

Nobelprijs Natuurkunde 2008 voor Kobayashi en Maskawa

Makoto Kobayashi en Toshihide Maskawa ontvingen dit jaar samen de helft van de Nobelprijs voor natuurkunde voor de ontdekking van de oorsprong van een gebroken symmetrie die voorspelt dat er tenminste drie quarkgeneraties in de natuur voorkomen. Marcel Merk

Discrete symmetriën

Het begrip symmetrie speelt een centrale rol in de theoretische natuurkunde. Een symmetrie dient hierbij gezien te worden als een invariantie van een fysisch systeem onder een bepaalde transformatie. Een voorbeeld van dergelijke invariantie is dat krachten tussen deeltjes (denk aan zwaartekracht tussen massa's of elektromagnetische kracht tussen geladen deeltjes) niet afhankelijk van een verplaatsing van het systeem in de tijd of in de ruimte. Deze translatiesymmetrie leidt tot de wetten van behoud van energie en impuls.

Het betreft een algemeen geldende wetmatigheid: symmetriën leiden tot behoudswetten of tot selectieregels voor interacties. De theoretisch fysicus Tsung-Dao Lee categoriseerde symmetriën in vier hoofdgroepen: permutatiesymmetriën, continue ruimte-tijd symmetriën, discrete symmetriën en interne (of unitaire) symmetriën. Hij onderkende dat in alle gevallen de grondslag van een symmetrie ligt in het bestaan van een hieraan gerelateerde fundamentele *onobserveerbare*: een grootte die niet gemeten kan worden. In bovenstaand voorbeeld is deze grootte de absolute positie van de oorsprong in tijd en ruimte. Meer voorbeelden zijn te vinden in [1].

Het werk van Makoto Kobayashi en Toshihide Maskawa is gerelateerd aan de studie van zogenoemde discrete symmetriën bij wisselwerkingen tussen elementaire deeltjes. Het betreft hier symmetriën van golf functies van elementaire deeltjes onder twee afbeeldingen: ruimte-inversie ofwel pariteit (P) en ladingsverwisseling ofwel ladings-conjugatie (C). Bij de pariteitoperator wordt het systeem getransformeerd via een puntspiegeling in de oorsprong. Hierbij wordt elke coördinaat \vec{x} afgebeeld op coördinaat $-\vec{x}$, hetgeen overeenkomt met een vlakke

voor-achter spiegeling, welke links- en rechtshandigheid verwisseld, gevolgd door een rotatie van 180° . Bij ladingsconjugatie wordt elk deeltje vervangen door zijn antimaterie-tegenhanger met tegenovergestelde lading. De vraag - eigenlijk 2 vragen, a) spiegelwereld, b) antiwereld die gesteld wordt is of de natuurwetten identiek zijn voor de fysische systemen voor en na deze afbeeldingen. Met andere woorden: is het mogelijk om te bepalen of een fundamenteel proces rechtstreeks geobserveerd wordt of in een spiegel? Kan er een absolute definitie gegeven worden van materie en antimaterie?

Pariteit en de linkshandigheid van de zwakke wisselwerking

Bij elementaire deeltjes kan het relatieve begrip links- of rechtshandigheid gedefinieerd worden met behulp van de projectie van de deeltjesspinrichting op de bewegingsrichting. We spreken van een rechtshandig deeltje of deeltje met positieve heliceiteit als deze projectie gelijkgericht is aan de bewegingsrichting en van negatieve heliceiteit als ze tegengesteld is. Het spiegelbeeld van een rechtshandig bewegend deeltje is een linkshandig deeltje. Zie ook het kader over spin en heliceiteit. Tot in 1956 was men ervan overtuigd dat alle natuurwetten spiegelsymmetrisch waren; op microscopische

412

Marcel Merk studeerde natuurkunde aan de Katholieke Universiteit in Nijmegen. Zijn promotieonderzoek betrof de meting van het aantal neutrino generaties bij de Large Electron Positron versneller van CERN. Na een postdoc positie bij Carnegy Mellon University kwam hij terug naar Nederland als KNAW fellow bij de Universiteit van Utrecht. Sinds 2005 is hij programmaleider B-fysika op het Nikhef instituut en als bijzonder hoogleraar verbonden aan de Vrije Universiteit van Amsterdam.



marcel.merk@nikhef.nl

schaal gelden gelijke krachten voor linkshandige en rechtshandige deeltjes. Het werd ondenkbaar geacht dat de natuur een absoluut verschil zou kennen tussen linkshandigheid en rechtshandigheid. De natuurkundigen Tsung-Dao Lee en Chen Ning Yang (Nobelprijs 1957) waren de eersten die zich realiseerden dat er geen experimenteel bewijs was dat de zwakke interactie daadwerkelijk spiegelsymmetrisch is en zij bedachten een experiment dat hierover uitsluiting zou geven [2]. Het beroemde experiment van Chien-Shiung Wu [3], waarin de hoekverdeling van vrijkomende elektronen in beta-verval van gepolariseerde ^{60}Co kernen gemeten werd, toonde aan dat de zwakke kernkracht een voorkeur had om elektronen met negatieve heliceiteit (“linkshandige elektronen”) te produceren.

Uit verdere studies bleek dat de natuurwet van de zwakke wisselwerking zelfs volledig linkshandig is: rechtshandige deeltjes blijken ervoor immuun te zijn. De pariteitsymmetrie, die wel gerespecteerd wordt in de zwaartekracht, het elektromagnetisme en in de sterke kernkracht, wordt maximaal gebroken in de zwakke kernkracht. “*God is a weak left-hander*”, zei Wolfgang Pauli. Aldus blijkt het mogelijk de echte wereld te onderscheiden van de spiegelwereld. Zien we een zwakke interactie tussen rechtshandige elektronen, dan zien we het proces via de spiegel.

Antimaterie

Een voorspelling van Paul Dirac (Nobelprijs 1933) is dat er voor elk fundamenteel materiedeeltje in de natuur ook een antideeltje moet bestaan. Deze

voorspelling werd oorspronkelijk zwaar in twijfel getrokken totdat Carl Anderson in 1932 (Nobelprijs 1936) een nieuw deeltje ontdekte dat alle eigenschappen had van een elektron, behalve dat het een tegenovergestelde elektrische lading had. Dit

was het anti-elektron ofwel positron. In de theorie van Dirac spelen linkshandige elektronen een volledig symmetrische rol aan rechtshandige positronen. Na de ontdekking van de pariteitsschending in 1956 was de heersende opvatting dat dan tenminste de symmetrie tussen linkshandige materie en rechtshandige antimaterie behouden zou zijn, zodat er netto gelijke wetten gelden voor de totale hoeveelheid materie en antimaterie. Het behoud van deze symmetrie, aangeduid met de term CP-symmetrie, werd door wetenschappers algemeen aangenomen.

Vreemde kaonen

Echter, zelfs de symmetrie tussen linkshandige materie en rechtshandige antimaterie bleek niet houdbaar toen een team van wetenschappers onder leiding van James Cronin en Val Fitch in 1964 een minuscule afwijking ontdekten in het zwakke verval van zogenaamde K-mesonen [4] (Nobelprijs 1980).

Neutrale K-mesonen of kaonen zijn



Toshihide Maskawa (links) en Makoto Kobayashi.

deeltjes die bestaan uit een d -quark en een anti- s quark. Omdat het gebonden toestanden van een quark en een anti-quark betreft, blijkt het mogelijk dat kaonen kunnen overgaan in anti-kaonen en omgekeerd; een fenomeen dat kaon-oscillatie wordt genoemd.

Omdat kaonen quarks uit de tweede generatie bevatten (s -quarks), vervallen ze via de zwakke wisselwerking naar pionen (deeltjes die alleen uit u - en d -quarks bestaan) en antipionen. Er blijken twee vrije kaon-toestanden in de natuur voor te komen: een langlevende toestand, K_L , die vervalt naar 3 pionen, en een kortlevende toestand, K_S , die vervalt naar twee pionen. Onder de gecombineerde CP-operatie heeft de golf functie van twee pionen een eigenwaarde van $+1$ en de golf functie van drie pionen een eigenwaarde van -1 . Het team van Cronin en Fitch observeerde nauwkeurig de langlevende K_L toestanden en deed de verrassende ontdekking dat in twee op de duizend vervallen een eindtoestand van twee pionen, dus met tegengestelde CP-eigenwaarde, gevormd werd.

Spin en heliceiteit

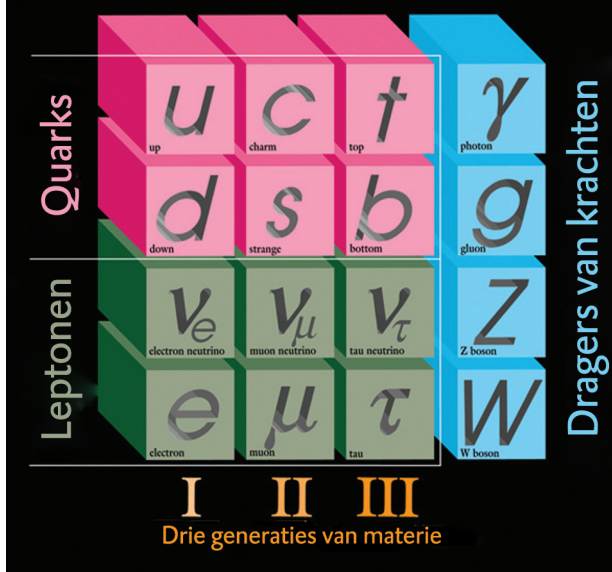
Elementaire deeltjes bezitten een interne hoeveelheid impulsmoment, genaamd spin. Het spin quantumgetal vertoont hetzelfde gedrag als het klassiek impulsmoment ($\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$), maar is een intrinsieke eigenschap van het deeltje. De fundamentele materiedeeltjes, quarks en leptonen, hebben een intrinsieke spin van $\frac{1}{2} \hbar$.

De heliceiteit van een deeltje is het resultaat van de meting van de spin-component langs zijn bewegingsrichting. De heliceiteit van een lepton of quark kan twee waarden hebben: $+\frac{1}{2} \hbar$ of $-\frac{1}{2} \hbar$. Deeltjes met positieve heliceiteit worden ook wel rechtshandig genoemd (rotatie en beweging volgens de rechterhandregel) en deeltjes met negatieve heliceiteit linkshandig.

Er dient opgemerkt te worden dat heliceiteit afhangt van de keuze van een inertiaalstelsel en dus geen Lorentz-invariante grootheid is. Strikt genomen mag deze definitie alleen in de limiet van massalozere deeltjes gebruikt worden. Voor deeltjes met massa wordt links- of rechtshandigheid gedefinieerd via de Dirac chiraliteitoperator γ_5 .

Onder de pariteitsafbeelding ($\vec{r} \rightarrow -\vec{r}; \vec{p} \rightarrow -\vec{p}$) blijft de spinrichting van een deeltje gelijk. Omdat de bewegingsrichting omkeert, wordt een linkshandig deeltje na de pariteitsoperatie afgebeeld op een rechtshandig deeltje. Door interacties van links- en rechtshandige deeltjes te vergelijken wordt de symmetrie van de natuur onder pariteit bestudeerd.

ELEMENTAIRE DEELTJES



Het K_L deeltje bleek soms in de “verkeerde” CP-eigentoestand te kunnen bestaan, waaruit volgt dat de zwakke wisselwerking soms de CP-symmetrie schendt. Dit zou betekenen dat er met de zwakke wisselwerking toch een fundamenteel onderscheid gemaakt kan worden tussen linkshandige deeltjes en rechtshandige antideeltjes, waardoor de symmetrie tussen materie en antimaterie daadwerkelijk wordt gebroken.

Lincoln Wolfenstein opperde kort na deze metingen dat deze asymmetrie te wijten zou zijn aan een nieuwe natuurkracht: de zogenoemde “superzwakke wisselwerking” [5].

Het standaardmodel en de Kobayashi-Maskawa matrix

In 1967 en 1968 introduceerden Sheldon Glashow, Abdus Salam en Steven Weinberg een theorie [6] voor de zwakke wisselwerking (Nobelprijs 1979) die tegenwoordig een belangrijk deel uitmaakt van het zogenoemde standaardmodel. In 1971 werd dit model alom geaccepteerd nadat Gerard 't Hooft en Martinus Veltman hadden aangetoond [7] dat deze theorie renormaliseerbaar is. Dit betekent dat ze consistent is in alle ordes van storings-theorie (Nobelprijs 1999).

Na deze tumultueuze ontwikkelingen onderzochten de jonge Japanse wetenschappers Makoto Kobayashi en Toshihide Maskawa het probleem van CP-schending in het kader van het toenmalig recente standaardmodel.

Het standaardmodel van fundamentele materie-deeltjes en krachten. Zowel de leptonen als de quarks zijn gerangschikt in drie equivalente generaties met elk twee deeltjes. In de blauwe kolom aan de rechterkant staan de dragers van de krachten die verantwoordelijk zijn voor elektromagnetisme (het foton γ), sterke kernkracht (de gluonen g) en zwakke kernkracht (de W en Z bosonen).

Kobayashi en Maskawa beseften dat het noodzakelijk was om complexe getallen te introduceren in de zwakke wisselwerkingen tussen de quark-quantumvelden. Zij waren op de hoogte van het baanbrekende werk van Nicola Cabibbo [8] die had laten zien dat de zwakke

wisselwerking tussen de, op dat moment bekende, quarks (het u-, d- en s-quark) beschreven kon worden met een superpositie van de d- en s-quarks. De golf functies van deze quarks mengen in de interactie en een nieuwe natuurconstante werd geïntroduceerd: de Cabibbo mengingshoek θ_c .

Kobayashi en Maskawa zagen dat menging tussen de quark golf functies met complexe getallen zou leiden tot een verklaring voor de geobserveerde CP-schending. Echter, om dit te bereiken hadden zij maar liefst 6 quarks nodig, verdeeld over drie generaties. Zij poneerden [9] dat er 3 nieuwe, nog te ontdekken quarks zouden bestaan. Hun artikel verscheen in 1972 toen er nog maar 3 quarks experimenteel waargenomen waren. Nadat in 1974 het vierde en in 1977 het vijfde quark werden waargenomen, realiseerde men zich dat er daadwerkelijk 3 generaties fundamentele deeltjes bestaan en dat met het Cabibbo-Kobayashi-Maskawa mixing mechanisme op een consistente manier een asymmetrie tussen materie en antimaterie-interacties kon worden ingebouwd. Het bleek dus niet nodig dat hiervoor een alternatieve natuurkracht – de superzwakke kracht van Wolfenstein – geïntroduceerd moest worden.

B-fysika en toekomstig onderzoek

De ontdekking van het vijfde quark, het b-quark, leidde tot nieuwe mogelijkheden om de hypothese van Kobayashi

en Maskawa te toetsen. Net als bij neutrale K-mesonen kunnen vervallen van neutrale B-mesonen (deeltjes die een b-quark bevatten) en hun antipartners gebruikt worden om CP-schending te meten. In tegenstelling tot het kaonverval, werd bij het B-mesonverval een grote mate van CP-schending verwacht omdat het b-quark een derde generatie quark is. Daarnaast heeft het b-quark een aanzienlijk hogere massa dan het s-quark, waardoor het mogelijk werd CP schending in verschillende vervalkanalen te bestuderen.

De experimenten BaBar in SLAC (Californië) en Belle in KEK (Japan) hebben vanaf 1999 een grote hoeveelheid metingen opgeleverd, die tot dusverre consistent zijn met de Kobayashi-Maskawa hypothese.

De Russische fysicus Andrej Sacharov (Nobelprijs voor de vrede 1975) toonde in zijn beroemde artikel in 1967 [10] aan dat CP-schending een noodzakelijk ingrediënt is bij het ontstaan van ons huidige, materie gedomineerde, heelal.

Pogingen om de baryogenese te beschrijven met de CP-schending zoals beschreven in het model van Kobayashi en Maskawa zijn tot dusverre niet succesvol en het is waarschijnlijk dat er nieuwe bronnen van CP-schending in de theorie gevonden moeten worden. Een speurtocht naar deze bronnen is de missie van een van de vier experimenten in de LHC versneller van CERN, het LHCb experiment, dat in 2009 van start zal gaan.

Referenties

- 1 T.D.Lee, *Contemporary Concepts in Physics Volume 1: Particle Physics and Introduction to Field Theory, Revised and Update 1st edition*, Harwood Academic Publishers, 1990.
- 2 T.D. Lee and C.N. Yang, “Question of Parity Conservation in Weak Interactions”, *Phys. Rev.* 104 (1956) 254.
- 3 C.S. Wu, et. al., “Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay”, *Phys. Rev.* 105 (1957) 1413.
- 4 J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch and R. Turlay, “Evidence for the 2π Decay of the $K(2)_0$ Meson”, *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964) 138.
- 5 L. Wolfenstein, “Violation of CP Invariance and the Possibility of Very Weak Interactions”, *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964)

562.

- 6 S. Weinberg, "A Model of Leptons", Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264;
- A. Salam, "Weak and Electromagnetic Interactions", printed in "Elementary Particle Theory: Proceedings of The Nobel Symposium", ed. N. Svartholm, 1968, Lerum Sweden (1968) 367-377;
- S.L. Glashow, "Partial Symmetries of Weak Interactions", Nucl. Phys. 22 (1961) 579.
- 7 G. 't Hooft, "Renormalizable Lagrangians for Massive Yang-Mills Fields", Nucl. Phys. B3 (1971) 167;
- G. 't Hooft and M.J.G. Veltman, "Regularization and Renormalization of Gauge Fields", Nucl. Phys. B44 (1972) 189.
- 8 N. Cabibbo, "Unitary Symmetry and Leptonic Decays", Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 531.
- 9 M. Kobayashi and K. Maskawa, "CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interactions", Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652.
- 10 A. D. Sacharov, "Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe", Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5 (1967) 32.



De kosmische materie-antimaterie asymmetrie puzzel. Uit observaties zien we dat het zichtbare heelal vrijwel alleen bestaat uit materie en dat antimaterie afwezig is, terwijl de natuurwetten maar een minuscuul verschil herbergen tussen het gedrag van materie en antimaterie © The Nobel Foundation.