Samenvatting

Een A4'tje kan doormidden gescheurd worden om er zo twee A5'jes van te maken. Eén van die A5'jes kan vervolgens weer doormidden gescheurd worden om er zo twee A6'jes van te maken, enz. enz. enz. Het blijkt alleen dat dit niet eeuwig door kan gaan, zelfs als praktische bezwaren overboord worden gezet. Wanneer het A40'je bereikt is, wat een lengte heeft van ongeveer 0,00008 centimeter, kan het papier niet meer worden doorgescheurd. De reden hiervoor is dat het kleinste papierdeeltje, het cellulosemolecuul, gevonden is.

Vrijwel alles om ons heen is opgebouwd uit één of meerdere moleculen. Al deze moleculen zijn op zichzelf weer opgebouwd uit verschillende atomen. Zo bestaat papier enkel uit drie verschillende soorten atomen: het koolstofatoom, het zuurstofatoom en het waterstofatoom. De manier waarop deze atomen met elkaar verbonden zijn en welke moleculen ze vormen, bepaalt uiteindelijk welke stof ze opbouwen.

Ook atomen blijken niet elementair te zijn. Door experimenten aan het begin van de vorige eeuw werd ontdekt dat ieder atoom bestaat uit slechts drie verschillende deeltjes: positief geladen protonen, niet geladen neutronen en daaromheen een wolk van negatief geladen elektronen. Vrijwel iedere vorm van materie die wij kennen, bestaat uit deze bouwstenen en de hoeveelheid bepaalt welk atoom ermee gevormd kan worden. Zo bestaat bijvoorbeeld het zuurstofatoom uit acht protonen, acht neutronen en acht elektronen. Ook protonen en neutronen blijken niet elementair te zijn, maar te bestaan uit verschillende zogeheten quarks en gluonen. Zover bekend bestaan elektronen, quarks en gluonen niet meer uit nog kleinere bouwstenen.

Naast elektronen, quarks en gluonen zijn er nog meer elementaire deeltjes bekend. Zo blijkt bijvoorbeeld dat licht ook uit deeltjes bestaat die fotonen worden genoemd. Een overzicht van alle tot nu toe bekende deeltjes is schematisch te zien in figuur D.1. Het collectief aan bekende deeltjes wordt het standaardmodel van de deeltjesfysica genoemd, maar het standaardmodel is niet zomaar een simpele verzameling deeltjes. Er zit een ferme wiskundige theorie achter, gebaseerd op de fundamenten van de speciale relativiteitstheorie en de kwantummechanica. De theorie achter het standaardmodel voorspelt exact welke deeltjes er kunnen bestaan, welke eigenschappen ze hebben en welke interacties ze met elkaar kunnen aangaan. Bewonderenswaardig genoeg zijn alle deeltjes die zijn voorspeld door de theorie inmiddels gevonden en geen meer dan dat, alle interacties die al zijn onderzocht kloppen met de voorspellingen en de eigenschappen van de deeltjes blijken ook nog eens te matchen met wat het standaardmodel voorspelt. Het hele universum, op de kleinste schaal, lijkt dus te kunnen worden beschreven door het standaardmodel. Om het nog mooier te maken, kunnen met deze theorie vrijwel alle bekende fundamentele concepten uit de natuurkunde, zoals materie, kracht en energie, worden beschreven met slechts een handvol aan deeltjes.



Standard Model of Elementary Particles

Figuur D.1: Deeltjes in het standaardmodel van de deeltjesfysica.

Helaas, of misschien wel gelukkig, zijn er nog steeds zaken die het standaardmodel niet verklaard. Zoals te zien in figuur D.1, hebben een groot aantal deeltjes een partnerdeeltje met exact dezelfde eigenschappen, maar met omgekeerde ladingen. Deze deeltjes worden anti-deeltjes genoemd. De verwachting is dat er evenveel deeltjes als anti-deeltjes aanwezig moeten zijn in het heelal, maar er lijken vrijwel geen anti-deeltjes aanwezig te zijn. Waar zijn de anti-deeltjes gebleven?

Een mogelijk oplossing voor dit probleem ligt in de symmetrieën die deeltjes hebben. Een voorbeeld van een symmetrie zijn de linkerhand en de rechterhand. De linkerhand is niet hetzelfde als de rechterhand, ze zijn elkaars spiegelbeelden, maar de natuurkunde van beide handen is wel hetzelfde. Het kost evenveel moeite om zowel de linker- als de rechterhand bijvoorbeeld te bewegen. De wetten van de natuur blijven onveranderd onder een symmetrie. Ook deeltjes dragen dit soort symmetrieën. Voor ieder deeltje en bijbehorend anti-deeltje zijn de wetten van de natuur hetzelfde. Ze worden C-symmetrisch genoemd. Ook, of de deeltjes linksom of rechtsom draaien¹, maakt voor de natuur niks uit. Deze deeltjes worden P-symmetrisch genoemd. In beide gevallen zijn de deeltjes elkaars gespiegelden.

Niet alle deeltjes blijken zich te houden aan deze symmetrieën. Zo zijn er van de neutrino's geen rechtsom draaiende versies bekend. Deze deeltjes hebben geen gespiegelde versie en hun P-symmetrie is gebroken. Van de anti-neutrino's zijn er geen linksom draaiende versies bekend, ook deze deeltjes hebben geen gespiegelde versie en ook hun P-symmetrie is gebroken. Ook de C-symmetrie is gebroken voor deze deeltjes, omdat de anti-deeltjes niet meer het gespiegelde zijn van de deeltjes. De draairichting is immers anders. Wat wel zo is, is dat ze CP-symmetrisch zijn. Wanneer zowel het deeltje als de draairichting

¹In werkelijkheid is deze symmetrie ingewikkelder dan hier wordt geschetst.

worden gespiegeld, blijven de natuurwetten onveranderd. Deze CP-symmetrie is een fundamentele eigenschap, die voorspeld wordt door het standaardmodel voor alle elementaire deeltjes.

Toch blijken er in het heelal samengestelde deeltjes te bestaan die zich niet houden aan de CP-symmetrie. Hierin schuilt een mogelijke oplossing voor de vraag waar alle antideeltjes zijn. Als de CP-symmetrie wordt geschonden, zit er een verschil tussen deeltjes en anti-deeltjes. En als dit verschil wordt meegenomen in berekeningen, blijkt dat het mogelijk is om met behulp van het breken van deze symmetrie anti-deeltjes om te zetten in deeltjes. Het is een langzaam proces, maar met een universum dat al bijna veertien miljard jaar oud is, niet te verwaarlozen. Alleen is het proces wel zo langzaam, dat alle vormen van CP-schending die tot nu toe bekend zijn niet genoeg tijd hebben gehad om dit proces te voltooien. Er moeten dus meer deeltjes zijn die de CP-symmetrie schenden.

In 2013 werd het Higgsdeeltje ontdekt, het laatste bouwsteentje van het standaardmodel dat nog steeds gevonden moest worden. Hoewel het standaardmodel voorspelt dat dit deeltje zich moet houden aan de CP-symmetrie, is dat nog niet bevestigd. Het doel van het onderzoek, gepresenteerd in dit proefschrift, is om juist deze eigenschap boven water te krijgen. Hiervoor is data gebruikt van de ATLAS detector. De ATLAS detector is onderdeel van CERN's versnellerscomplex, welke schematisch is weergegeven in figuur D.2. Het versnellercomplex bestaat uit een groot aantal deeltjesversnellers, waarvan de grootste een omtrek heeft van 26,7 kilometer. Deze deeltjesversnellers zijn in gebruik om protonen zo veel mogelijk te versnellen en ze vervolgens met praktisch de snelheid van het licht op elkaar te laten botsen.



Figuur D.2: CERN's versnellerscomplex. Kopie van figuur 3.1.

© CERN 201

186 Samenvatting

Om het botsingspunt is een enorme detector, de ATLAS detector, welke schematisch is weergegeven in figuur D.3, gebouwd. De ATLAS detector heeft als taak om de brokstukken van deze botsingen waar te nemen. Deze brokstukken zijn alleen niet hetzelfde als de brokstukken van bijvoorbeeld een auto-ongeluk. Als twee auto's op elkaar botsen gaan ze kapot, maar als twee deeltjes op elkaar botsen kunnen er nieuwe deeltjes onstaan. Het is alsof er twee rode auto's met de lichtsnelheid op elkaar botsen en er een blauwe auto uit die botsing tevoorschijn komt. Klinkt gek, maar bij deeltjes gebeurt dit constant. Over echte brokstukken kan dan ook niet gesproken worden, maar eerder over andere deeltjes. In dit soort botsingen worden die dan ook veel gemaakt en als er maar vaak genoeg gebotst wordt, in het geval van de ATLAS detector zo'n veertig miljoen keer per seconde, dan zitten er vanzelf een paar tussen die bijvoorbeeld een Higgsdeeltje produceren. Dat Higgsdeeltje wordt met name gemaakt door botsingen tussen twee topdeeltjes, brokstukken van de proton botsingen, die vervolgens een Higgsdeeltje creeëren. Deze koppeling tussen de topdeeltjes en het Higgsdeeltje wordt de top-Yukawa koppeling genoemd.



Figuur D.3: De ATLAS detector. Kopie van figuur 3.3.

Het Higgsdeeltje is niet stabiel en vervalt voordat het gedetecteerd kan worden. Alsof er een gele auto met de lichtsnelheid rijdt en deze plots verandert in twee groene auto's. Om het toch te kunnen meten, moet er met veel precisie naar de vervalsproducten van de botsing gekeken worden. Wat blijkt, als de hoek tussen twee specifieke vervalsproducten wordt gemeten, dan verschilt deze afhankelijk van de CP-eigenschappen van het Higgsdeeltje. Dit is weergegeven in figuur D.4. Hierin zijn drie verschillende CP-scenario's voor het Higgsdeeltje doorgerekend, die allemaal een verschillende hoek tonen. Deze hoeken zijn weergegeven als de drie verschillende lijnen in de figuur. Dit verschil is te meten en op deze manier kunnen de CP-eigenschappen van het Higgsdeeltje ontrafeld worden.



Figuur D.4: De hoek tussen twee vervalsproducten van het Higgsdeeltje verschilt voor verschillende CP-scenario's. Kopie van figuur 7.2.

Deze meting is niet eenvoudig. Alleen de deeltjes waarin het Higgsdeeltje vervalt kunnen worden gemeten, maar er zijn tal van andere botsingen die precies dezelfde deeltjes opleveren. Om te begrijpen welke deeltjes wel en welke deeltjes niet afkomstig zijn van het verval van een Higgsdeeltje, moeten alle mogelijke botsingen worden doorgerekend om zo precies het effect daarvan op de hoek te bepalen. Deze berekeningen kunnen dan met de data vergeleken worden om zo te zien of de standaardmodel voorspelling klopt of niet. De uitkomst van deze berekeningen en de data is weergegeven in figuur D.5. Met het blote oog is het haast onmogelijk om de botsingen met Higgsdeeltjes te zien, welke het rode gebied bestrijken, laat staan een mogelijk verschil te zien zoals weergegeven in figuur D.4. Echter, met geavanceerde computertechnieken is dit niet onmogelijk.



Figuur D.5: De hoek tussen twee vervalsproducten doorgerekend voor iedere mogelijke botsing. Data is weergegeven in zwarte punten en laat een goede overeenkomst met de berekeingen zien. Vervalsproducten van botsingen die een Higgsdeeltje produceren zijn weergegeven in rood. Kopie van figuur 7.20.

Kortom, om te begrijpen waar de anti-deeltjes gebleven zijn, moeten de CP-eigenschappen

ATLAS

van alle deeltjes gemeten worden. Voor het Higgsdeeltje voorspelt het standaardmodel dat deze zich houdt aan de CP-symmetrie. De CP-eigenschappen van het Higgsdeeltje kunnen gemeten worden door de hoek te meten tussen de vervalsproducten van botsingen die een Higgsdeeltje bevatten. Deze hoek levert voor ieder CP-scenario een ander resultaat op. Het resultaat van de meting is weergegeven in figuur D.6 als de zwarte lijn. Hierin is weergegeven hoe het resultaat overeenkomt met verschillende CP-scenario's. Des te lager de lijn, des te beter de overeenkomst is. Het standaardmodel scenario bevindt zich precies in het midden van de figuur bij het getal 0. Zoals te zien is dit niet de waarde waarmee de meting het beste overeenkomt.

Private



Figuur D.6: Vergelijking tussen de verschillende CP-scenario's en het gemeten resultaat. Des te lager de lijn de zwarte lijn, des te beter de overeenkomst. Kopie van figuur 7.27.

Echter, voordat een Nobelprijs kan worden opgehaald, moet er wel gekeken worden naar hoe precies de meting is. Het blijkt dat de kans één op drie is dat de meting onjuist is. Dat is bij lange na niet goed genoeg om een ontdekking te claimen. Hiervoor moet de kans dat de meting onjuist is één op 1.744.279 zijn. Om bij dat getal te komen is veel meer data nodig. Er is dus nog een lange weg te gaan voordat de CP-eigenschappen van het Higgsdeeltje echt ontrafeld kunnen worden.