie

Verdieping:

- Energie, snelheid en afbuiging van snelle deeltjes
- Noodzaak van tijdstempels in netwerken

Samenvatting

- Bij **kernsplijting** splijt een grote kern in meerdere kleine kernen.
- De reactie wordt op gang gebracht door een **neutron**, in de reactie ontstaan neutronen.
- Als er genoeg splijtstof bij elkaar is, men noemt dat **'als de kritische massa is bereikt'**, kan een kettingreactie optreden.
- Bij **kernfusie** smelten kleine kernen samen tot grotere.
- Dit vindt alleen plaats bij **hoge temperatuur en druk**.
- Die omstandigheden zijn aanwezig in het binnenste van de zon en sterren, men probeert die omstandigheden in een **fusiereactor** ook te creëren en te beheersen.
- Zowel bij kernsplijting als bij kernfusie zijn de kernen voorafgaand aan de reactie relatief **zwaar** en de kernen die ontstaan relatief **licht**.
- Het verschil in massa tussen de beginkernen en de eindkernen, het **massadefect**, wordt omgezet in energie.
- Om deeltjes te onderzoeken laat men ze in **deeltjesversneller** met veel energie tegen elkaar botsen.
- **Elektrische velden** geven geladen deeltjes een hogere snelheid, **magnetische velden** zorgen dat ze in een cirkelbaan bewegen en zo meerdere keren door hetzelfde elektrisch veld versneld kunnen worden.
- In een **GM-teller** en in een **bellenvat** wordt gebruik gemaakt van de ionisaties die deeltjes veroorzaken om de deeltjes te detecteren.
- In een **scintillator** wordt gebruik gemaakt van de fluorescentie die deeltjes met veel energie veroorzaken om ze te detecteren.

Opgaven

§4.1

35 Baryongetallen splijten

Leg uit dat beide stappen van de volgende splijtingsreactie voldoen aan de wet van behoud van baryongetal:

$$n + {}^{235}U \rightarrow {}^{236}U^{*} \rightarrow {}^{90}Kr + {}^{143}Ba + 3n$$

36 Baryongetallen fuseren

Leg uit dat in de volgende vergelijking voor een fusiereactie voldaan is aan behoud van baryongetal:

$${}^{2}H + {}^{3}H \rightarrow {}^{4}He + n$$

37 Kernen wegen

Als je kernen van waterstof en van helium zou wegen en dan zou delen door het aantal kerndeeltjes (1 bij waterstof, 4 bij helium), krijg je verschillende antwoorden. Leg aan de hand van het verschijnsel kernfusie uit welke kern een grotere massa per kerndeeltje heeft, waterstof of helium.

38 Water koken

Bij kernsplijting wordt ongeveer 0,1 % van de massa van de kernbrandstof omgezet in energie. Voor het verwarmen van een liter water van 0 tot 100 graden is 420 kJ nodig. Bereken hoeveel liter water je aan de kook kunt brengen met de energie uit een kilogram kernbrandstof.

39 Fusieberekeningen: zon en aarde

De zon haalt haar energie uit kernfusie. Daarbij wordt bijna 1 % van de massa van waterstof omgezet in energie.

a. Zoek op hoeveel energie de zon per seconde uitstraalt en wat de totale massa van de zon is. Reken uit hoe lang de zon zou kunnen blijven branden als ze helemaal uit waterstof zou bestaan en alle waterstof gebruikt zou kunnen worden voor het kernfusieproces.

Voor kernfusie is tritium (^{3}H) en deuterium (^{2}H) nodig. Omdat tritium kan ontstaan via de reactie $^{2}H+{}^{2}H \rightarrow {}^{3}H+{}^{1}H+4{,}0$ MeV is de nettovergelijking van dit proces in twee stappen: $3\ {}^{2}H \rightarrow {}^{4}He + n + {}^{1}H^{+}$ 21,6 MeV. Eén op de 7000 waterstofkernen in zeewater is een deuteriumkern. In 1 kg zeewater zitten $7 \cdot 10^{25}$ waterstofkernen. Er zijn 10^{21} kilogrammen zeewater op aarde. Per jaar gebruikt de mensheid $5 \cdot 10^{20}$ J.

b. Bereken hoeveel jaar de mensheid vooruit zou kunnen als alle deuterium uit de oceanen zou worden omgezet .

40 LEP

Elektronen hebben een massa van $0,5\frac{\text{MeV}}{c^2}$ en W-deeltjes hebben een massa van $81\frac{\text{GeV}}{c^2}$. Toch ontstonden in de LEP paren W-deeltjes uit paren van een elektron en een positron. Waardoor was dit 'toch' mogelijk?

41 Topquark

In Tevatron is voor het eerst het verval van een topquark in een bottomquark plus W-deeltje waargenomen.

a. Leg met behulp van de tabellen met eigenschappen van deeltjes uit dat dit verval spontaan kan plaats vinden (dat wil zeggen dat men de topquark daarvoor geen extra energie hoeft te geven.)
b. Leg uit dat bij de reactie voldaan is aan de wet van behoud van elektrische lading.
c. Verklaar waarom bij het verval van een antitopquark een W^- -deeltje in plaats van een W^+ -deeltje ontstaat.

42 Extra - LHC

Bij een van de reacties die men in de LHC hoopt te zien, vervalt een Z-deeltje (massa 91.000 MeV/c2) in een muon-antimuonpaar.

a. Leg uit dat de muonen daarbij een zeer grote snelheid krijgen.
b. Leg uit of bij de reactie is voldaan aan de wet van behoud van elektrische lading.
c. Leg uit dat er – behalve uit een Z-deeltje – nog een manier is om een muon-antimuonpaar te creëren.

43 Relativistische energie en snelheid

Volgens de relativiteitstheorie is $E = m_0c^2 + E_{\text{kin}}$ en de gammafactor

$$\gamma = \frac{E}{m_0c^2} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \ .$$

Beschouw een proton (rustmassa $\approx 1\ \frac{\text{GeV}}{\text{c}^2}$) met een energie van 1 TeV.

a. Bereken welk percentage van de energie van het proton correspondeert met de rustmassa.
b. Bereken de gammafactor.
c. Bereken de snelheid uitgedrukt in c.

44 Afbuiging in een homogeen magnetisch veld

De Larmorstraal van zeer snelle elektrisch geladen deeltjes in deeltjesversnellers als van CERN en TEVATRON wordt beschreven door $R = \frac{E}{qBc}$.

a. In de Large Hadron Collider van CERN krijgen de bundels protonen een energie van 10 TeV. De ring heeft een omtrek van 27 km. Bereken de vereiste magnetische veldsterkte.
b. Bij Tevatron was de energie van de bundels protonen en antiprotonen tot 2001 gelijk aan 1,5 TeV en werd toen verhoogd tot 1,8 TeV. De diameter van de ring is daar 2 km. Bereken de sterkte van de magneten in Tevatron voor en na 2001.
c. Stel dat magneten kan maken met een magnetische veldsterkte van maximaal 10 T. Bereken dan de maximale energie in eV die je op een vergelijkbare manier als CERN en TEVATRON op aarde kunt bereiken.

Lees het onderstaande artikel:

Bron: CERN.
Particle accelerators and detectors as well as infrastructure equipment need to be supplied with electricity. Electricity consumption is, therefore, one of the important CERN environmental aspects.
The nominal annual electricity consumption reaches some 1000 GWh when all accelerators are in operation. Only about 8% of this figure corresponds to the basic consumption necessary for the laboratory infrastructure. The remaining 92% is attributed to accelerator facilities.
The Large Hadron Collider (LHC), which will start its operation in 2007, will gradually reach its nominal consumption of 390 GWh per year.
A large fraction of the LHC electrical consumption will be to keep the superconducting magnet system to the operating temperatures (1.8 and 4.2 K) depending on the magnets. Thanks to the superconducting technology employed for its magnets, the nominal consumption of the LHC is not much higher than that of the Super Proton Synchrotron (SPS), even though the LHC is much larger and stronger in energy.

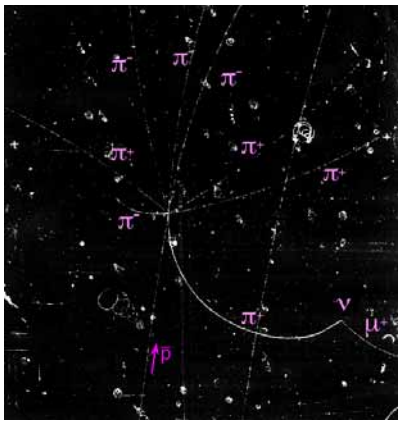
d. Bereken het jaarlijkse energieverbruik van de LHC in procenten van dat van Nederland ($3{,}4 \cdot 10^{18}$ J).

§4.3

45 GM-teller

Een GM-teller werkt alleen goed als er tussen de draad langs de as van de cilinder en de wand de juiste elektrische spanning staat. Dit heet de 'werkspanning'.

a. Leg uit waarom de werkspanning nodig is.
b. Leg uit wat er gebeurt als die spanning te hoog is.



Figuur 4.17

46 Extra: Bellenvat

In figuur 4.17 staat een foto van een botsing van een antiproton (komend van beneden) met een stilstaand proton in een bellenvat. Uit de botsing ontstaan pionen: vier positieve π^+ en vier negatieve π^-. Een pion is een meson bestaande uit een quark en een antiquark van de 1ste generatie.

a. Uit welke quarks bestaat een π^+ meson, en uit welke bestaat een π^- meson?

b. Beredeneer welke richting de magnetische veldsterkte in het bellenvat heeft.

c. Leg uit van welke twee pionen de kinetische energie verschilt van die van de rest.

d. Het spoor van een van de pionen is helderder dan van de andere. Geef daarvoor een mogelijke verklaring.

Eén pion vervalt in een antimuon μ^+ en een muon-neutrino ν . Het neutrino laat geen spoor achter.

a. Waarom laat het neutrino geen spoor achter?

b. Het antimuon en het neutrino ontstaan uit het pion via een wisselwerkingsdeeltje. Leg uit welk wisselwerkingsdeeltje dit is. Geef de reactievergelijking van beide stappen van de vervalreactie.

5 Diagnostische toets

1. Algemeen

Als een bron γ-straling uitzendt, en je houdt die bron bij een geladen elektroscoop, dan zal die elektroscoop ontladen. De fotonen van de γ-straling hebben geen lading.

a. Leg uit hoe het komt dat de elektroscoop ontlaadt.

Protonen die bewegen in het magneetveld dat binnen de Melkweg heerst, kunnen binnen de Melkweg opgesloten raken doordat ze voortdurend afgebogen worden en in cirkels gaan bewegen.

b. Hoe heet de kracht die hiervoor zorgt?

c. Raken ook fotonen op deze manier opgesloten binnen de Melkweg? Leg je antwoord uit.

De geladen deeltjes die van de zon komen, dringen niet zelf door tot het aardoppervlak. Toch meet je op het aardoppervlak wel geladen deeltjes, nadat een snel geladen deeltje de atmosfeer is binnengedrongen.

d. Leg uit hoe deze geladen deeltjes die het aardoppervlak bereiken zijn ontstaan.

2. Flux

Ties en Roos meten tegelijkertijd op dezelfde plaats op aarde hoeveel muonen het aardoppervlak bereiken. Het oppervlak van het apparaat waarmee Roos werkt is het grootst, daardoor meet zij meer muonen per minuut.

a. Leg uit welke grootheid groter is in de meting van Roos, vergeleken met de meting van Ties, de flux of de fluxdichtheid.

Er bereiken per vierkante meter ongeveer 200 muonen per seconde het aardoppervlak. De oppervlakte van het apparaat van Roos is 40 cm^2.

b. Bereken hoeveel muonen Roos per minuut ongeveer zal meten.

3. Deeltjes en antideeltjes

Ga uit van de volgende gegevens:

- De elektrische lading van een elektron is $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, de massa is 0,5 MeV/c^2.
- De elektrische lading van een muon is $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, de massa is 106 MeV/c^2.
- De elektrische lading van een proton is $+1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, de massa is 938 MeV/c^2.
- De elektrische lading van een neutron is 0, de massa is 940 MeV/c^2.
- Een foton heeft geen elektrische lading en geen rustmassa.

a. Wat zijn de elektrische lading en de massa van een antimuon?

b. Geef twee redenen waarom het proton en het neutron geen antideeltjes van elkaar zijn.

c. Het foton is zijn eigen antideeltje. Leg uit hoe dat kan.

4. Airshower

Bij de eerste botsing van een bepaald geladen kosmisch deeltje met een atoom in de atmosfeer ontstaat een positron. Dit positron botst en annihileert met een stilstaand elektron.

Leg uit welke behoudswet ervoor zorgt dat bij annihilatie twee fotonen ontstaan, en niet één.

Hierna volgt een reeks creaties en annihilaties van elektron-positronparen.

Neem aan dat elk foton in de reeks opnieuw tot paarvorming leidt als de energie van het foton groter is dan 1 MeV. Neem gemakshalve ook aan dat een positron 50% van de energie heeft van het positron dat het laatst is geannihileerd. Het blijkt dat er in de laatste stap ongeveer duizend positronen zijn.

a. Bereken hoeveel stappen de reeks telde. (Dit mag met logaritmes, of door 'proberen'.)

b. Bereken hoe groot de energie van het oorspronkelijke positron minimaal was.

5. Voldoet dat aan de wetten?

Leg bij elk van de volgende processen uit of het mogelijk is, of dat het vanwege een behoudswet niet kan plaatsvinden. Leg in het laatste geval uit welke behoudswet zou worden geschonden.

a. Uit een foton ontstaan een antiproton en een positron.

b. Een muon vervalt in een elektron en een elektronneutrino.

c. Uit een foton ontstaan een quark (d) en een antiquark ($\overline{d}$).

d. Een neutron vervalt in een proton, een elektron en een elektronantineutrino.

6. Welke wet?

We bekijken de volgende behoudswetten:

- De wet van behoud van energie
- De wet van behoud van impuls
- De wet van behoud van elektrische lading
- De wet van behoud van leptongetal
- De wet van behoud van baryongetal

a. Geef een zelf verzonnen voorbeeld van een vervalsproces dat niet kan voorkomen in de natuur doordat niet is voldaan aan de wet van behoud van elektrische lading.

Toen β-verval net was ontdekt, dacht men dat binnen de kern een neutron veranderde in een proton en een elektron, en dat de volledige reactievergelijking $n \rightarrow p + e^-$ was. Er waren echter problemen met twee behoudswetten, waar in dit geval niet aan leek te zijn voldaan.

b. Welke twee behoudswetten waren dat?

Men ontdekte dat er tegelijk met het elektron en het proton nog een deeltje ontstaat, daardoor was het oorspronkelijke probleem opgelost. Dat deeltje was het anti-elektronneutrino.

c. Welke behoudswet zegt dat het een anti-elektronneutrino moet zijn, en geen gewoon elektronneutrino?

7. Paarvorming

Bij paarvorming ontstaan een elektron en een positron uit een foton.

a. Leg uit op welke manier hierbij wordt voldaan aan de wet van behoud van energie.
b. Leg uit op welke manier hierbij wordt voldaan aan de wet van behoud van impuls.
c. Leg uit op welke manier hierbij wordt voldaan aan de wet van behoud van elektrische lading.
d. Leg uit op welke manier hierbij wordt voldaan aan de wet van behoud van leptongetal.
e. Leg uit op welke manier hierbij wordt voldaan aan de wet van behoud van baryongetal.

8. PET-scan

Bij het maken van een PET-scan krijgt een patiënt een stof ingespoten die positronen uitzendt. Die annihileren met elektronen.

a. Waar komen die elektronen vandaan?

De positronen komen vrij doordat in de kern een deeltje verandert in drie andere deeltjes, namelijk een positron, een neutron en een anti-elektronneutrino.

b. Welk deeltje was het oorspronkelijke deeltje, dus het deeltje dat verdwijnt en verandert in de drie nieuwe deeltjes?

9. Alleen als paragraaf 2.7 is gedaan: Mesonen en baryonen

De quarksamenstelling van een bepaald meson is $u\bar{s}$. De kleurlading van he upquark is groen (G).

a. Wat weet je van de kleurlading van het antistrangequark?

De quarksamenstelling van een bepaald baryon is *udb*. De kleurlading van het upquark is groen (G).

b. Wat weet je van de kleurlading van de andere twee quarks?

10. Massa?

Een deeltje kan vervallen in andere deeltjes die samen een kleinere massa hebben dan het oorspronkelijke deeltje. Er ontstaan geen deeltjes met rust-massa nul.

Leg uit waar de resterende massa is ‘gebleven’.

11. Kernen wegen

Bij kernsplijting splijt een uraniumkern in een bariumkern, een kryptonkern en drie neutronen. Als je kernen en de neutronen zou wegen en dan steeds zou delen door het aantal kerndeeltjes, krijg je verschillende antwoorden. Leg aan de hand van het verschijnsel kernsplijting uit welke kern een grotere massa per kerndeeltje heeft, uranium, of de deeltjes die ontstaan (het gemiddelde van barium, krypton en de drie neutronen).