

Het Standaardmodel

N.G. Schultheiss

1 Inleiding

Rond het jaar 1900 was de samenstelling van atomen het onderwerp van onderzoek. Joseph John Thomson (1856-1940) dacht dat atomen een soort krentenbollen (eigenlijk plum pudding) waren waar de elektronen als krenten in zaten. Johannes Wilhelm Geiger ¹ (1882-1945) en Ernest Marsden (1889-1970), twee studenten bij Ernest Rutherford (1871-1937), toonden echter met een experiment in 1909 aan dat atomen grotendeels leeg zijn. Het blijkt dat als goudfolie (of aluminiumfolie) wordt bestraald met straling uit Radium, de meeste straling door de folie heen gaat. Een klein deel van de straling wordt weggekaatst, het grootste deel hiervan kaatst zelfs terug. Dit resultaat is te verklaren als atomen bestaan uit een kleine kern in een wolk elektronen.

Een volgend onderwerp voor onderzoek was de samenstelling van de kern. Rond 1919 komt Rutherford tot de conclusie dat kernen zijn te veranderen door ze te bestralen met α -deeltjes (He-kernen). Het blijkt dat de positieve lading van de kern verandert. Het atoom heeft na het bestralen ook andere chemische eigenschappen. Dit is te verklaren met “protonen”. In 1932 ontdekte James Chadwick (1891-1974) het neutron. Hiermee zijn naast elektronen dus ook twee verschillende kerndeeltjes gevonden.

Deze elektronen, protonen en neutronen zijn te herkennen aan verschillende eigenschappen. Zo kunnen we de massa en de elektrische lading van deze deeltjes bepalen. Sommige elementen, die uit deze deeltjes zijn samengesteld, zijn radioactief. Deze elementen vervallen, na een bepaalde tijd (de halfwaardetijd) is de helft over.

Naast de elektrische lading blijkt er ook een magnetisch effect bij deeltjes te bestaan. Deze magnetische eigenschap van deeltjes wordt ook wel “spin” genoemd. In 1897 werd door Pieter Zeeman (1865 – 1943) in eerste instantie gemeten dat de absorptie en emissielijnen van een lamp breder werden als men een magnetisch veld bij de lamp aanbracht. Later bleken deze lijnen zelfs te splitsen.

In 1922 toonden Otto Stern (1888 - 1969) en Walther Gerlach (1889 - 1979) aan dat zilveratomen als geheel een spin hebben. De zilveratomen werden door een magnetisch veld op een scherm geschoten. Op het scherm ontstond geen doorlopende zilverlijn maar twee vlekken met zilveratomen. Blijkbaar hebben zilveratomen een gequantiseerde magnetische eigenschap, spin ². Op een In 1926 toonden Samuel Abraham Goudsmit (1902 - 1978) en George Eugene Uhlenbeck (1900 - 1988) aan dat elektronen ook spin hebben.

¹Johannes Wilhelm Geiger is ook bekend van de Geiger-Müller-teller, die hij samen met Walther Müller (1905-1979) in 1928 ontwikkelde.

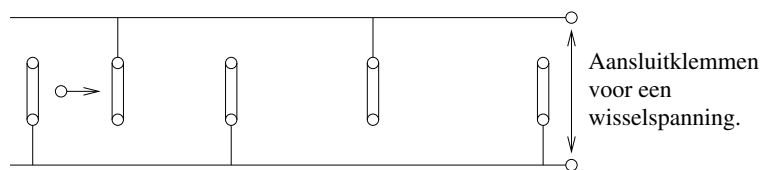
²Omdat spin gequantiseerd is, is er blijkbaar een soort elementair magneetje.

Ook de configuratie van elektronen rond de kern leidde tot veel onderzoek door Niels Bohr (1885-1962), Erwin Schrödinger (1887-1961) en vele anderen. De banen worden berekend met een nieuw soort natuurkunde; de quantummechanica. Zoals in de module “de Broglie” te lezen is, kent een waterstofatoom een aantal exact gedefinieerde elektronbanen. De energie van elektronen in de banen is niet continu maar gequantiseerd. De energieovergangen tussen deze banen zijn daarmee ook vastgelegd. Er ontstaat een spectrum met absorptie- of emissielijnen. Omdat elektronen magnetische deeltjes zijn, kunnen deze banen met een sterk magnetisch veld gesplitst worden. Soms wijst de spin in de richting van het magnetisch veld, soms zijn spin en magnetisch veld tegengesteld gericht. Er is dus een verschil in “magnetische energie”. Zeeman toonde aan dat iedere lijn in een spectrum wordt gesplitst als men de lichtbron in een magnetisch veld zet.

2 Versnellers

Nadat tijdens de tweede wereldoorlog veel onderzoek is gedaan naar kernwapens, gaat het onderzoek naar de samenstelling van de materie verder met deeltjesversnellers. Er zijn globaal twee soorten versnellers, lineaire versnellers en cyclotrons of cirkelvormige versnellers.

In 1945 verzon Luis Walter Alvarez (1911 - 1988) hoe hij uit surplus materiaal uit de tweede wereldoorlog een lineaire versneller kon bouwen. Lineaire versnellers bestaan uit een vacuumbuis waarin een elektrisch geladen deeltjes worden afgeschoten. In de buis zijn vervolgens ringen met een wisselende spanning geplaatst. Omdat gelijke ladingen afstoten en verschillende ladingen aantrekken, kunnen we de deeltjes versnellen door de spanning om te keren als een deeltje door een ring vliegt. Eigenlijk wordt er elektrische energie ($E = q \cdot \Delta V$) omgezet in kinetische of bewegingsenergie ($E = \frac{1}{2}mv^2$) van het deeltje. Deze energie is nu makkelijk te bepalen als we weten hoeveel elementaire lading het deeltje heeft en hoeveel spanning er tussen twee opeenvolgende ringen staat. De lading maal de spanning geeft direct de energie in eV.



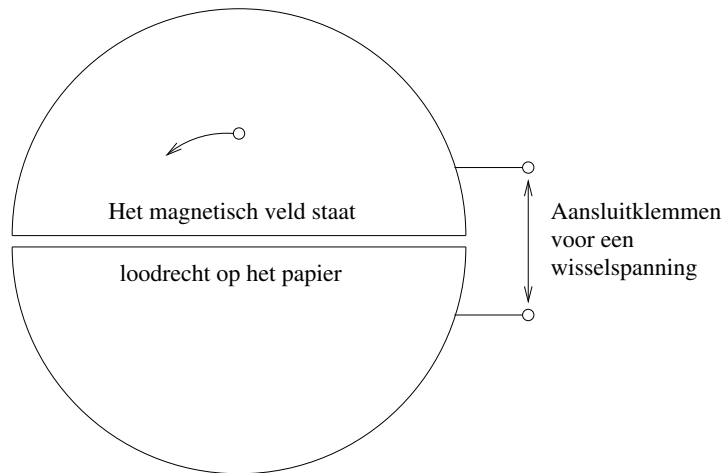
Figuur 2.1: Een schematische voorstelling van een lineaire versneller

Opdracht 1: Bereken hoeveel Joule een energie van 6.6GeV is.

Opdracht 2: Bereken de snelheid van een proton als deze door vijf opeenvolgende ringen vliegt. Neem aan dat de snelheid bij de eerste ring te verwaarlozen is en het spanningsverschil tussen de ringen 1kV is.

Opdracht 3: Leg uit waarom de afstand tussen de ringen steeds groter wordt.

Lineaire versnellers kunnen deeltjes niet meer dan een beperkte hoeveelheid energie geven omdat er een beperkt aantal ringen zijn. In een cyclotron wordt deze beperking opgeheven omdat de deeltjes in een cirkel bewegen. Om de elektrisch geladen deeltjes in een cirkelbaan te laten bewegen is een magnetisch veld nodig.



Figuur 2.2: Een schematische voorstelling van een cyclotron

Iedere keer als het deeltje in figuur 2.2 een halve cirkel aflegt, krijgt het deeltje een extra zetje. Omdat het deeltje steeds sneller gaat, zal de straal van de baan steeds groter worden. Volgens Einstein kunnen deeltjes echter niet sneller gaan dan de lichtsnelheid. Volgens de formule $E = mc^2$ wordt de energie dan omgezet in extra massa.

Opdracht 4: *Wat kun je over de omlooptijd van het deeltje in de cyclotron zeggen als de wisselspanning een constante frequentie heeft?*

Ernest Orlando Lawrence (1901 – 1958) begon in 1929 met de ontwikkeling van cyclotrons. In 1954 resulteerde dit in het Bevatron in het Lawrence Berkeley National Laboratory. Met deze versneller konden protonen worden versneld tot een energie van 6,6 GeV. De protonen hebben dan volgens Einstein een massa van $6,6 \frac{\text{GeV}}{c^2}$.

Opdracht 5: *Bereken hoeveel maal de protonen zwaarder worden als ze een energie van 6,6 GeV krijgen.*

Zoals we weten, is een 1 GeV het zelfde als 10^9 eV of 1 miljard eV. Helaas wordt “een miljard” in het engels vertaald als “one billion”. Als we een “billion electronVolt cyclotron” hebben, is dit dus af te korten tot een Bevatron. Met deze versneller konden voor het eerst antiprotonen worden gemaakt door protonen te laten botsen op stilstaande atomen.

We kennen nu dus al elektronen en anti-elektronen en protonen en anti-protonen. Het is dus ook mogelijk om een anti-waterstof atoom te maken ³.

³In 1996 kon men in CERN antiprotonen opslaan in LEAR, de Low Energy Antiproton Ring. In principe was het maken van antiwaterstof toen mogelijk.

Na de ontdekking van het anti-proton werd er in 1959 een nieuw deeltje gevonden: het pion. In eerste instantie vroeg men zich af of het pion als een soort lijm voor de protonen en neutronen in de kern werkte. Het heelal werd wel veel ingewikkelder. Zou er een anti-pion zijn? Zijn er nog meer deeltjes mogelijk? Om dit te onderzoeken zijn grotere versnellers nodig. Met een grotere versneller kan men meer energie in een deeltje stoppen. In de module “De Broglie” is te lezen dat meer energie een kleinere golflengte voor het deeltje geeft. We kunnen dus kleinere deeltjes vinden.

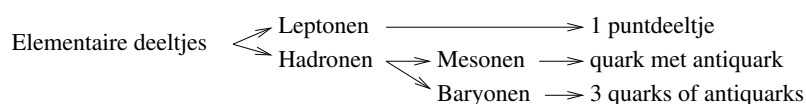
De bundel protonen in het Bevatron had een doorsnede of apertuur van ongeveer $\frac{1}{3}\text{m}^2$. Om een dergelijke grote bundel rond te laten gaan, heb je een grote magneet nodig. Met een smallere bundel hebben we minder magneten nodig en kunnen we deeltjes met meer energie maken. Na de Bevatron kwam de Tevatron die deeltjes een energie van een teraelektronVolt of 10^{12}eV kon geven. Op dit moment zijn er twee onderzoekscentra die de grootste versneller willen bouwen: CERN in Europa ($>2\text{TeV}$) en Fermilab (2TeV sinds de 80er jaren) in Amerika. Men hoopt met de LHC (Large Hadron Collider) in Cern deeltjes een energie te geven van 7TeV . In de LHC lopen twee bundels tegengesteld met beide een diameter van $16\mu\text{m}$. Omdat er twee bundels botsen, komt er maximaal (botsingscentraal) 14TeV vrij.

Opdracht 6: *Protonen maken in de LHC rondjes van 27km. Ze blijven daarbij in een bundel van $16\mu\text{m}$. De maan is ongeveer 1lichtseconde van ons weg. We kunnen de LHC in gedachten vergroten tot de diameter van de maan rond de Aarde. Bereken hoe groot de bundel in verhouding zou zijn als we ons voorstellen dat de protonen de baan van de maan volgen.*

3 Quarks

Uit botsingsproeven met versnellers blijkt dat protonen en neutronen ook weer uit deeltjes bestaan. Deze worden “quarks” genoemd. Zowel protonen als neutronen bevatten drie quarks.

We kunnen elementaire deeltjes op de volgende manier opdelen:



Leptonen zijn deeltjes zoals elektronen, positronen of neutrino's. Omdat protonen en neutronen uit drie quarks bestaan, moeten dit wel baryonen zijn. Op mesonen komen we nog terug.

Het proton bestaat uit 2 “up” quarks en 1 “down” quark. Het neutron bestaat uit 2 “down” quarks en 1 “up” quark. Om een antideeltje te maken hebben we ook “anti-up” quarks en “anti-down” quarks nodig. Deze quarks werden met de eerste generatie versnellers gevonden en worden dan ook eerste generatie quarks genoemd.

Met grotere versnellers kunnen we ook quarks van de tweede en derde generatie aantonen. Op dit moment kennen we de volgende quarks:

Generatie	Spin	Naam	Symbool	Q [e]	Massa [$\frac{\text{MeV}}{c^2}$]
1	1/2	up	u	$\frac{2}{3}$	1,5 tot 3
1	-1/2	down	d	$-\frac{1}{3}$	4 tot 8
2	-1/2	strange	s	$-\frac{1}{3}$	80 tot 130
2	1/2	charm	c	$\frac{2}{3}$	1150 tot 1350
3	-1/2	bottom	b	$-\frac{1}{3}$	4100 tot 4400
3	1/2	top	t	$\frac{2}{3}$	170000 tot 175000

Zoals te zien is, is er veel meer energie nodig om een quark van de tweede of derde generatie te maken, dan om een quark van de eerste generatie te maken ⁴.

Daarnaast valt op dat quarks een lading hebben, deze is $+\frac{2}{3}e$ en $-\frac{1}{3}e$ voor de quarks en $-\frac{2}{3}e$ en $+\frac{1}{3}e$ voor de antiquarks. In de samengestelde deeltjes vinden we alleen ladingen van $-2e$, $-1e$, $0e$, $1e$ of $2e$. Blijkbaar geeft dit dus een regel voor het samenvoegen van quarks.

4 Fermionen en bosonen

Quarks kunnen op verschillende manieren worden samengevoegd. Het blijkt dat de spin een belangrijke eigenschap van de uit quarks samengestelde deeltjes is. De deeltjes zijn nu ook weer in twee groepen te splitsen: Fermionen en Bosonen.

Fermionen zijn naar Enrico Fermi (1901 – 1954) genoemd. Fermionen zijn deeltjes met een halftallige spin, zoals \dots , $-3/2$, $-1/2$, $1/2$, $3/2$, \dots . Ieder fermion moet in een unieke toestand zitten. Dit is bijvoorbeeld te zien in het He-4 atoom. De 2 protonen en de 2 neutronen zitten in de kern. Protonen, neutronen en elektronen maken deel uit van de fermionen. Rond de kern draaien ook 2 elektronen. In het geval dat de energie op zijn laagst is, zitten beide elektronen in de schil die het dichtst bij de kern is. Op het eerste gezicht lijken de elektronen dus beide in dezelfde toestand te zijn. Het ene electron heeft echter een spin van $1/2$ en het andere een spin van $-1/2$. De toestand is dus op de spin na hetzelfde. Omdat de spin verschilt, verschilt de toestand waarin de elektronen zich bevinden ook. Hieruit volgt dat er niet meer dan twee elektronen in een orbitaal (baan) zitten.

Het feit dat twee gelijke toestanden uitgesloten zijn, heet ook wel het Pauli-principe. Dit principe is genoemd naar Wolfgang Ernst Pauli (1900 – 1958)

Bosonen zijn naar Satyendra Nath Bose (1894 – 1974) genoemd. Bosonen hebben een heeltallige spin, zoals \dots , -2 , -1 , 0 , 1 , 2 , \dots . Het He-4 atoom is als geheel te beschouwen als een boson. Er zijn 6 deeltjes met ieder een spin van $1/2$ of $-1/2$. Als we alle mogelijke combinaties voor de spin bekijken, komt de som altijd op een geheel getal uit.

Als He-4 wordt afgekoeld, ontstaat er een bijzondere toestand. De vloeistof wordt een Bose-Einstein condensaat en gedraagt zich niet meer als een verzameling atomen maar als een geheel.

Omdat er geen Pauli-uitsluiting is, stroomt het He naar de laagste energie toestand. Als het in een potje zit, stroomt het er vanzelf uit.

⁴De massa is met $E = mc^2$ ook te geven als $m = \frac{E}{c^2}$.

Opdracht 7: Zoek een filmpje over *supervloeibaar Helium*. Ik heb en filmpje gevonden op:

https://youtu.be/TBi908sct_U / Superfluid Helium (with Subtitles)

5 Leptonen

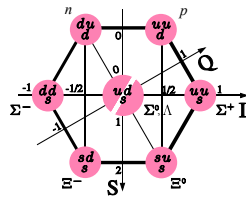
Leptonen zijn fermionen waarvan men tot op heden aanneemt dat deze niet gedeeld kunnen worden. Het bekendste lepton is het elektron. In de module “De zon” hebben we gezien dat een elektron ook een antideeltje heeft: het positron. Deze deeltjes hebben ook zwaardere broertjes of zusjes, het muon en het tauon. Daarnaast zijn er ook nog neutrino’s met ook zwaardere broertjes of zusjes. Volgens Einstein betekent een zwaarder deeltje dat het meer energie bevat. Omdat deze energie er uit kan, vervallen deze deeltjes.

Eigenschappen van leptonen								
Naam deeltje / antideeltje	Symbool	Q [e]	S	L_e	L_μ	L_τ	Massa [$\frac{\text{MeV}}{c^2}$]	Halfwaarde [s]
Elektron / Positron	e^-/e^+	-1/+1	1/2	+1/-1	0	0	0.510998910	Stabiel
Muon / Antimuon	μ^-/μ^+	-1/+1	1/2	0	+1/-1	0	105.6583668	$2.197019 \cdot 10^{-6}$
Tauon / Antitauon	τ^-/τ^+	-1/+1	1/2	0	0	+1/-1	1,776.84	$2.906 \cdot 10^{-13}$
Elektron neutrino / Elektron antineutrino	$\nu_e/\bar{\nu}_e$	0	1/2	+1/-1	0	0	< 0.0000022	Onbekend
Muon neutrino / Muon antineutrino	$\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$	0	1/2	0	+1/-1	0	< 0.17	Onbekend
Tauon neutrino / Tauon antineutrino	$\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$	0	1/2	0	0	+1/-1	< 15.5	Onbekend

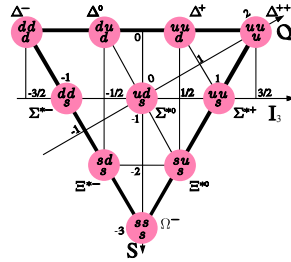
6 Baryonen

Baryonen zijn samengestelde deeltjes waarin 3 quarks zitten. Bekende baryonen zijn het proton en het neutron. Omdat quarks een spin van 1/2 of -1/2 hebben⁵, moeten baryonen ook fermionen zijn. Eén van de quarks kan een tegengestelde spin aan de andere twee quarks hebben. Er ontstaan baryonen met spin -1/2 of 1/2. Deze deeltjes bevatten up-quarks (*u*) of down-quarks (*d*). Toen men met versnellers ging meten aan deze deeltjes ontdekten men vreemde nieuwe deeltjes. Om deze deeltjes te kunnen maken, is er een nieuw quark nodig: het strange-quark (*s*). Uiteraard kan de spin van drie quarks ook evenwijdig zijn, er ontstaat dan een deeltje met spin -3/2 of 3/2.

⁵Volgens Zeeman kent de spin twee gequantiseerde toestanden. De spin is dus altijd gelijkgericht of tegengesteld gericht.



Figuur 6.1: Baryonen met spin -1/2 of spin 1/2



Figuur 6.2: Baryonen met spin -3/2 of 3/2

7 Krachten

Mensen worden op aarde gehouden door de zwaartekracht. Electroneen worden aan een kern gebonden door de elektrische kracht. De elektrische kracht is veel sterker dan de zwaartekracht.

In de kern werkt ook een kracht om de de protonen en neutronen bij elkaar te houden, de zwakke kernkracht. Deze zwakke kernkracht is overigens veel sterker dan de elektrische kracht. Verder wordt de kracht groter als de kerndeeltjes verder uit elkaar komen.

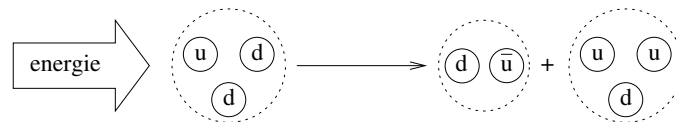
De quarks binnen een hadron moeten ook bij elkaar worden gehouden, dit gebeurt met een nog sterkere kracht, de sterke kernkracht.

7.1 Krachten in de kern

In de kern zitten protonen, we kunnen ons dus afvragen waarom de protonen niet de kern vliegen. Toen men het pion had ontdekt, dacht men de oorzaak van het aan elkaar plakken van protonen gevonden te hebben. Uitgaande van de elektrische kracht is dit op de volgende wijze te beredeneren:

- De elektrische kracht is gequantiseerd voor te stellen als 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 dus mogelijk om gedurende korte tijd (Δt) energie (ΔE) te lenen.
- Volgens $E = mc^2$ kan deze energie worden omgezet in een kortlevend deeltje dat op een pion lijkt.



Figuur 7.1: Geleende energie bij een proton

Zoals in figuur 7.1 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 wordt geabsorbeerd. Het deeltje werkt dus inderdaad als een soort kracht.

Helaas weten we niet welke combinatie van een quark en een anti-quark ontstaat. Het nieuwe deeltje is het eerder genoemde pion. Een pion hoort bij een hele nieuwe groep deeltjes; de mesonen. Zoals te zien is, zijn mesonen samengestelde deeltjes waarin 2 quarks zitten. Mesonen zijn dus ook bosonen.

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.

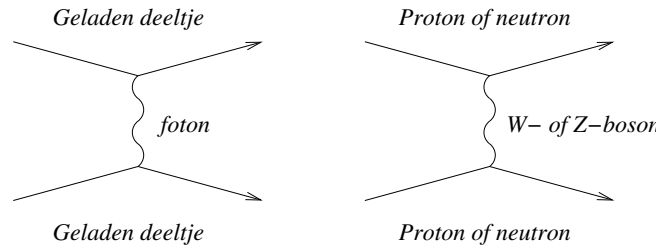
Opdracht 8: *Beredeneer hoe het π^+ - en π^- -deeltje zijn samengesteld.*

Als we de samenstelling van een π^0 -deeltje 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.

Tegenwoordig gaat men er van uit dat het W-boson verantwoordelijk is voor de kracht tussen kerndeeltjes. De “W” duidt aan dat het de zwakke kernkracht (weak force) betreft. W-bosonen zijn positief of negatief. Daarnaast zijn er ook ongeladen Z-bosonen. Aangezien het deeltje kort leeft en zich (net) niet met de lichtsnelheid kan verplaatsen, kan de zwakke kernkracht niet ver komen. Buiten de atoomkern vindt men deze kracht ook niet.

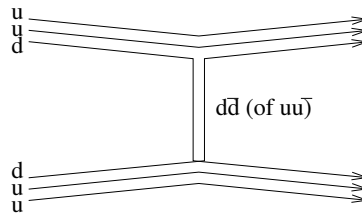
Opdracht 9: *Bereken de levensduur van een W^- -boson als je weet dat $\hbar = 1,0545 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ is en we aannemen dat het W^- -boson opgebouwd is als een pion (met twee quarks). Hoeveel energie moet er geleend worden?*

Opdracht 8: *Bereken hoever het W^- -boson kan komen als het met de lichtsnelheid zou kunnen bewegen.*



Figuur 7.2: Feijnman diagrammen

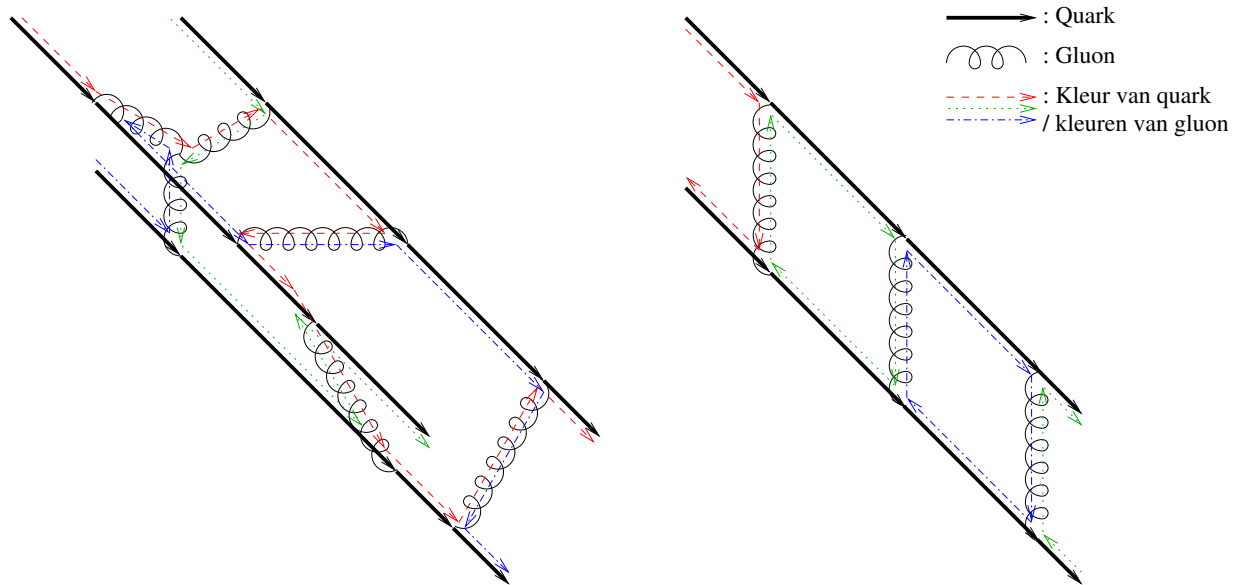
De werking van deze kracht is voor te stellen met een Feynman-diagram (figuur 7.2). Een Feynman-diagram beschrijft de plaats / tijd ruimte. Als een deeltje terug in de tijd beweegt, is dit deeltje te beschouwen als een anti-deeltje. In figuur 7.3 zijn de quarks ook in het diagram te zien. Als we aannemen dat het pion (eigenlijk een Z-boson) van boven naar beneden beweegt, is het \bar{d} -quark in het pion dus eigenlijk te beschouwen als een d-quark dat tegen de tijd in reist.



Figuur 7.3: De zwakke kracht als meson-uitwisseling

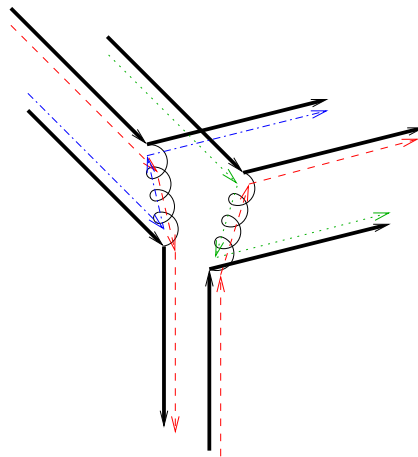
7.2 De sterke kernkracht

In hadronen zitten geladen deeltjes, 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. Er moet dus nog een kracht in het proton zijn. Protonen en ook neutronen worden samengehouden met kleurkrachten, de kleuren worden constant uitgewisseld. Een rood quark kan rood uitzenden. Als dit quark groen wordt, wordt ook antigroen uitgezonden, het gluon is dan rood / antigroen. Dit gluon reageert met andere gluonen of een groene quark dat rood wordt.



Figuur 7.4: 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 7.5: Baryon / meson interactie met gluonen

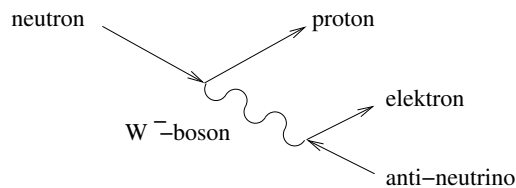
Een baryon kan vervallen in een lichter baryon en een meson. Verder kan een baryon ook een W^+ -, W^- - of Z -boson uitzenden.

Het W^+ - en W^- -boson kan vervallen in een lepton en een neutrino of een quark en een anti-quark, de quarks hebben een verschillende lading ($\frac{1}{3}e$ en $\frac{2}{3}e$ of $-\frac{1}{3}e$ en $-\frac{2}{3}e$). Het Z -boson kan vervallen in

een lepton en een antilepton 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.

8 Neutron verval

Zoals bekend vervalt een neutron in een proton onder uitzending van een elektron en een neutrino. Dit is als volgt in een Feynman-diagram voor te stellen:



Figuur 8.1: Het Feynman-diagram voor neutron verval

De interactie van het neutron naar een proton en een W^- -boson gaat volgens figuur 7.5. 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 neutrino. Het elektron en het neutrino hebben geen kleur.

De interactie van een W^- -boson naar een quark en antiquark gebeurt ook volgens figuur 7.5. Omdat de tijd voor het antiquark van richting verandert, wordt het een quark.

(Isospin) pion=1.0 plus proton=0.5 geeft delta=1.5 (delta is aangeslagen proton / neutron)