

Krachten binnen het standaardmodel

N.G. Schultheiss

1 Inleiding

Deze module volgt op de module “Deeltjes binnen het standaardmodel” en wordt vervolgd met de module “Deeltjes in airshowers”. Aan de hand van het neutron verval bekijken we wat er op verschillende niveau’s met de deeltjes binnen het standaardmodel gebeurt. Deze deeltjes oefenen ook krachten op elkaar uit, er is dus sprake van een wisselwerking.

2 Krachten

Mensen worden op aarde gehouden door de zwaartekracht. Deze is te beschrijven met:

$$F_{\text{gravitatie}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2.1)$$

Electronen worden aan een kern gebonden door de elektrische kracht. De elektrische kracht is veel sterker dan de zwaartekracht en is te beschrijven met:

$$F_{\text{elektrisch}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.2)$$

Opdracht 1: *Vergelijk de grootte van de gravitatieconstante G en de diëlektrische constante ϵ_0 . Welke gevolgen heeft dit voor de gravitatiekracht en de elektrische kracht?*

Het verval van een isotoop gaat met behulp van de zwakke kernkracht of de zwakke wisselwerking. De zwakke wisselwerking maakt het quarks mogelijk van smaak te veranderen.

In de kern werkt ook een kracht om de de protonen en neutronen bij elkaar te houden, de sterke kernkracht. Deze sterke kernkracht is overigens veel sterker dan de elektrische kracht. Verder wordt de kracht groter als de kerndeeltjes verder uit elkaar komen. De quarks binnen een hadron moeten ook bij elkaar worden gehouden, dit gebeurt ook met de sterke kernkracht.

3 Neutron verval

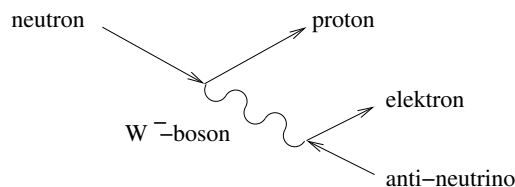
Neutronen zijn geen stabiele deeltjes maar vervallen volgens de reactie:

$${}^1_0n = {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu} \quad (3.1)$$

In deze reactievergelijking zijn al een aantal eigenschappen te herkennen:

- Het aantal kerndeeltjes (baryonen) blijft gelijk.
- Het aantal andere deeltjes (leptonen) blijft gelijk. Het ontstaan van een elektron (${}^0_{-1}e$) wordt gekoppeld aan het ontstaan van een anti-neutrino (${}^0_0\bar{\nu}$). Deze heffen elkaar op zodat er links en rechts netto geen leptonen zijn.
- De lading blijft links en rechts hetzelfde. Links is het neutron elektrisch neutraal. Rechts zijn het proton en het elektron (en het anti-neutrino) samen neutraal.

Dit is ook in een Feynman-diagram voor te stellen:



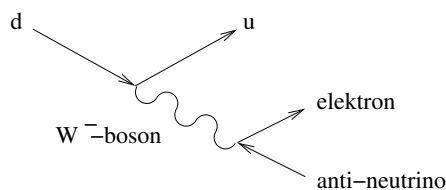
Figuur 3.1: Een eerste Feynman-diagram voor neutron verval

In dit diagram is een nieuw deeltje te zien. Dit deeltje staat bekend als een W^- -boson. Het neutron wordt nu omgezet in een proton, omdat een neutron een quarkcombinatie ddu heeft en het proton een quarkcombinatie duu, kunnen we zeggen dat het d-quark onder uitzending van het W^- -boson een u-quark wordt. Het W^- -boson valt vervolgens uit elkaar in een elektron en een anti-neutrino.

Als we de tijd van links naar rechts laten gaan, reizen het neutron, het proton en het elektron met de tijd mee. Het anti-neutrino reist tegen de tijd in. Dit is ook te interpreteren als een deeltje dat uit het niets verdwijnt. Er blijft een anti-deeltje over.

We kunnen de tijd ook van rechts naar links laten gaan. Een neutrino botst nu op een anti-elektron. De lading van het elektron wordt omgekeerd als het tegen de tijd inreist. Op vergelijkbare wijze zal de lading van het W^- -boson worden omgekeerd, Dit wordt een W^+ -boson. Het W^+ -boson botst op een anti-proton, met een negatieve lading, en er ontstaat een anti-neutron. Dit is een mogelijke reactie.

Als de tijd van boven naar beneden gaat botst een neutron op een anti-proton. Er ontstaat een W^+ -boson omdat een anti-neutron positief is. Het W^+ -boson valt uit elkaar in een neutrino en een anti-elektron. Op het eerste gezicht lijkt dit een mogelijke reactie. In de module “Deeltjes binnen het standaardmodel” hebben we echter gezien dat een proton als een udd-quarkcombinatie kan worden geschreven. Een neutron is een uud-quarkcombinatie. We hebben nu opeens wat quarks over. Als we in het Feynman-diagram quarks gebruiken in plaats van protonen en neutronen, kunnen we de tijd in iedere richting laten lopen.



Figuur 3.2: Een beter Feynman-diagram

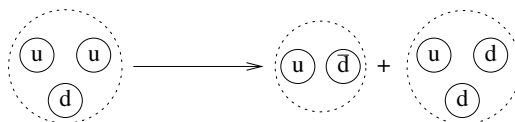
Naast het W^- - en W^+ -boson is er ook een neutraal Z -boson. Het W^- -boson kan bijvoorbeeld vervallen in een elektron en een anti-neutrino of een quark en een anti-quark. De quarks hebben een verschillende lading ($-\frac{1}{3}e$ en $-\frac{2}{3}e$). In plaats van een elektron kan er natuurlijk ook een muon of tau ontstaan.

Bij een W^+ -boson is alles andersom.

Het Z -boson kan vervallen in een lepton en een antilepton (met tegengestelde lading of beide zonder lading) of een quark en een anti-quark (uiteraard hebben deze een tegengestelde lading). De W^+ -, W^- - of Z -bosonen kunnen de quarks dus als het ware van smaak veranderen.

4 Krachten in de kern

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien hoe het verval van een neutron naar een proton verloopt onder uitzending van een W^- -boson. Dit W^- -boson is te beschouwen als een drager van de zwakke kernkracht. Als we ons deze reactie voorstellen met quarks, ontstaat het volgende schema:



Figuur 4.1: Het neutronverval op het quark / antiquark niveau

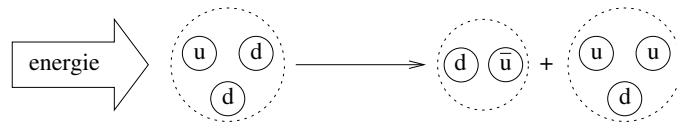
Het valt op dat de plaats van het W^- -boson wordt ingenomen door een $u\bar{d}$ -deeltje. Dit deeltje staat bekend als een π^- of een negatief pion. In eerste instantie dacht men dat het pion verantwoordelijk was voor het verval van neutronen en de zwakke kernkracht.

Een pion hoort bij een hele nieuwe groep deeltjes, de mesonen. Zoals te zien is, zijn mesonen samengestelde deeltjes waarin quark anti-quark paren zitten. Mesonen maken dus ook deel uit van de bosonen.

Voordat men aan de zoektocht naar het W^- -boson begon, moest een ander probleem worden opgelost. In de kern zitten protonen, we kunnen ons dus afvragen waarom de protonen niet de kern uitvliegen. Toen men het pion had ontdekt, dacht men de oorzaak van het aan elkaar plakken van protonen gevonden te hebben. Hideki Yukawa (1907 - 1981) volgde de redenering:

- De elektrische kracht is gequantiseerd voor te stellen wanneer we de elektrische kracht verpakken in fotonen. Ieder foton draagt een deel van de elektrische kracht.
- Omdat een foton een heeltallige spin heeft maakt dit deeltje overigens, net als het pion, deel uit van de verzameling bosonen.

- Een Bose-Einstein condensaat voegt een groep deeltjes samen tot een quantummechanisch geheel. Misschien is een eigenschap van bosonen dus dat ze dingen samenvoegen.
- De kracht tussen de protonen en neutronen kan in bosonen worden verpakt. Misschien worden alle krachten zelfs in bosonen verpakt.
- Volgens het onzekerheidsprincipe van Heisenberg ($\Delta E \Delta t > \hbar$) kunnen we of de energie (ΔE) of de tijd (Δt) precies meten. Het is niet mogelijk om beide tegelijk te kennen.
- Het is dus mogelijk om gedurende korte tijd (Δt) energie (ΔE) te lenen, zolang $\Delta E \Delta t < \hbar$. Dit is namelijk nooit te meten.
- Volgens $E = mc^2$ kan deze energie worden omgezet in een kortlevend deeltje dat op een pion lijkt.



Figuur 4.2: Geleende energie bij een proton

Zoals in Figuur 4.2 te zien is, wordt de aan een proton geleende energie omgezet in een nieuw kortlevend deeltje. Omdat het deeltje weer snel moet verdwijnen, kan het niet te ver reizen voordat het door een ander kerndeeltje (zie Figuur 4.1) wordt geabsorbeerd. Het deeltje werkt volgens deze redenering inderdaad als een soort kracht.

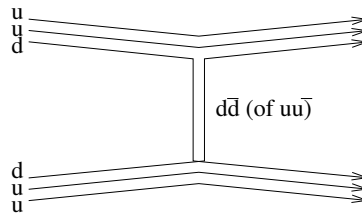
Pionen zijn er in drie soorten: π^+ , π^- en π^0 en bestaan uit up-, down, anti-up en anti-down quarks. Omdat de combinatie van zowel een up- en een anti-up quark en een down en een anti-down quark geen lading heeft, is dit het π^0 -deeltje.

Opdracht 2: *Beredeneer hoe het π^- - en π^0 -deeltje samengesteld kunnen zijn. (De eigenschappen van quarks / anti-quarks zijn in de module “Deeltjes binnen het standaardmodel” te vinden.)*

Opdracht 3: *Bereken de levensduur van een pion als je weet dat $\hbar = 1,0545 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ is en een pion een massa van ongeveer $135 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ voor een π^0 en $140 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ voor een π^+ of π^- heeft. Hoeveel energie moet er geleend worden? Hoelang kan deze energie maximaal geleend worden als je rekening houdt met het onzekerheidsprincipe van Heisenberg?*

Opdracht 4: *Bereken hoever het pion kan komen als het met de lichtsnelheid zou kunnen bewegen.*

Als we de samenstelling van een π^0 -deeltje op het internet opzoeken, vinden we $\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$. Blijkbaar kunnen we deze samenstelling zien als twee mogelijke samenstellingen die loodrecht op elkaar staan. Delen door $\sqrt{2}$ zorgt er dan voor dat we weer één gemiddeld deeltje hebben.



Figuur 4.3: De kracht tussen baryonen als meson-uitwisseling

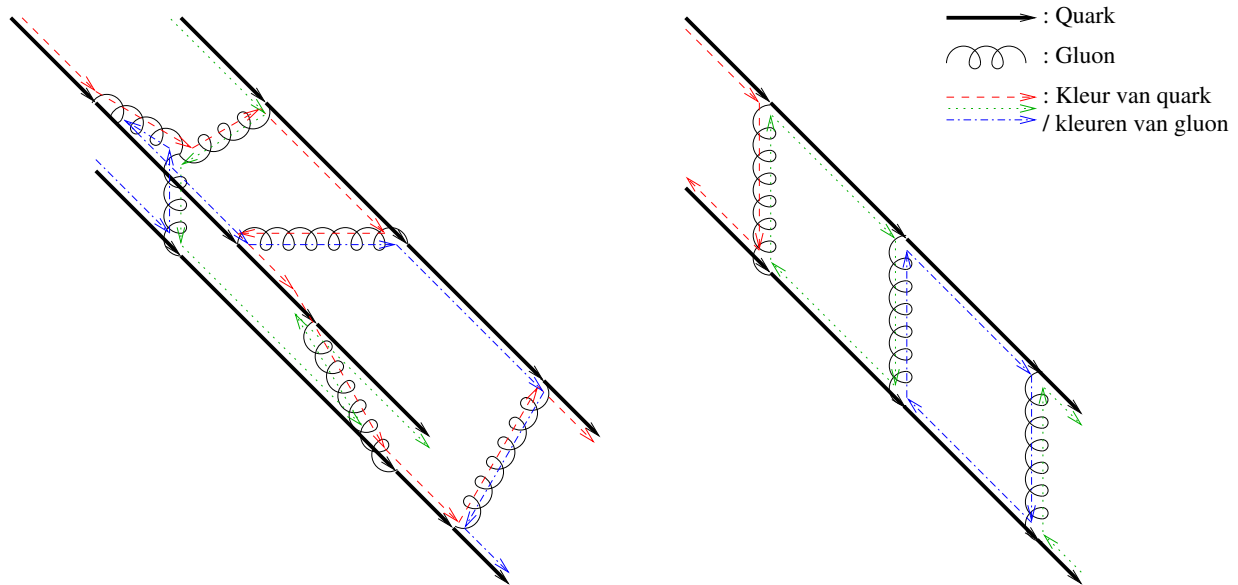
5 De sterke kernkracht

In hadronen zitten geladen quarks / antiquarks, we kunnen ons dus afvragen waarom hadronen niet uit elkaar vliegen. De twee up-quarks in een proton willen door de elektrische kracht veel harder uit elkaar vliegen dan dat het down-quark ze kan vasthouden.

Een tweede probleem is dat quarks als fermionen te beschouwen zijn. De quarks kunnen dus niet in dezelfde quantumtoestand zitten. We hebben een nieuwe quantiseerbare eigenschap nodig. Omdat er drie quarks / anti-quarks in een baryon en een quark anti-quark paar in een meson zitten zijn er 6 mogelijke toestanden voor ieder quark. Toevallig zijn er ook zes kleuren, deze toestanden worden dan ook met kleuren ¹ aangeduid. Als men rood, blauw en groen licht samenvoegd ontstaat wit. Op een vergelijkbare manier kan men een rood, een groen en een blauw quark samenvoegen. Het totaal is dan wit. Op deze wijze zijn baryonen samen te stellen. Om een meson samen te stellen kunnen we bijvoorbeeld een rood en een anti-rood quark gebruiken. Het geheel is nu ook wit.

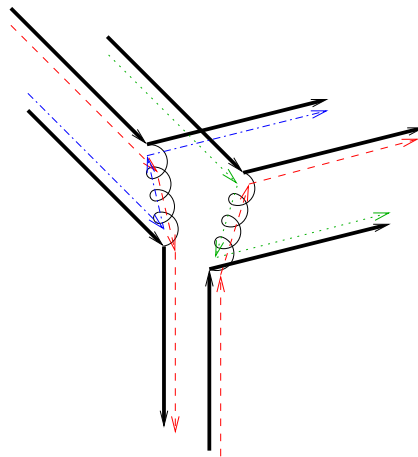
Protonen en ook neutronen worden samengehouden met kleurkrachten, deze kleuren worden constant uitgewisseld. Een rood quark kan rood uitzenden. Als dit quark groen wordt, wordt ook anti-groen uitgezonden, het gluon is dan rood / anti-groen. Dit gluon reageert met andere gluonen of een groene quark dat rood wordt.

¹Rood, groen, blauw, anti-rood, anti-groen en anti-blauw.



Figuur 5.1: Gluonen in baryonen en mesonen

Omdat gluonen bosonen zijn, geldt het uitsluitingsprincipe van Pauli niet. Gluonen kunnen dus op elkaar gestapeld worden. Verder is de richting van het gluon onbekend, het kan net zo goed een $\bar{r}g$ - als een $r\bar{g}$ -gluon zijn. Het gluon is nu te schrijven als $\frac{r\bar{g} + \bar{r}g}{\sqrt{2}}$. Naast dit gluon kunnen ook alle andere kleurcombinaties worden gemaakt. Als er drie kleuren (rood, groen, blauw) met twee toestanden (bijvoorbeeld rood en antirood) zijn, komen we op acht (2^3) mogelijke combinaties. Vijf daarvan zijn reëel en drie imaginair. Er bestaan overigens hypothetische hadronen die louter uit gluonen bestaan, de “glueballs”. Deze zijn (nog) niet (als zodanig) aangetoond.



Figuur 5.2: Baryon / meson interactie met gluonen

Een baryon kan vervallen in een lichter baryon en een meson. Tot slot kan een baryon ook een W^+ -, W^- - of Z -boson uitzenden en vervallen.