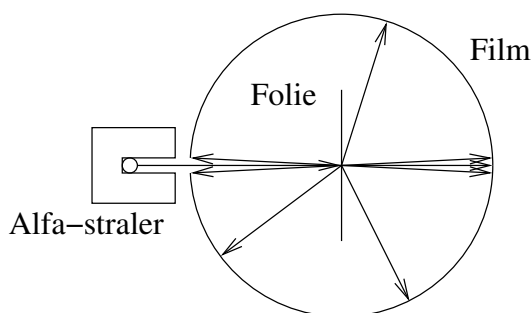


Deeltjes binnen het standaardmodel

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 weg- en zelfs teruggekaatst. Dit resultaat is te verklaren als atomen bestaan uit een kleine kern in een wolk elektronen.



Figuur 1.1: Het Rutherford-experiment

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.

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.

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

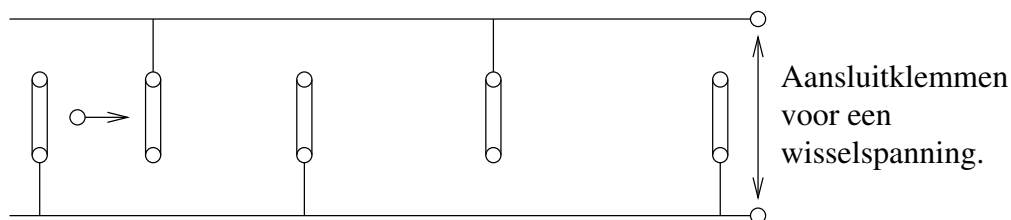
Op het scherm ontstond geen doorlopende zilverlijn maar twee vlekken met zilveratomen. Blijkbaar hebben zilveratomen een gequantiseerde magnetische eigenschap, deze wordt spin² genoemd. In 1926 toonden Samuel Abraham Goudsmit (1902 - 1978) en George Eugene Uhlenbeck (1900 - 1988) aan dat elektronen ook spin hebben.

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. Deze versnellers bestonden 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 ($E = q * \Delta V$) 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 eV³.



Figuur 2.1: Een schematische voorstelling van een lineaire versneller

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

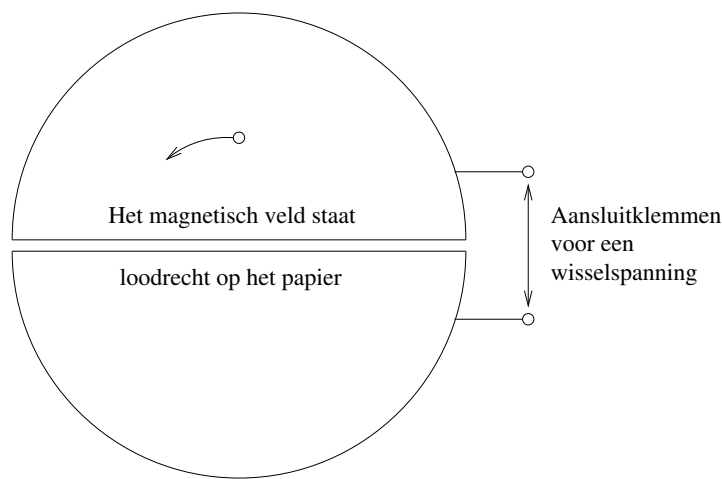
²Omdat spin gequantiseerd is, is er blijkbaar een soort elementair magneetje.

³De eenheid [eV] is het product van [e] de elementaire lading en [V] of $\left[\frac{J}{C}\right]$.

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? Hoe kan een deeltje dan toch een grotere snelheid krijgen?

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 6,6GeV. 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 6,6GeV krijgen.

Zoals we weten, is een 1GeV 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 ⁴.

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.

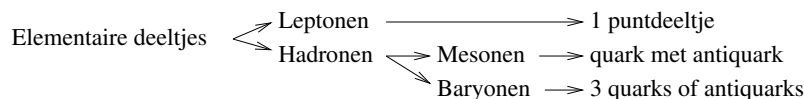
De bundel protonen in het Bevatron had een doorsnede of apertuur van ongeveer $\frac{1}{3}\text{m}^2$. Om een dergelijke grote bundel rond te laten gaan, heb je een grote magneet nodig. Met een smallere bundel hebben we minder magneten nodig en kunnen we deeltjes met meer energie maken. Na de Bevatron 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 op de botsingsplaatsen 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 en gaat daarbij vier keer door een oppervlak met een diameter van $16\mu\text{m}$. De maan is ongeveer 1lichtseconde van ons weg. Bereken hoe groot een doel op de maan 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 in de module “Krachten binnen het standaardmodel”.

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 en antiquarks werden met de eerste generatie versnellers gevonden en worden dan ook eerste generatie quarks genoemd.

⁴In 1996 kon men in CERN antiprotonen opslaan in LEAR, de Low Energy Antiproton Ring. In principe was het maken van antiwaterstof toen mogelijk.

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]
1	1/2	up	u	2/3
1	-1/2	down	d	-1/3
2	-1/2	strange	s	-1/3
2	1/2	charm	c	2/3
3	-1/2	bottom	b	-1/3
3	1/2	top	t	2/3

Dit model is door Murray Gell-Mann (1929) uit de groepentheorie ontwikkeld en staat bekend als SU(3) of het achtevoudig pad. Het 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 in 1925 geformuleerd door 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. Dit Bose-Einstein condensaat 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.

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. Leptonen worden als puntdeeltjes beschouwd. 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.

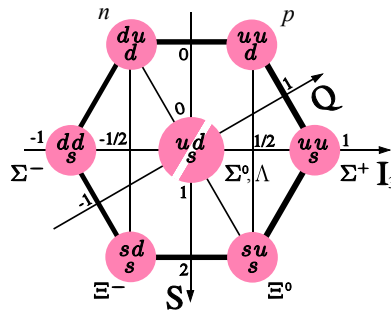
Eigenschappen van leptonen								
Naam deeltje / antideeltje	Symbol	Q [e]	S	L_e	L_μ	L_τ	Massa [$\frac{\text{MeV}}{c^2}$]	Halfwaarde [s]
Elektron / Positron	e^-/e^+	-1/+1	1/2	+1/-1	0	0	0.510998910	Stabiel
Muon / Antimuon	μ^-/μ^+	-1/+1	1/2	0	+1/-1	0	105.6583668	$2.197019 \cdot 10^{-6}$
Tauon / Antitauon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

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 hebben ⁵, 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. Deze deeltjes hebben een relatief grote halfwaardetijd van 10^{-10} s. 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.

Verder viel het Werner Heisenberg in 1932 (ver voor de ontdekking van quarks) op dat neutronen en protonen op de lading na vrijwel identiek waren. Hij beschouwde het neutron daarom als een andere toestand van het proton. Om dit verschil aan te geven introduceerde hij een nieuwe eigenschap van nucleonen. Deze eigenschap werd in 1937 door Eugene Wigner aangeduid met “isospin” of I_3 . In de figuren 6.1 en 6.2 is deze eigenschap langs de horizontale as uitgezet. Langs de verticale as staat de “strangeness” van het deeltje uitgezet. Zoals te zien is, is deze voor protonen en neutronen 0 omdat deze geen s-quarks bevatten.

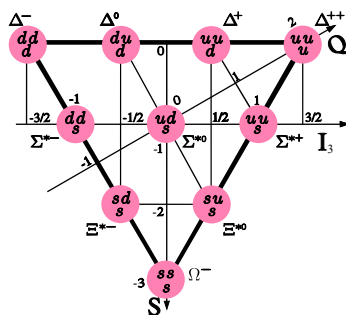


Figuur 6.1: Baryonen met spin -1/2 of spin 1/2

Omdat quarks fermionen zijn, kunnen ze natuurlijk alleen in een unieke quantumtoestand voorkomen. Als er meerdere deeltjes mogelijk zijn, moeten ze ieder een eigen quantumtoestand hebben en is hier een grootte voor te vinden. In de figuren 6.1 en 6.2 (op Wikipedia te vinden), zijn dit de isospin I_3 , strangeness S en lading Q . Het lijkt erop dat de lading het gevolg is van de isospin en de strangeness. Het verschil tussen figuur 6.1 en 6.2 zit in de spin van het baryon.

Verder valt op dat men een neutron kan veranderen in een Δ^0 door de totale spin van het baryon te veranderen (het quark met een tegengestelde spin bij het neutron krijgt een gelijke spin). Een Δ^0 is dus te beschouwen als een aangeslagen neutron.

We kunnen nu overigens ook verklaren dat er alleen baryonen met ddd-, uuu-, of sss-quark combinaties zijn als de spin $\frac{3}{2}$ of $-\frac{3}{2}$ is. De combinatie van de spin is dan uniek. Als de spin met drie gelijke quarks $\frac{1}{2}$ of $-\frac{1}{2}$ zou zijn, kunnen er meerdere mogelijkheden zijn om dit met de spin van de drie quarks te maken. Dit mag niet volgens het Pauli-principe.



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