Smaken in het standaardmodel

Elementaire deeltjes hebben een eigenschap die ‘flavour’ wordt genoemd – smaak, dus. Gastauteur Philine van Vliet legt uit wat flavour precies is, en hoe die eigenschap ons iets kan leren over de kleine hoeveelheid antimaterie in het heelal.

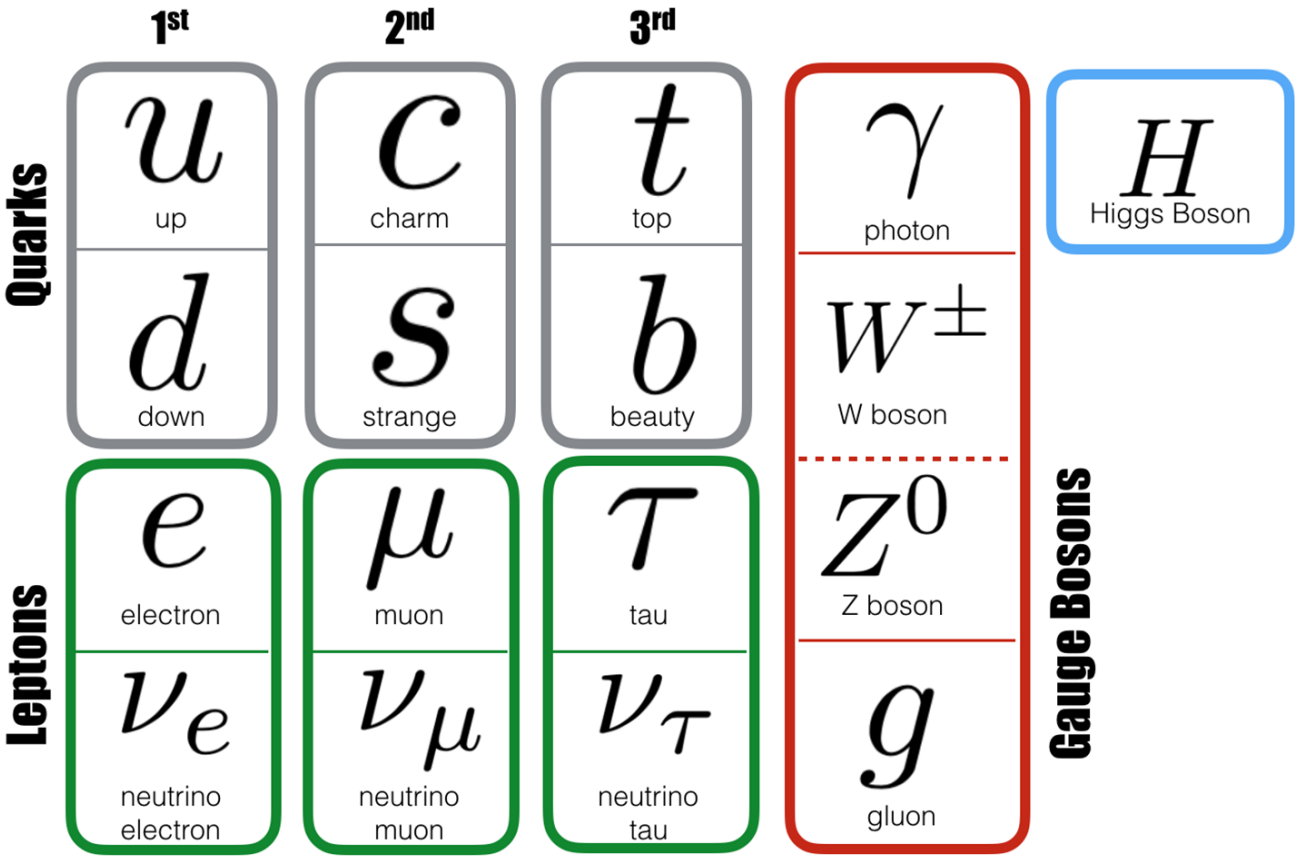
Afbeelding 1. Smaken verschillen.Hoeveel ‘smaken’ elementaire deeltjes zijn er? Foto: GoodFreePhotos.

Open vragen in het standaardmodel

Een van de meest succesvolle en best geteste theorieën in de natuurkunde is het standaardmodel van de deeltjesfysica. Het standaardmodel beschrijft alle elementaire deeltjes en hoe die deeltjes door middel van krachten (met uitzondering van de zwaartekracht) interacties met elkaar hebben. Het voorspelt hoe een deeltje kan vervallen in andere deeltjes, en wat de kans is dat het op de ene manier of op een andere manier vervalt.

Deze voorspellingen worden getest met behulp van deeltjesversnellers zoals de Large Hadron Collider op het CERN. Tegenwoordig zijn er zoveel data verzameld dat er enorme statistische precisie bereikt kan worden in experimenten. Ook in de theoretische voorspellingen van het standaardmodel kan men een dergelijke hoge precisie bereiken. Zelfs bij deze hoge nauwkeurigheden komen de voorspellingen van het standaardmodel nog altijd erg goed overeen met de data

Het standaardmodel kan echter een paar belangrijke vragen niet beantwoorden. We leven in een universum dat, voor zover wij weten, alleen bestaat uit materie, en niet uit antimaterie. Maar waar komt dat verschil tussen materie en antimaterie vandaan? Ook kunnen de fermionen (deeltjes zoals het elektron) in het standaardmodel gegroepeerd worden in drie “families”, die alleen in massa lijken te verschillen. Vanwaar drie? En waarom lijken de verschillende families (op hun massa, en dus hun zwaartekrachtsinteractie na) dezelfde interacties te hebben? Zo zijn er nog meer vragen waar het standaardmodel geen antwoord op heeft. Maar laten we, voordat we naar mogelijke oplossingen gaan kijken, eerst het standaardmodel zelf onder de loep nemen.



Afbeelding 2. Het standaardmodel.De deeltjes uit het standaardmodel. De eerste drie kolommen tonen de drie families van fermionen. Afbeelding: Universiteit van Zurich.

De ingrediënten

De elementaire deeltjes zijn onderverdeeld in *fermionen* en *bosonen*. De bosonen zijn de deeltjes die de elementaire krachten (de sterke en zwakke kernkracht en elektromagnetisme) overbrengen. De fermionen zijn verder onderverdeeld in leptonen (elektronen, muonen, taudeeltjes en hun neutrino's), en quarks – de bouwstenen van bijvoorbeeld het proton en het neutron. Leptonen en quarks zijn er elk in zes verschillende soorten ("flavours"), die in de drie genoemde "families" gegroepeerd worden – zie afbeelding 2. Elke familie is zwaarder dan de vorige, met de topquark als zwaarste deeltje in het standaardmodel. De tak van de natuurkunde die zich bezighoudt met de dynamiek van de verschillende soorten quarks en leptonen, heet "flavour physics" (letterlijk vertaald: "smaaknatuurkunde", hoewel deze vertaalde term nog niet erg populair is).

De dynamiek van de quarks en leptonen wordt grotendeels bepaald door de zwakke en de sterke kernkracht. De *sterke kernkracht* is de kracht die de quarks bij elkaar houdt en zorgt dat ze alleen in gebonden toestanden kunnen bestaan. Zulke gebonden toestanden worden ook wel "hadronen" genoemd, en het fenomeen dat dit de enige mogelijke toestanden zijn heet "confinement" ("opsluiting"). De krachtdragers van de sterke kernkracht zijn de gluonen. In een vervalproces dat begint en eindigt met verschillende hadronen, kunnen spontaan gluonen uitgewisseld worden, wat berekeningen waarbij de sterke kernkracht betrokken is erg lastig maakt.

De *zwakke kernkracht* is de kracht die ervoor zorgt dat kernverval kan plaatsvinden. De bosonen die de zwakke kernkracht overbrengen, heten de $W^{\pm}$ en de Z-bosonen. Ze zijn beide relatief log en zwaar, wat er voor zorgt dat de zwakke kernkracht "zwak" is. De Z-bosonen gaan alleen maar interacties aan met quarks en leptonen van eenzelfde soort, maar de $W^{\pm}$-bosonen gaan tegelijkertijd een interactie aan met een up-type quark (dat wil zeggen: een up-quark of een soortgelijk deeltje uit een andere familie: een charm- of topquark) en een down-type quark (dus een down-, strange- of bottom-quark). De verschillende up- en down-type quarks kunnen onderling ook nog "mixen" (voorkomen in quantummechanische "tussenvormen"), wat ervoor zorgt dat er ontzettend veel verschillende

vervalsmogelijkheden zijn. De precieze mixing tussen de quarks kan op een meetkundige manier beschreven worden door drie hoeken, θ_{12}, θ_{23} en θ_{13}, en één complex getal, $e^{i\delta_{13}}$. Het meten en berekenen van de hoeken en het complexe getal is een van de belangrijkste doelen in flavour physics. De complexe fase δ_{13} speelt een belangrijke rol: de waarde van die variabele zorgt voor een fenomeen dat *CP-schending* wordt genoemd. Die CP-schending leidt er weer toe dat materie zich anders gedraagt dan anti-materie, en kan dus een licht werpen op een van de grote vragen waar we dit artikel mee begonnen!

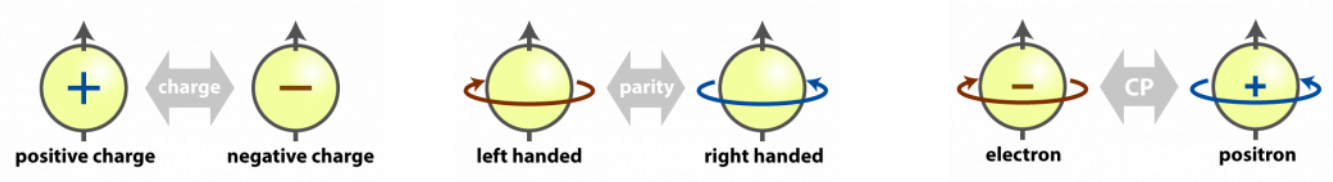
Afbeelding 3. Madame Wu.Chien-Shiung Wu in haar laboratorium. Foto via scientificwomen.net.

CP-schending

In iets meer detail: *CP-schending* is een schending van CP-symmetrie, een combinatie van twee bijna-symmetrieën in de natuur. De C staat hierin voor “charge” (lading), en de P voor “parity” (pariteit). Als een systeem ladingssymmetrie heeft, blijven de natuurwetten onveranderd als we de lading van alle deeltjes een minteken geven. We kunnen de ladingssymmetrie ook interpreteren als het verwisselen van een deeltje met zijn antideeltje. Ladingssymmetrie op zich is geen symmetrie van de natuur: er zijn deeltjesprocessen die

voor de bijbehorende antideeltjes niet op exact dezelfde manier plaatsvinden. *Pariteit* creëert een spiegelbeeld van een fysisch systeem, waarin alle ruimtelijke coördinaten een minteken krijgen ($x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$ en $z \rightarrow -z$). Tot in de jaren 50 geloofde men dat pariteit een symmetrie was van de natuur, wat zou betekenen dat de natuurwetten hetzelfde blijven als je links met rechts zou verwisselen (en de andere coördinaten).

In 1956 echter deed de Chinese natuurkundige Chien-Shiung Wu, beter bekend als Madame Wu, een beroemd experiment: ze mat het verval van kobalt-60 en ontdekte dat pariteit niet behouden was: het experiment had een voorkeur voor een bepaalde richting, waardoor je onderscheid kon maken tussen links en rechts. Hierna dacht men dat, als pariteit dan geen symmetrie was, pariteit en ladingverwisseling sámen wel behouden zouden zijn. Dit betekent dat de natuurwetten hetzelfde zouden zijn als je tegelijkertijd elk deeltje met zijn antideeltje verwisselt én alle ruimtelijke coördinaten een minteken geeft. In 1964 zag men echter dat ook CP-symmetrie geschonden wordt, in een vervalsproces waarin zogeheten kaon-deeltjes vervallen in pionen, deeltjes die bestaan uit twee quarks. [1].



Afbeelding 4. CP-symmetrie.Van links naar rechts: ladingssymmetrie, pariteitssymmetrie en hun combinatie: CP symmetrie. Afbeelding: Symmetry magazine / Flip Tanedo.

Nieuwe natuurkunde

CP-schending zou het verschil tussen materie en antimaterie in het universum moeten verklaren, aangezien die symmetriebreking ervoor zorgt dat materie zich anders gedraagt dan antimaterie. Er is echter een probleem: de hoeveelheid CP-schending die het standaardmodel voorspelt is niet genoeg om het grote verschil in ons huidige universum te verklaren. Eventuele nog onbekende deeltjes, die zorgen voor nieuwe vervalprocessen, zouden verantwoordelijk kunnen zijn voor extra CP-schending. De effecten van deze nieuwe deeltjes zou je dan terug moeten zien als je de hoeveelheid CP-schending in verschillende vervallen heel precies meet. Wanneer de meting niet overeenkomt met de berekening, móet er wel sprake zijn van nieuwe processen. Zo kan je, als je genoeg precisie hebt, zelfs nieuwe deeltjes “ontdekken” die misschien zo zwaar zijn dat je ze nooit zou kunnen produceren in

een deeltjesversneller. Zulke metingen en berekeningen worden ook wel *indirecte* zoektochten naar nieuwe natuurkunde genoemd, terwijl het produceren en detecteren van een nieuw deeltje in een deeltjesversneller een *directe* zoektocht is.

Directe zoektochten hebben ons bijvoorbeeld het Higgsdeeltje opgeleverd in 2012, maar zijn nog niet succesvol geweest in de zoektocht naar nieuwe natuurkunde die verder gaat dan het standaardmodel. In de indirecte, precisie-zoektochten daarentegen zijn er inmiddels wel hints voor zulke nieuwe natuurkunde gevonden. Op verschillende plekken binnen de flavour-sector van het standaardmodel hebben fysici verschillen gevonden tussen experimentele data en theoretische voorspellingen van het standaardmodel. De verschillen zijn nog erg klein en statistisch niet relevant genoeg om al van een ontdekking te kunnen spreken, maar de metingen geven zeker aan dat de flavour-sector een veelbelovende plek is om op zoek te gaan naar natuurkunde die niet door het standaardmodel beschreven wordt. Er is een nieuw experiment opgestart in Japan, genaamd Belle II, dat grotendeels gericht is op de flavour sector. Ook de LHC krijgt op dit moment een upgrade. Hopelijk zullen de data van zowel Belle II als de LHC-upgrade uitsluitsel kunnen geven over het (wel of niet) verschijnen van nieuwe natuurkunde. Wordt vervolgd…?

Referentie

[1] Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L., and Turlay, R. (1964). Evidence for the 2π Decay of the Meson. *Phys. Rev. Lett.*, 13:138–140.

In de zomerperiode verschijnen de Quantum Universe-artikelen éénmaal per week, op vrijdag. Vanaf september is de redactie weer terug van alle conferenties en vakanties, en verschijnen de artikelen weer tweemaal per week, op dinsdag en vrijdag.