IN AFWACHTING VAN HET ZESDE QUARK[1]

door

Pierre van Baal, Instituut-Lorentz, Universiteit Leiden

Samenvatting
In deze voordracht zal de huidige stand van de natuurkunde der elementaire deeltjes worden geschetst aan de hand van de recente experimentele resultaten die verkregen zijn met de grote deeltjesversnellers op o.a. het Cern te Genève en het Fermilab nabij Chicago. Deze resultaten stemmen nauwkeurig overeen met de theoretische voorspellingen en er wordt uiteengezet waarom we verwachten een zesde quark (het zogenaamde top quark) te vinden bij de experimenten die momenteel gaande zijn. De hoop, en de verwachting was dat bij het uitspreken van deze voordracht (op 21 februari 1994) we U op de hoogte konden brengen van de ontdekking van dit quark. Men beweert *nu* het toen al gezien te hebben, maar officieel is hier pas twee maanden later (op 26 april 1994) ruchtbaarheid aan gegeven. Bij het opschrijven van deze voordracht zal ik schetsen waarom het detecteren van het top quark zo moeizaam gaat. Veel over de elementaire deeltjes is nog onbekend en de belangrijkste vragen die nog open staan zullen de revue passeren. Ter sprake komt de rol die het illustere Higgs deeltje zou moeten spelen bij de verklaring van de massas van de elementaire deeltjes, al ligt de werkelijke verklaring hiervoor wellicht in een correcte beschrijving voor de quantumtheorie van gravitatie. De verschillende versies van een geunificeerde theorie hebben helaas nog niet geleid tot een overtuigend begrip van deze belangrijke problemen, maar hebben wel aanleiding gegeven tot experimenten om de levensduur van het proton te meten. U hoeft zich geen zorgen te maken, verval van een proton is nog steeds niet waargenomen. Wel hebben deze gigantische detectoren intussen de neutrinos van een supernova "gezien" en daarbij een belangrijke bijdrage geleverd tot een beter begrip van de sterevolutie. Op deze en andere toepassingen van de verworven fundamentele kennis der elementaire deeltjes zal kort worden ingegaan.

Deeltjes en krachten
Ruwweg bestaat de ons omringende wereld uit twee soorten deeltjes: de *krachtvoelende* en de *krachtvoerende* deeltjes. De krachtvoelende deeltjes zijn onderverdeeld in twee categorieën, de *leptonen* (zoals het elektron en het neutrino) en de *hadronen* (zoals het proton en neutron). De krachtvoerende deeltjes zijn de dragers van de kracht tussen de krachtvoelende deeltjes en worden ook wel *ijkdeeltjes* genoemd, met als voorbeeld het foton (ofwel lichtquantum). Het

[1]Verschenen in: Natuurkundige Voordrachten, Nieuwe Serie, 72 (1994) 85-99, Koninklijke Maatschappij voor Natuurkunde, Diligentia, Den Haag.

elektron, het proton en het foton zijn de belangrijkste ingrediënten voor de opbouw van de materie. Een elektron wordt aan een proton gebonden door de electromagnetische aantrekkingskracht, die tot stand komt door de uitwisseling van fotonen tussen beide deeltjes. Het vormt zo een waterstofatoom met een afmeting van ongeveer één ångström, hetgeen 10^{-10}m is. De electromagnetische kracht komt tot stand door de uitwisseling van fotonen tussen electron en proton. Het onderscheid tussen leptonen en hadronen volgt uit de mate waarin ze gevoelig zijn voor de verschillende krachten. Er zijn vier krachten bekend: de zwaartekracht, de zwakke kracht, de electromagnetische kracht en de sterke kracht, in volgorde van sterkte. Leptonen zijn ongevoelig voor de sterke kracht en veelal licht, terwijl hadronen wel de sterke kracht voelen en veelal zwaarder zijn. De zwaartekracht is speciaal in de zin dat die kracht altijd aantrekkend is (het is daarom maar goed dat de zwaartekracht zo zwak is). Voor de drie overige krachten heeft men naast aantrekking ook afstoting.

De sterke kracht

Zo is de sterke kracht verantwoordelijk voor het bijeenhouden van de protonen en neutronen in de kern van een atoom, men noemt het dan de kernkracht. Deze kernkracht is echter een zwak restant van de sterke kracht. De hadronen (zoals het proton en neutron) zijn namelijk weer opgebouwd uit andere, kleinere deeltjes, de zogenaamde *quarks*. Zo bestaat het proton uit twee *up* (op) en één *down* (neer) quark met een fractionele electrische lading van resp. min tweederde en eenderde maal de elektronlading, terwijl het neutron bestaat uit één up en twee down quarks. Het is de sterke kracht die de quarks bijeenhoudt in een proton of neutron, zoals de electromagnetische kracht de elektronen gebonden houdt aan een kern. Er is echter een fundamenteel verschil. Een atoom kan ontbonden worden in haar samenstellende delen, de ionisatie. Een fractionele lading is nog nooit waargenomen. Een proton kan dus kennelijk niet ontbonden worden in quarks.

Toch kan men de quarks binnen het proton (met een afmeting van één fermi, ofwel $10^{-15}m$) waarnemen door de sterke afbuiging van zeer snelle elektronen (die zelf nog eens een factor honderdduizend kleiner dan een proton zijn, dus 10^{-20}m). Men ziet dan dat het proton drie harde pitten heeft, de quarks met de eerder genoemde fractionele ladingen [1]. Kennelijk worden de quarks zo sterk gebonden dat we ze niet vrij kunnen maken. Dit heet het opsluitingsprincipe (ofwel *confinement*). De kracht wordt veroorzaakt door de uitwisseling van een ijkdeeltje, dat de toepasselijke naam *gluon* (of lijmdeeltje) heeft gekregen. Ook een gluon is echter nog nooit rechtstreeks, d.w.z. buiten een hadron, waargenomen. Wel kunnen hadronen vervallen in andere hadronen onder het uitzenden van *mesonen*.

Dit zijn hadronen die bestaan uit één quark en één anti-quark. Een antideeltje is een deeltje waarvan alle eigenschappen, zoals lading en spin (d.w.z. hoeveelheid draaiing) precies tegengesteld zijn aan die van een deeltje. Hadronen hebben allen een heeltallige lading (in eenheden van de elektronlading).

Op zo'n heeltallige lading na hebben de quarks een lading die eenderde is van de elektronlading, immers een lading van min tweederde scheelt precies één met de lading eenderde. Evenzo hebben de anti-quarks op een heeltallige lading na allen een lading die min eenderde maal de elektronlading is. Kennelijk moet het aantal quarks en het aantal anti-quarks binnen een hadron altijd een exact drievoud verschillen.

Dit wordt verklaart door het feit dat ieder quark drie varianten heeft die van elkaar verschillen door een eigenschap die *kleur* wordt genoemd. De theorie van de sterke kracht staat dan ook bekend als de *Quantum Kleurendynamica* (Quantum Chromodynamica, QCD). De reden om deze eigenschap kleur te noemen is even fundamenteel als simpel. Er zijn ook precies drie hoofdkleuren: rood, groen en blauw. Als we die mengen krijgen we wit. Evenzo levert menging van een kleur met zijn complementaire kleur (min of meer per definitie) wit. Geven we de anti-quarks de geconjugeerde kleuren van de quarks, dus de kleuren zeegroen, violet en geel, dan is de regel dat alleen *kleurloze* combinaties direct waarneembaar zijn. Dit betekent inderdaad dat een quark of in de buurt van een anti-quark of van twee andere quarks moet zijn om zijn kleur te neutraliseren. In het eerste geval vinden we een meson, in het tweede een *baryon*. Maar het impliceert ook dat zes quarks gesplitst kunnen worden in twee kleurloze combinaties, die niet langer in elkaars buurt hoeven te blijven.

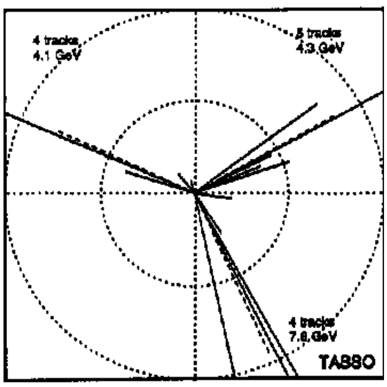
De kleurloosheids hypothese verklaart evenzeer waarom het gluon van zijn vrijheid wordt beroofd. Dit komt omdat een gluon de kleur van het quark kan veranderen onder het uitwisselen van de sterke kracht met een ander quark (het draagt daarom de kleurencombinatie van een quark-anti-quark paar). Uit de negen combinaties van kleur en complementaire kleur, is er één combinatie die kleurloos gekozen kan worden en dus vrij moet kunnen voorkomen. Dit is precies het foton dat de electromagnetische kracht uitwisselt en zich niet mengt met de sterke kracht. Er zijn dus acht verschillende gluonen. Omdat zij een kleurencombinatie dragen, kunnen ze onderling met elkaar een interactie aangaan. Ze zijn dus naast krachtvoerende deeltjes ook krachtvoelende deeltjes. Dit in tegenstelling met een foton dat niet (althans rechtstreeks) met zichzelf een interactie kan aangaan.

Van quarks tot jets

Dat de sterke kracht inderdaad sterk is, volgt uit de bestudering van de massas van de mesonen als functie van hun hoeveelheid draaiing (de spin dus). Net als in een draaimolen, waar we ons goed moeten vasthouden opdat we er niet uit worden geslingerd, zo ook moeten het quark en anti-quark elkaar goed "vasthouden". Het blijkt dat het kwadraat van de massa van de mesonen evenredig is met hun impulsmoment. Dit verband wordt wel de Regge lijn genoemd. Uit de evenredigheidsconstante leidt men de kracht af. Deze blijkt in redelijke benadering onanfhankelijk te zijn van de afstand (voor afstanden groter dan ongeveer eenderde fermi) en bedraagt maar liefst 10 tot 15 ton.

Als het meson te hard ronddraait wordt het instabiel, maar het kan niet in een quark en een anti-quark uiteenvallen. Echter, omdat het up en down quark erg licht zijn, en de energie in het veld dat de quarks bij elkaar moet houden groot is, kan er een quark-anti-quark paar gecreëerd worden, waarvan het anti-quark (resp. quark) zich voegt bij het oorspronkelijke quark (resp. anti-quark) van het rondtollende meson. Dit kan aldus uiteenvallen in twee mesonen. Soms is de energie in het veld zo groot, dat er vele quark-anti-quark paren worden gecreëerd, zich hergroeperend in een groot aantal kleurloze combinaties, de hadronen.

Iets vergelijkbaars gebeurt als we bijv. met een snel electron een van de quarks binnen een proton raken. Niet alleen wordt het electron dan heel sterk afgebogen, maar ook het quark krijgt een behoorlijke zet. Daardoor zal het zich uit het proton proberen te verwijderen, maar dat kan alleen als er een quark-anti-quark paar wordt gecreëerd, waarvan het quark achterblijft om de kleur van de twee quarks in het proton (die niet door het electron werden geraakt) te neutraliseren, terwijl het anti-quark zich bij het wegvliegende quark vervoegt, om eveneens de kleur te neurtraliseren. We zien dan dus een meson uit het proton wegvliegen. Wederom, als de energie maar groot genoeg is, zullen vele hadronen wegvliegen, in een richting die (na middeling) met de richting van het oorspronkelijke quark, dat door het electron werd geraakt, zal overeenkomen. De verzameling hadronen afkomstig van een snel quark wordt een *jet* genoemd, en het proces van het afschermen van de quark kleur door de creatie van quark-anti-quark paren en de daaropvolgende hergroepering in hadronen, de *hadronisatie*. Als voorbeeld geven we in figuur 1 de jets van een typisch proces waarbij uit de annihilatie van een electron-positron paar een quark-anti-quark en een gluon worden gecreëerd, allen met een hoge energie. Ten gevolge van de hadronizatie krijgt men daardoor drie jets. Het was op deze wijze dat in 1979 bij het versnellersinstituut Desy te Hamburg voor het eerst indirect het gluon werd waargenomen.



Figuur 1: Drie jets afkomstig van een quark, anti-quark en gluon gecreëerd uit electron-positron annihilatie, zoals waargenomen op Desy.

Jets vormen een essentieel onderdeel van de zoektocht naar het top quark. Veel van de experimenten om het te vinden worden ondernomen met een zogenaamde *hadron versneller* (ook wel ppbar colliders genoemd, p is het symbool voor het proton, $\bar{p}$ (pbar), is het symbool voor het anti-proton). Hierbij worden protonen en anti-protonen in tegengestelde richting tot grote snelheden versneld in ringvormige deeltjesversnellers. De grootste versneller van dit type staat momenteel in de Amerkaanse staat Illinois (nabij Chicago), en heeft een omtrek van 6,4 kilometer. De maximale energie van het proton is bijna 1 TeV (terra electronvolt). De versneller draagt dan ook de naam Tevatron. De energie en massa (equivalent met energie via Einsteins relatie $E = mc^2$) wordt in de deeltjesfysica veelal in GeV's uitgedrukt, waarbij één Gev ongeveer gelijk gesteld kan worden aan de massa van het proton. Een TeV is dan gelijk aan duizend GeV.

Bij een botsing tussen een proton en anti-proton is bij het Tevatron dus in principe bijna 2 TeV beschikbaar aan energie om nieuwe deeltjes te vormen. Echter, omdat het proton en anti-proton ieder uit drie (anti-)quarks zijn opgebouwd is in praktijk lang niet al deze energie beschikbaar. De kans dat alle drie de quarks binnen het proton tegelijkertijd met alle drie de anti-quarks binnen het anti-proton zullen reageren is verwaarloosbaar klein bij deze energie. Bovendien weet men nooit precies met welke energie een quark uit het proton met een anti-quark uit het anti-proton zal botsen, omdat binnen een proton de quarks ook nog een eigenbeweging hebben.

De zwakke kracht

De verschillende soorten quarks worden *smaken* (flavours) genoemd. Het gluon kan wel de kleur maar niet de smaak van een quark veranderen. De verschillende kleuren van een smaak hebben allen dezelfde massa. (Dit komt omdat de kleur samenhangt met een SU(3) symmetrie.) Twee smaken hadden we al genoemd, het up en down. Daarnaast zijn er het *strange, charm, bottom* en het illustere *top* quark, waarvan men nu beweert dat het is waargenomen. In tabel I vindt U een samenvatting van de eigenschappen van deze deeltjes, zoals de lading, spin en de massa. De essentie van de smaken van de quarks is dat deze door de krachtvoerende deeltjes van de zwakke wisselwerking kunnen veranderen. Deze krachtvoerende deeltjes zijn wederom ijkdeeltjes, die in drie vormen voorkomen, W-deeltjes met een lading gelijk of tegengesteld aan die van het electron en het Z-deeltje, dat electrisch neutraal is. De zwakke wisselwerking is op een intrigrerende wijze met die van de electromagnetische wisselwerking verweven. De symmetrie die daarbij een rol speelt is U(1) (de groep van de fasedraaiingen) en SU(2) (*bijna* vergelijkbaar met de groep van draaiingen in de ruimte). De W- en Z-deeltjes hebben spin 1 (evenals het foton en het gluon) en een zware massa. Ze worden daarom ook wel de zware vectordeeltjes genoemd (zie tabel I).

Krachtvoerende deeltjes

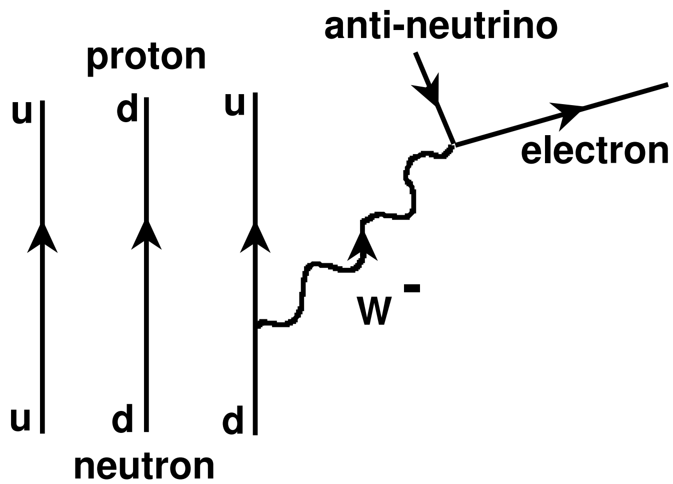
	naam	lading	spin	massa	voert.....
γ	foton	0	1	0	electromagnetisme
A	gluon	0	1	0	sterke kracht
$W^{\pm}$	W-deeltje	$\pm$e	1	80 GeV	zwakke kracht
Z	Z-deeltje	0	1	91 GeV	zwakke kracht
g	graviton	0	2	0	zwaartekracht

Krachtvoelende deeltjes

	naam	lading	spin	massa	voelt.....
d	down quark	-e/3	1/2	10 MeV	γ,W,Z,A,g
u	up quark	2e/3	1/2	5 MeV	γ,W,Z,A,g
e	electron	-e	1/2	511 keV	γ,W,Z,g
ν_e	neutrino	0	1/2	0(<10 eV)	W,Z,g
s	strange quark	-e/3	1/2	250 MeV	γ,W,Z,A,g
c	charm quark	2e/3	1/2	1,5 GeV	γ,W,Z,A,g
μ	muon	-e	1/2	106 MeV	γ,W,Z,g
ν_μ	muon-neutrino	0	1/2	0(<0,5 MeV)	W,Z,g
b	bottom quark	-e/3	1/2	4,8 GeV	γ,W,Z,A,g
t	top quark	2e/3	1/2	174 GeV	γ,W,Z,A,g
τ	tau	-e	1/2	1,8 GeV	γ,W,Z,g
ν_τ	tau-neutrino	0	1/2	0(<164 MeV)	W,Z,g

Tabel I

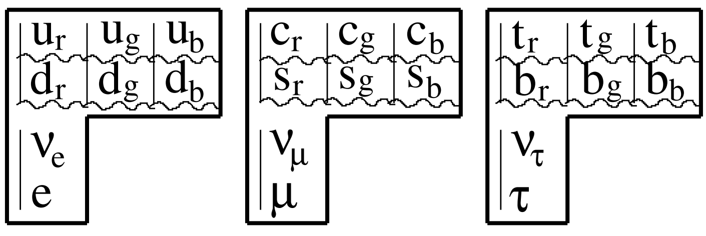
Essentieel voor de zwakke wisselwerking is dat het de pariteit niet behoudt. Pariteit hangt samen met de spiegelinvariantie. De spin van een quark kent twee toestanden, namelijk wijzend in of tegen de bewegingsrichting van het quark. Men spreekt ook wel van een links- of rechtshandig gepolariseerd quark. Het blijkt nu dat de zware vectordeeltjes alleen aan de linkshandig gepolariseerde component van het quark koppelt, en niet aan de rechtshandige component. Omdat onder een pariteits transformatie de linkshandige polarisatie over gaat in de rechtshandige polarisatie, schendt de zwakke wisselwerking dus de pariteit. De zware vectordeeltjes koppelen precies zo aan de leptonen, dus aan het electron en het neutrino. In figuur 2 is aangegeven hoe het verval van een neutron via de zwakke wisselwerking plaatsvindt. Een neutron gaat hierbij over in een proton, electron en een anti-neutrino. De zwakte van de wisselwerking (in belangrijke mate veroorzaakt door de zwaarte van het W-deeltje) manifesteert zich door de lange levensduur van het neutron (ongeveer 15 minuten). In eerste instantie zou men kunnen denken dat het neutron ook via de sterke wisselwerking kan vervallen in een proton en een meson (het π^-, bestaande uit een up quark en een down anti-quark), ware het niet dat de massa van een pion (0,1396 GeV) en een proton (0,9383 GeV) tesamen meer is dan de massa van een neutron (0,9396 GeV), zodat energiebehoud dit verval verbiedt (de levensduur bij zo'n verval zou heel veel korter zijn geweest). Wel kan men de pionen effectief zien als de krachtvoerende deeltjes van de kernkracht. Zij waren als zodanig, lang voordat het bestaan van quarks werd gepostuleerd, al door Yukawa beschreven. Hopelijk is hiermee duidelijk waarom eerder werd gezegd dat de kernkracht een (relatief) zwak restant van de sterke kracht vormt. Merk op dat de neutronen in een *stabiele* kern niet in protonen kunnen vervallen, zowel via de zwakke wisselwerking (het zogenaamde beta-verval) als de sterke wisselwerking, alleen maar omdat energiebehoud dit verbiedt. Zo is dus bijvoorbeeld de massa van het electron (0,5 MeV=5x10^{-4} GeV), op een uiterst subtiele wijze, mede verantwoordelijk voor de wereld zo als wij die waarnemen.



Figuur 2: Het verval van een neutron in een proton, electron en anti-neutrino via het W-deeltje.

Het neutrino heeft geen kleur en geen electrische lading, en kan alleen via de zwakke wisselwerking met de materie interactie hebben (en is daarmee uniek in zijn soort). Daardoor is het heel moeilijk te detecteren. Het werd dan ook ontdekt omdat in bepaalde vervalsprocessen de energie niet behouden leek. Het ziet er naar uit dat het neutrino geen massa heeft. In dat geval hoeft er geen rechtshandige component van het neutrino te bestaan. Uit de experimenten weet men dat de massa zeker niet groter dan 10 eV kan zijn. Een massief neutrino kan in de cosmologie een belangrijke rol spelen, vooral ook in het kader van de donkere materie. Uit allerlei waarnemingen (zoals de rotatie van een melkwegstelsel op grote afstanden van haar centrum) blijkt het heelal voor een belangrijk deel gevuld te zijn met materie die niet zichtbaar is, maar zich door de zwaartekracht wel laat voelen. Er zijn hiervoor, naast het neutrino, vele nieuwe en vaak exotische mogelijkheden onderzocht, waarbij de belangrijkste factor is dat de deeltjes vrijwel alleen via de zwaartekracht aan de andere materie koppelen. De verzamelnaam die men voor dat soort deeltjes heeft wil ik U niet onthouden, ze heten WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles).

Drie families
Het up quark, down quark, electron en neutrino vormen een *familie*, die M. Veltman rangschikte in de vorm van een vlag [2], waaruit men de interacties met de krachtvoerende deeltjes kan aflezen (zie figuur 3). Daarnaast zijn er nu twee andere families bekend. De tweede familie bestaat uit het charm quark, strange quark, *muon* en het *muon-neutrino*. De derde familie bestaat uit het top quark, bottom quark, *tau* en het *tau-neutrino*. Van vlag tot vlag is de massa steeds groter en waarom de deeltjes zich zo laten rangschikken is eigenlijk in z'n geheel onbekend, met de uitzondering van één feit, dat verklaart waarom het top quark absoluut noodzakelijk was. Dit was dezelfde reden waarom het charm quark voorspeld werd nog voordat het werd waargenomen in 1974 (in de vorm van het J/Ψ of ook wel "gypsy" deeltje). Pas in 1977 werd het bottom quark waargenomen, daar had men toen niet op gerekend, omdat de twee eerste families compleet waren. Maar vanaf 1977 was het duidelijk dat het top quark moest bestaan.



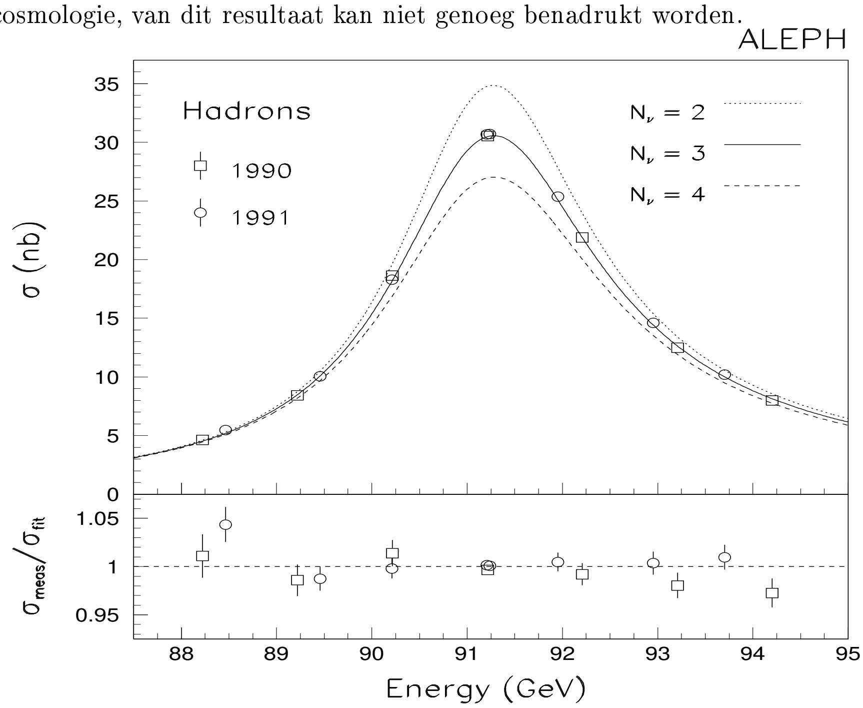
Figuur 3: Rangschikking van de deeltje binnen een familie in een vlag. De indices aan de quarks geven de kleuren rood, groen en blauw aan. De golvende horizontale lijntjes geven de gluon interactie weer, de horizontale lijntjes die van het foton, W-deeltje of Z-deeltje.

Er bestaan processen waarbij een fermion rondloopt tussen drie interacties met vectordeeltjes. Dit zou aanleiding geven tot de koppeling van de vectordeeltjes aan een onfysisch deeltje, waardoor de waarschijnlijkheid, of zelfs de lading, bij interacties niet langer behouden zou zijn. Dit staat bekend als de anomalie [3]. Ieder quark of lepton draagt eraan bij, maar het miraculeuze is dat de som van deze bijdragen binnen een familie (dus bijv. de bijdragen van het electron, neutrino, up quark en down quark) precies tegen elkaar wegvallen. Zonder top quark, maar met bottom quark, tau en het bijbehorend neutrino zou het dus mis gaan. Dit is waarom we ervan overtuigd waren dat het top quark gevonden zou worden.

Het tau-neutrino is, net als het electron- en muon-neutrino moeilijk waar te nemen. Door het feit de ze alléén via de zware vectordeeltjes aan het bijbehorende electron, muon of tau koppelen, kan men uit de waarneming van dat electron, muon of tau de aanwezigheid van het betreffende neutrino concluderen. Om haar energie te meten moet men echter de energie van alle deeltjes na de botsing meten. Het verschil met de energie voor de botsing geeft dan de neutrino energie. Ook kan men aldus (uit behoud van impuls) de richting van het wegvliegende neutrino bepalen. Dit is waarom de moderne deeltjes detectoren hede ten dagen zo gigantisch complex zijn. Om het neutrino waar te nemen moet men alle andere deeltjes nauwkeurig kunnen opmeten. Dat is niet zo makkelijk. In ieder geval bestaat altijd de kans dat een of meerder deeltjes ontsnappen in de richting van de bundellijn, of waar twee detectorcellen aan elkaar aansluiten ("cracks" in de detector).

Toch heeft men onlangs op het Cern te Genève onomstotelijk kunnen vaststellen dat er precies drie verschillende neutrinos (lichter dan 45 GeV) zijn. Dit was een van de belangrijkste triomfen van de LEP (Large Electron-Positron) versneller. Hier worden electron en positron in tegengestelde richting versneld tot ca. 45 GeV in een ring van 27 km omtrek. Deze energie is beduidend minder dan wat men in het Tevatron haalt, terwijl de ring toch veel groter is. Dit geeft de beperkende factor van de cirkelvormige versnellers aan. Een geladen deeltje straalt bij afbuiging (in een magneetveld). Deze zogenaamde remstraling is groter naarmate de massa kleiner is. Dit is waarom het makkelijker is de protonen, die ongeveer tweeduizend maal zwaarder dan de electronen zijn, te versnellen. Het belangrijke voordeel van de electron-positron versnellers is dat vooralsnog de leptonen geen interne structuur hebben en alle energie bij de annihilatie van een electron en positron beschikbaar is voor de vorming van nieuwe deeltjes. Zo heeft men de LEP versneller vooral gebruikt om het Z-deeltje in grote hoeveelheden te produceren, vandaar dat de bundelenergie op de helft van de Z-massa wordt gekozen. Om met electron-positron versnellers veel hogere energieën te bereiken (LEP zal uiteindelijk zijn energie bijna verdubbelen, zodat paren van tegengesteld geladen W-deeltjes gevormd kunnen worden) denkt men voor de toekomst aan lange lineare versnellers.

Omdat het Z-deeltje niet stabiel is, is de massa van het Z-deeltje niet scherp bepaald. Men spreekt wel van een resonantie, waarvan het centrum de massa bepaalt en de breedte aangeeft hoe instabiel het deeltje is. Hoe meer soorten deeltjes er zijn waarin het Z-deeltje kan vervallen, hoe groter deze breedte is. Alleen de deeltjes met een massa kleiner dan de helft van de Z-massa kunnen hieraan bijdragen. Het is niet onredelijk aan te nemen dat we alle geladen deeltjes met een massa kleiner dan 45 GeV (die koppelen aan het Z-deeltje) hebben waargenomen. Als er meer dan drie families zouden zijn, dan zouden de geladen deeltjes van die families allemaal veel zwaarder zijn, maar de bijbehorende neutrale neutrinos hoogst waarschijnlijk niet. In de berekening van de vervalsbreedte van het Z-deeltje is daarom alleen het aantal lichte neutrinos een onbepaalde factor. Uit de experimenten is ondubbelzinnig vast komen te staan dat er precies drie verschillende soorten neutrinos met een massa beneden de 45 GeV bestaan, zie figuur 4. Het belang, ook voor de cosmologie, van dit resultaat kan niet genoeg benadrukt worden.



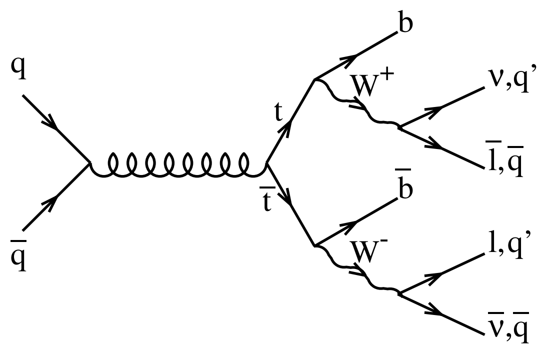
Figuur 4: De waarschijnlijkheid dat annihilatie van een electron en een positron bij LEP aanleiding geeft tot een Z-deeltje, dat vervolgens in hadronen vervalt, als functie van de totale energie. Voor een verschillend aantal (N_ν) lichte neutrinos wordt de theorie, vergeleken met de data.

Daarnaast hebben de experimenten geleid tot een heel nauwkeurige test van wat men het Standaard Model is gaan noemen, dwz. de theorie voor de electro-zwakke en de sterke wisselwerking. Het model werd eerst in 1967 door Glashow en Weinberg en later door Salam als een van de vele mogelijke theorieën voor de zwakke wisselwerking geformuleerd, maar het was vooral

88 89 90 91 92 93 94 95

dankzij het werk van onze landgenoten Martinus Veltman en Gerard 't Hooft begin jaren zeventig, dat deze theorie serieus werd genomen. Vóór die tijd wist men eigenlijk niet hoe men er mee moest rekenen (er waren oneindigheden die de theorie in eerste instantie vrij zinloos leken te maken). Het recente boek van 't Hooft geeft van die ontwikkelingen een mooi overzicht [3].

Het top quark
Naast de vervalsbreedte van het Z-deeltje heeft men op Cern heel nauwkeurig vele andere grootheden kunnen meten. Omdat het top quark nogal zwaar is (in ieder geval zwaarder dan het Z-deeltje) kon men de massa niet rechtstreeks bepalen. In de quantumtheorie laat Heisenbergs onzekerheids relatie ons toe voor korte tijd energie te lenen (hoe meer energie we lenen, des te sneller moeten we het weer inleveren). We spreken dan wel van virutele deeltjes. Het effect van zo'n virtueel top quark op de gemeten grootheden is daardoor nogal gering, zodat erg preciese metingen (en berekeningen) nodig zijn. Toch heeft men hierdoor kunnen voorspellen dat het top quark een massa tussen de 130 en 200 GeV zou moeten hebben. De onnauwkeurigheid komt niet alleen door de mate van ongevoeligheid van de metingen voor de top quark massa, maar ook doordat de massa van het zogenaamde Higgs deeltje onbekend is. Het Higgs deeltje zal later ter sprake komen. Gelukkig is de gevoeligheid voor deze Higgs massa nog geringer dan voor de top quark massa.



Figuur 5: De productie van het top quark-anti-quark paar via quark-anti-quark annihilatie bij het Tevatron, en het verval via de W-deeltjes.

In figuur 5 hebben we de processen weergegeven, waarmee in het Tevatron naar het top quark wordt gezocht. Het beschrijft (links) de annihilatie van een quark uit het proton met een anti-quark uit het anti-proton, en vervolgens de creatie van een top quark en anti-quark. Zoals ik al eerder vermelde, weten we helaas niet precies welke enegie het annihilerende quark-anti-quark paar heeft - dit is het grote nadeel van de $p\bar{p}$ versnellers. Geen van de electron-positron versnellers als LEP, of de lineare versneller van SLAC in Californië, zal een voldoende hoge energie kunnen bereiken om het top quark via electron-positron annihilatie te maken. Om de massa van het top quark bij het Tevatron te bepalen moet men zorgvuldig de vervalsproducten bestuderen en hun energieën meten. Het top quark zal via de zwakke wisselwerking uiteenvallen in een W-deeltje en een bottom quark. Het W-deeltje is, net als het Z-deeltje, erg instabiel en zal snel uiteenvallen. Hiervoor zijn er twee mogelijkheden. Òf het W-deeltje vervalt in een electron, muon of tau (l) en een bijbehorend neutrino (ν), òf in een quark (q') en anti-quark ($\bar{q}$) (van verschillende smaken, maar dezelfde familie). Ieder van de quarks, als ze voldoende grote energie hebben, zullen aanleiding tot jets geven. Het aantal jets kan daarbij dus makkelijk tot zes oplopen.

Helaas verraden de vervalsproducten niet eenduidig of er een top quark werd geproduceerd. Er zijn in het standaard model vele processen die vergelijkbare vervalsproducten hebben. Dit heten achtergrondprocessen en het is zaak naar die processen te zoeken waar het aantal achtergrondprocessen (liefst) kleiner is dan het aantal processen dat via de productie van een top quark-anti-quark verlopen. Men kan de achtergrondprocessen aanzienlijk reduceren door er zeker van te zijn dat er bottom quarks bij het proces betrokken zijn. Omdat een bottom quark relatief lang leeft, en op een specifieke manier vervalt, heeft de zogenaamde CDF detector die bij het Tevatron wordt gebruikt de mogelijkheid op twee manieren na te gaan of er een bottom quark bij het verval betrokken was. De eerste is door te laten zien dat de deeltjes niet uit één, maar uit meerdere interactiepunten lijken te komen. De tweede is door naar de voor het bottom quark specifieke vervalsproducten (via de zwakke wisselwerking) te kijken. Een tweede detector, D0 (D-zero) genoemd, heeft die mogelijkheid niet.

De deeltjesfysici die aan de CDF detector werken maakten op 26 april 1994 bekend, aanwijzingen voor het bestaan van het top quark te hebben gevonden. Zij formuleerden het heel voorzicht, te meer omdat de andere detector de resultaten nog niet kan bevestigen. Ze vonden dat er twee processen waren waarin beide W-deeltjes via leptonen vervallen, door te zoeken naar hoog energetische electronen en muonen. Volgens de theorie zou ongeveer een kwart hiervan van achtergrondprocessen kunnen komen. Door naar meerdere interactiepunten te zoeken vonden ze zes gevallen die overeenkomen met één W-deeltjes dat vervalt via een electron of muon en het andere W-deeltje via quarks, zodat er vier jets werden waargenomen. Hier verwacht men dat ongeveer eenderde van de gevallen door een achtergrondproces kan worden veroorzaakt. Tenslotte waren er zeven gevallen die ook uit een electron of muon plus vier jets bestonden, maar waar de aanwezigheid van het bottom quark door zijn specifieke verval werd geïdentificeerd. Iets minder dan de helft hiervan zou men als achtergrondproces verwachten. Echt overtuigend is het dus niet en het wachten is op de analyse van meer data. De CDF mensen beweren dat de kans, dat alle gevallen die ze waarnemen door achtergrondprocessen worden veroorzaakt, kleiner dan 1% is.

Vooral het correct schatten van het aantal te verwachten achtergrondprocessen is geen sinecure. De schattingen voor minder dan 4 jets kloppen vrij goed met de theorie. Voor 4 jets zit er misschien een addertje onder het gras. Men kan dit testen door i.p.v. naar 4 jets en één W-deeltje te zoeken, naar 4 jets en één Z-deeltje te zoeken. Dit kan *niet* via de productie van een top quark-anti-quark paar verlopen en is dus een goede test voor het aantal achtergrondprocessen. De CDF groep vindt er twee, wat beduidend meer is dan de theorie voorspelt. Maar U kunt dit vergelijken met het volgende. Als we kruis of munt gooien met een geldstuk, dan weten we dat de kans op kruis 50% is. Als we twee keer het muntstuk opgooien en beide keren munt vinden, betekent dit nog niet dat we een tegenspraak hebben gevonden. Als we echter aannemen dat het aantal voorspelde achtergrondprocessen correct is, dan is het aantal keer dat de top wordt geproduceerd bijna twee keer groter dan wat de theorie voorspelt. Aan zowel de theoretische berekening voor de achtergrondprocessen, als van de productiewaarschijnlijkheid voor het top quark-anti-quark paar, is door mijn Leidse collegas Frits Berends en Willy van Neerven met hun medewerkers in belangrijke mate bijgedragen.

Het wachten is dus op meer data. In de samenvatting van het CDF artikel schrijven de bijna vierhonderd auteurs dan ook: “The statistics are too limited to firmly establish the existence of the top quark, however a natural interpretation of the excess (over the background) is that it is due to $t\bar{t}$ production. We present several cross checks. Some support this hypothesis, others do not.” Aangenomen dat de hypothese correct is geven ze voor het top quark een massa van 174 GeV (met een fout naar beide kanten van ongeveer 20 GeV). Ongetwijfeld zullen we over ongeveer een jaar weten of dit resultaat overeind zal blijven, òf dat hetzelfde gebeurt als in 1984, toen Rubbia en zijn groep beweerden het top quark met een massa van ongeveer 40 GeV te hebben waargenomen. Het kruis en munt spelletje deed hun toen wel de das om, maar Rubbia had met de waarneming van het W- en Z-deeltje zijn buit al binnen.

Het Higgs deeltje

Het Higgs deeltje vormt een van de meest essentiele, maar ook minst begrepen, aspecten van het standaard model. Het werd geïtroduceerd om te verklaren waarom de vectordeeltjes van de zwakke wisselwerking niet massaloos waren. Het is een deeltje zonder spin en bovendien krijgen ook alle leptonen en quarks hun massa door de koppeling van hun links- en rechtshandige componenten aan dit Higgs deeltje (dit heet wel de Yukawa koppeling). Als er geen rechtshandig neutrino is blijft derhalve de linkshandige component massaloos. Het is niet zo dat we via het Higgs deeltje massas van alle deeltjes vastleggen in termen van één parameter, aangezien ieder deeltje zijn eigen koppeling heeft aan het Higgs deeltje. Wel zijn alle massas evenredig met dezelfde parameter met de dimensie van een massa. Deze paramter had net zo goed nul kunnen zijn. Haar waarde hangt af van de manier waarop het Higgs deeltje met *zichzelf* gekoppeld is. De mate van zelf-koppeling af kan hangen van de temperatuur. Bij een hoge temperatuur (in de beginfase van het heelal) zouden hierdoor de massas effectief nul zijn geweest. De overgang naar lage temperatuur, waar de deeltjes massief zijn, gaat in de meest gangbare theorieën gepaard met een faseovergang die grote gelijkenis vertoont met die waarbij een supergeleider over gaat naar een gewone geleider (of zelfs een insulator) of waarbij superfluide helium overgaat in normaal helium.

U kunt het ruwweg vergelijken met een (ideaal) potlood, dat als we het met z'n punt op een (ideaal) horizontaal blad zouden zetten in een willekeurige richting kan vallen. Voordat het potlood is gevallen was de configuratie nog symmetries, maar niet stabiel. Het is niet de laagste energietoestand. Het correspondeert met een verdeling van de Higgs deeltjes waarbij de massas van de quarks en vectordeeltjes, via de koppeling aan het Higgs deeltje, nul zijn. Als het potlood de laagste energietoestand op zoekt, door naar een bepaalde kant te vallen (het breekt de symmetrie spontaan), dan is de verdeling zodanig dat de quark en vectordeeltjes wel een massa hebben. U kunt zich voorstellen dat zo'n faseovergang belangrijke consequenties heeft voor ons heelal (zie bijvoorbeeld ref. [4]). Bovendien is de waarde van de energie in de laagste energietoestand equivalent met de cosmologische constante (deze bepaalt op wat voor een manier het heelal uitdeit, i.h.b. of het op een gegeven moment weer zal inkrimpen). Alle astronomische waarnemigen wijzen erop dat de cosmologische constante heel klein is. Zonder de koppeling aan gravitatie kunnen we echter alleen *energieverschillen* meten, en er is binnen het standaard model geen enkele reden om aan te nemen dat de energie van de laagste energietoestand precies nul is. Erger nog, door quantum effecten (de virtuele deeltjes), zijn er correcties op die energie en moeten we de parameters wel ontzettend nauwkeurig op elkaar afstemmen om de uiteindelijke waarde op nul uit te laten komen. Het zou wel eens kunnen zijn dat alleen de quantumtheorie van gravitatie hierop een antwoord kan geven.

Het inzicht van de laatste jaren heeft laten zien, dat vooral met betrekking tot dit Higgs deeltje, het standaard model niet geldig blijft tot willekeurig hoge energie. Er is een magische grens aan wat men hoge ernergie noemt. Bij 10^{19} GeV, de zogenaamde Planck energie (die U kunt vergelijken met het massa van eem amoebe, dat alles samengeperst in een ruimte met een diameter van ongeveer 10^{-35} m), begint de quatumtheorie van gravitatie een rol te spelen, en vermoedt men dat er drastisch nieuwe inzichten nodig zijn. Als de massa van het Higgs deeltje relatief klein is (niet veel groter dan 100 GeV) dan kan het standaard model zonder al te veel problemen zijn geldigheid tot op die Planck energie behouden. Echter, mocht de massa beduidend groter zijn, dan zal het standaard model bij steeds lagere energie gebreken gaan vertonen. Als de massa in de orde van ongeveer 10 TeV zou zijn dan is al boven die energie het standaard model niet langer geldig volgens de huidige inzichten. Dit betekent ook dat de massa van het Higgs deeltje, als het bestaat, niet groter dan 10 TeV kan zijn.

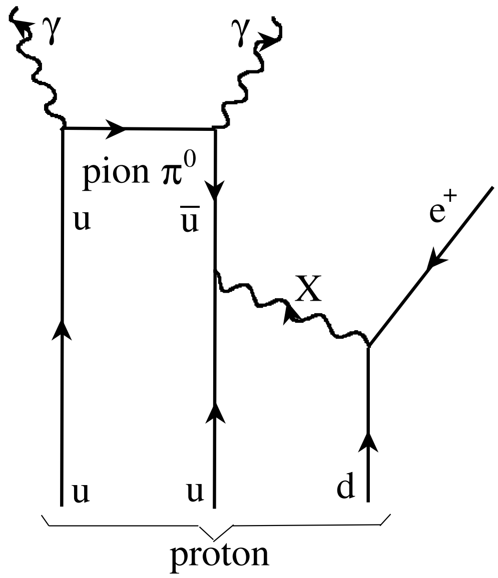
Het was de belangrijkste reden waarom men in Amerika de Superconducting Super Collider (SSC) wilde bouwen opdat daarmee in principe, ofwel het

Higgs zou kunnen worden gevonden, ofwel zou kunnen worden aangetoond dat het Standaard Model niet langer geldig was. In dat laatste geval was er goede hoop dat de SSC dan zou kunnen vinden wat er voor het Higgs deeltje in de plaats zou moeten komen. Helaas heeft het Amerikaanse congres besloten de bouw van de SSC definitief te stoppen. Dit is jammer omdat het toch wel van belang is te toetsen of het mechanisme waarmee de vectordeeltjes van de zwakke wisselwerking hun massa krijgen inderdaad vergelijkbaar is met een supergeleider. Het zou ook tot een beter begrip kunnen leiden van de subtiele manier waarop de koppeling van het Higgs deeltje aan de quarks (die aanleiding geeft tot de quark massas, maar waarbij quarks uit verschillende families op een slinkse manier zich met elkaar kunnen vermengen), aanleiding geeft tot de zogenaamde CP-violatie (dit is equivalent met te zeggen dat de natuur niet invariant is onder tijdsomkeer). Deze symmetrie breking is uitermate moeilijk meetbaar, bovendien vereist het minstens drie families! Van belang is daarom ook de CP-violatie bij de derde familie te bestuderen. Dit is waarom men in de toekomst plannen heeft zogenaamde bottom fabrieken te maken, dit zijn versnellers waarbij in grote hoeveelheden bottom quarks zullen worden geproduceerd. Het voordeel is dat de energie daarvoor niet gigantisch hoog hoeft te zijn.

Wat betreft de zoektocht naar het Higgs deeltje zal men in de toekomst aangewezen zijn op de Large Hadron Collider (LHC) die in het begin van het volgende millenium gebouwd zal worden in de al bestaande LEP tunnel. Helaas zal deze versneller niet zo krachtig worden als gepland was voor de SSC, en we moeten daarom hopen dat het Higgs deeltje niet te zwaar is. Toch, zoals ik eerder heb proberen te schetsen, betekent dit niet dat we dan voor het eerst een fundamenteel deeltje zonder spin hebben waargenomen. Bij voldoende hoge energieën moet ook het Higgs deeltje een interne structuur prijsgeven. Persoonlijk heb ik liever dat het dat doet bij de laagst mogelijke energie van ca. 10 TeV, dan bij een energie van 10^{19} GeV.

Proton verval
In het standaard model kan een quark niet overgaan in een lepton, dit kan men formuleren als het behoud van baryon getal (een quark krijgt een baryon getal eenderde en de leptonen een baryon getal nul). Bij het ontstaan van het heelal gaat men er van uit dat er evenveel baryonen als anti-baryonen waren. De vraag is dus waarom we niet net zoveel anti-materie als materie zien. Een mogelijke oplossing voor die vraag is dat het baryon getal niet echt behouden is. Inderdaad zijn er in het standaard model processen mogelijk (die de CP-invariantie schenden) waarin het baryon getal niet behouden is, zoals door 't Hooft in 1976 werd ontdekt [3, hoofdstuk 17]. Deze schending is uitermate klein, maar in de begin fase van het heelal, bij heel hoge temperaturen, zal deze schending van baryon getal veel vaker voor kunnen komen. Hierdoor kan er uiteindelijk meer materie dan anti-materie ontstaan, uitgaande van een situatie zonder een asymmetrie.

Als het baryon getal behouden is, dan volgt uit het energiebehoud dat een proton niet kan vervallen. De hierboven geschetste breking van baryon getal verloopt in het huidige heelal heel langzaam (de levensuur van het proton is langer dan 10^{100} jaar). Echter, de pogingen om alle krachten onder een noemer te brengen - iets waaraan Einstein in zijn latere jaren hard heeft gewerkt - stopten niet met de electro-zwakke theorie. Vaak spreekt men van electro-zwakke unificatie, maar dit is niet helemaal terecht. Weliswaar is het electromagnetisme op een nogal intrigrerende wijze verweven met de zwakke kracht, maar er zijn nog steeds twee onafhankelijke parameters die de sterkte van beide interacties bepalen. Bovendien stond de sterke kracht in zijn geheel los van de electro-zwakke kracht.



Figuur 6: Het verval van het proton in een neutraal pion (dat in twee fotonen vervalt) en een positron, via het X-deeltje.

Ook wiskundig was er geen eenheid. Het standaard model heeft een symmetrie die beschreven wordt door de groep U(1)xSU(2)xSU(3), bestaande uit drie min of meer los van elkaar staande factoren. De kleinste groep waarbij al deze sectoren wel met elkaar mengen, en waardoor dus de sterkte van ieder van de drie interacties bepaald wordt door één parameter, is SU(5). De mate waarin de verstrengeling zich manifisteert hangt van de energie af en blijkt pas compleet te zijn bij een energie van ongeveer 10^{17} GeV. Er zijn dan ook in die theorie [5] twaalf vectordeeltjes met een massa van ongeveer 10^{16} GeV, de zogenaamde X-deeltjes. Zij hebben een kleur en electrische lading en kunnen een quark koppelen aan een lepton. Quarks kunnen derhalve overgaan in leptonen onder het uitzenden van zo'n X-deeltje. Hierdoor is in principe het proton instabiel geworden. Natuurlijk kan het niet rechtstreeks in X-deeltjes vervallen vanwege energiebehoud. Echter het X-deeltje koppelt ook een up quark aan een up anti-quark (onder verandering van kleur) en hierdoor kan het proton uiteenvallen in een pion en een positron. Het pion zal hoofdzakelijk vervallen in twee fotonen, terwijl het positron zal annihileren met een electron in de detector, ook onder het uitzenden van twee fotonen, zie figuur 6.

De levensduur die de theorie voorspelt is ongeveer 10^{30} jaar [5]. Weliswaar is dit veel langer dan de leeftijd van het heelal, maar als we meer dan 10^{30} protonen in de gaten kunnen houden, dan zouden we ieder jaar een paar ervan uiteen moeten zien vallen. En dit bleek wonderwel technisch uitvoerbaar. U kunt zelf eenvoudig nagaan dat een "bak" met water van 10 bij 10 bij 10 meter het gewenste aantal deeltjes heeft. Wel moeten deze detectoren diep onder de grond worden gezet om de kosmische straling tegen te houden die het signaal van een uiteengevallen proton volledig zou overstemmen. Helaas heeft men met deze detectoren de eenvoudigste versies van deze geünificeerde theorieën kunnen uitsluiten. Het proton bleek langer te leven dan op basis van die theorieën werd voorspeld. Protonverval is nog nooit waargenomen.

Totaal onverwacht was echter dat deze detectoren op 23 februari 1987 hoog energetische anti-neutrinos waarnamen. Dat de proton detectors ook geschikt waren om anti-neutrinos waar te nemen had men zich wel gerealiseerd. Neutrinos vliegen namelijk overal doorheen. Men raakt ze niet kwijt door de detector op grote diepte (of onder een hoge berg) te plaatsen. Nu kan een anti-neutrino bij botsing met een proton, een neutron en een positron geven. Het positron geeft dan na annihilatie met een electron in de detector twee fotonen. Het bleek dat deze anti-neutrinos afkomstig waren van de supernova 1987a. Dit was een prachtige bevestiging van de theorie voor de supernova explosie, waarbij nog voordat de supernova visueel zichtbaar wordt, door het ineenstorten van de kern van de ster (de vorming van een neutronen ster), een grote hoeveelheid neutrinos en anti-neutrinos vrijkomt. De gemeten flux en het tijdsverschil met het visueel waarneembaar worden van de supernova klopte vrij goed met de berekeningen! Hoe onverwacht dit resultaat was blijkt wel uit het feit dat slechts één van de vier detectoren de tijd waarop een signaal werd waargenomen tot op de minuut nauwkeurig had vastgelegd. Dit heeft wel aanleiding gegeven tot nogal wat verwarring (getuige een artikel met als titel "May a supernova bang twice?"). Het zou mooier geweest zijn als men ondubbelzinnig had kunnen laten zien dat de vier detectoren de anti-neutrinos op precies hetzelfde tijdstip hadden waargenomen.

Ik hoop U een redelijk (helaas noodzakelijkerwijze enigsinds vluchtig) overzicht van de huidige stand van het deeltjes onderzoek gegeven te hebben. Het is een gelukkige omstandigheid dat ik in ieder geval bij het opschrijven van deze voordracht de vermeende ontdekking van het top quark heb kunnen vermelden. Nu de ingredienten van het standaard model bijna compleet zijn, beginnen de vele vragen om het waarom steeds nijpender te worden. Nieuwe intelectuele uitdagingen staan ons ongetwijfeld te wachten [6].

Literatuur

1. M. Riordan, *The hunting of the quark: a true story of modern physics*, Simon and Schuster, New York, 1987.

2. M. Veltman, *De organisatie van elementaire deeltjes*, Natuur en Techniek, 48 (1980) 774.

3. G. 't Hooft, *De bouwstenen van de schepping, een zoektocht naar het allerkleinste*, Prometheus, Amsterdam, 1992; G. 't Hooft, *Gauge theories of the forces between elementary particles*, Scientific American, June 1980, p. 90.

4. A.H. Guth and P.J. Steinhardt, *The inflationary universe*, Scientific American, May 1984, p. 116; V. Icke, *De kleinste deeltjes en de grootste knal*, Natuukundige Voordrachten N.R. 66 (1988) 81.

5. H. Georgi, *A unified theory of elementary particles and forces*, Scientific American, April 1981, p. 40.

6. Via World Wide Web is verder veel informatie te vinden op de sites: http://www-pdg.lbl.gov/cpep/adventure.html, http://www.fnal.gov, http://www.desy.de en http://www.cern.ch.