

Het mysterie van de ontbrekende antimaterie

Waarom observeren we geen antimaterie in de natuur? Deze vraag staat centraal in een van de vier grote experimenten in de LHC-versneller van CERN, het LHCb-experiment. Om dichterbij een antwoord te komen is de specifieke vraagstelling voor dit experiment: wat zou er gebeuren als elk deeltje vervangen wordt door zijn corresponderende anti-deeltje?

Marcel Merk en Gerhard Raven

Het LHCb-experiment is ontworpen om precisie metingen te verrichten van de verschillen in de fundamentele natuurkrachten tussen materie en antimaterie.

Antimaterie

Wat wordt er eigenlijk verstaan onder materie en antimaterie? Een gangbare definitie van materie is datgene wat massa heeft. Deze omschrijving is toepasbaar voor het merendeel van de natuurwetenschappen maar kan leiden tot het misverstand dat antimaterie kan worden gezien als antimassa. Wat is dan wel de correcte definitie van materie? Onderzoek naar de bouwstenen van de wereld leert dat alle mate-

rie is opgebouwd uit atomen met een positief geladen kern van protonen en neutrale neutronen met daaromheen een wolk van negatief geladen elektronen. Antimaterie zou dan bestaan uit een negatief geladen kern van anti-protonen en neutrale anti-neutronen met daaromheen positief geladen anti-elektronen oftewel positronen. Een positron is geheel identiek aan een elektron behalve dat het een tegenovergestelde elektrische lading heeft. Vergelijkbaar: een anti-proton of anti-neutron is opgebouwd uit anti-quarks in plaats van quarks. Deze anti-quarks zijn weer identiek aan quarks behalve dat ze de tegenovergestelde lading hebben. Maar waarom zouden dergelijke anti-deeltjes eigenlijk moeten bestaan?

Het gedrag van al deze deeltjes wordt beschreven door de quantummechanica. De golfvergelijking van Schödinger geeft een nauwkeurige beschrijving van de elektronenbanen rond de atoomkernen en verklaart daarbij ook het scheikundige gedrag van atomen, bijvoorbeeld hun positie in het periodieke systeem der elementen. Echter, deze vergelijking is niet van toepassing op deeltjes die met relativistische snelheden wisselwerken. De theoretisch fysicus Dirac bedacht een alternatieve golfvergelijking waarin

de speciale relativiteitstheorie en de quantummechanica verenigd zijn. Deze vergelijking heeft echter een onverwachte, wiskundige symmetrie waardoor er voor elke oplossing die overeenkomt met een materiedeeltje een tweede oplossing mogelijk is: het antimateriedeeltje. Het gevolg is dat energie kan worden omgezet in paren van materie- en antimateriedeeltjes volgens Einsteins $E=mc^2$ en tevens dat materie- en antimateriedeeltjes elkaar kunnen annihilieren waarbij hun massa wordt omgezet in energie. Deze voorspelling van anti-deeltjes werd sceptisch ontvangen, maar dat veranderde in 1932 toen Anderson botsingsproducten bestudeerde van

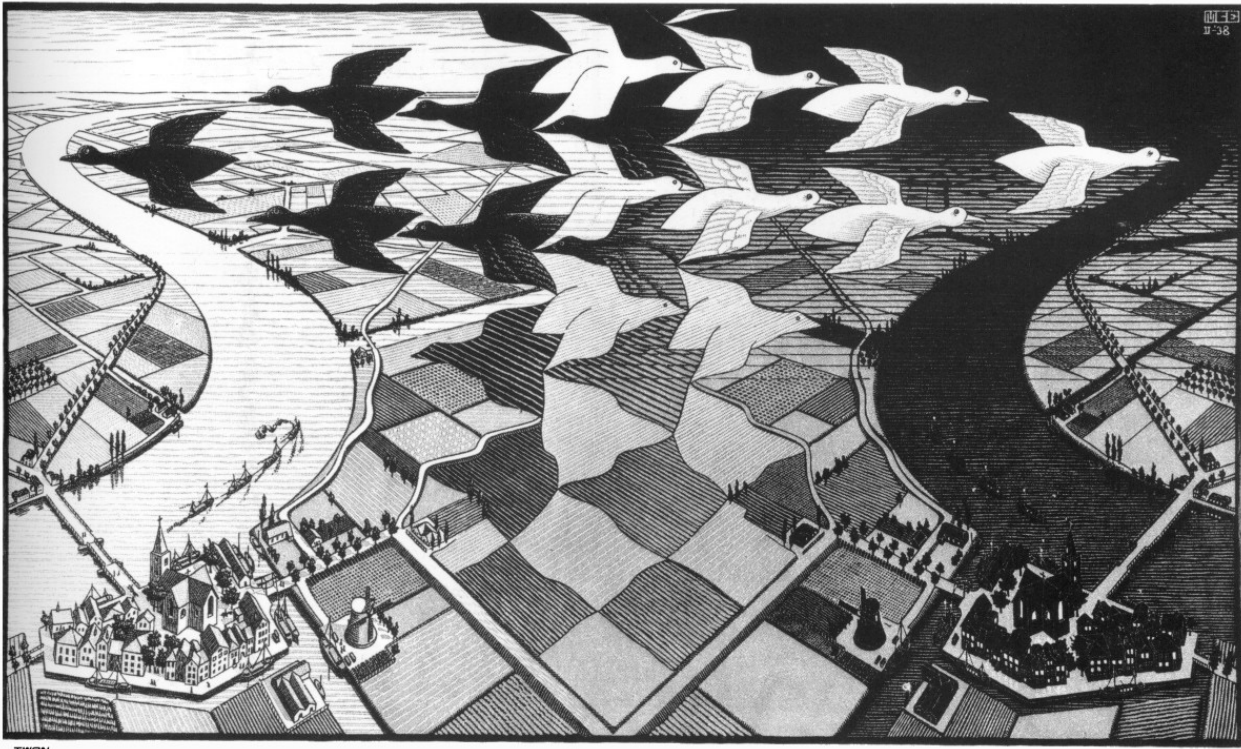
Marcel Merk studeerde natuurkunde aan de Katholieke Universiteit in Nijmegen. Zijn promotie-onderzoek en zijn eerste postdoc bij de Carnegie Mellon Universiteit van Pittsburg betroffen de bepaling van het aantal neutrinogeneraties in de natuur bij de Large Electron-Positron-versneller van CERN. Daarna kwam hij terug naar Nederland en begon zijn onderzoek aan CP-schending als KNAW fellow bij de Universiteit Utrecht. Sinds 2005 is hij programmaleider B-fysika op het Nikhef en als hoogleraar verbonden aan de VU.



marcel.merk@nikhef.nl

Gerhard Raven studeerde natuurkunde aan de Universiteit Utrecht. Zijn promotie-onderzoek betrof de directe meting van het aantal soorten neutrino's bij de Large Electron-Positron-versneller van CERN. Als postdoc bij de Universiteit van California, San Diego zocht hij eerst naar het higgsdeeltje om vervolgens te vertrekken naar het BaBar-experiment bij het Stanford Linear Accelerator Center. Daar was hij een van de hoofdauteurs van de ontdekking van CP-schending in het B-meson-systeem. Sinds 2002 is hij verbonden aan de VU en het Nikhef. In 2011 werd hij benoemd tot hoogleraar bij de VU.





Figuur 1 *Dag en Nacht*, houtgravure van M.C. Escher. De gebroken zwart-wit- en links-rechtssymmetrie in de figuur is illustratief voor de bijna perfecte lading-pariteitsymmetrie in de natuur.

kosmische straling met de atmosfeer. Hij zag in zijn Wilsonvat een deeltje met de elektronmassa, maar met een positieve, dus ‘verkeerde’ lading: het positron. Tegenwoordig kunnen antimateriedeeltjes relatief eenvoudig geproduceerd worden in versnellerlaboratoria. Het ATHENA-experiment op CERN is er zelfs in geslaagd om anti-elektronen en anti-protonen te combineren tot enkele tienduizenden anti(waterstof)-atomen [1].

Gebaseerd op de symmetrie van de Diracvergelijkingen zou een rechtsom draaiend antimateriedeeltje zich moeten gedragen als een perfect ladingspiegelbeeld van een linksom draaiend materiedeeltje: de natuurwetten voor ‘linkshandige’ elektronen zijn geheel identiek aan die van ‘rechtshandige’ positronen. We spreken van een gecombineerde lading- (positieve/negatieve lading) en pariteit- (links-handig/rechtshandig) symmetrie in de natuur (zie figuur 1). De Engeltalige naam voor deze symmetrie is *Charge-Parity* (CP). Op grond van deze symmetrie mogen we verwachten dat er tijdens de oerknal evenveel materie als antimaterie is ontstaan. Dit leidt onmiddellijk tot de vraag: Waarom nemen we geen antimaterie waar in ons universum?

Een begin van een antwoord werd geformuleerd door Sacharov, die in 1967

liet zien dat het breken van deze CP-symmetrie een noodzakelijk ingrediënt is voor de zogenaamde baryogenese: het ontstaan van ons huidige, door materie gedomineerde heelal.

Enkele jaren daarvoor was er door een team geleid door Cronin en Fitch een subtiel effect ontdekt in het verval van K-mesonen. Neutrale K-mesonen, of kaonen, zijn deeltjes die bestaan uit een d-quark en een anti-s-quark. Het blijkt mogelijk dat kaonen spontaan kunnen overgaan in anti-kaonen en omgekeerd[2]. Het team observeerde dat een overgang van een kaon in een anti-kaon iets sneller plaatsvindt dan omgekeerd. Het betrof hier een verschil van ongeveer vier op duizend. Dit was een schokkende ontdekking, die aangaf dat antimateriedeeltjes zich anders gedragen dan materiedeeltjes: de CP-symmetrie is gebroken. Kort na deze waarnemingen opperde Wolfenstein dat deze asymmetrie te wijten zou zijn aan een nieuwe natuurkracht: de zogenaamde superzwakke wisselwerking.

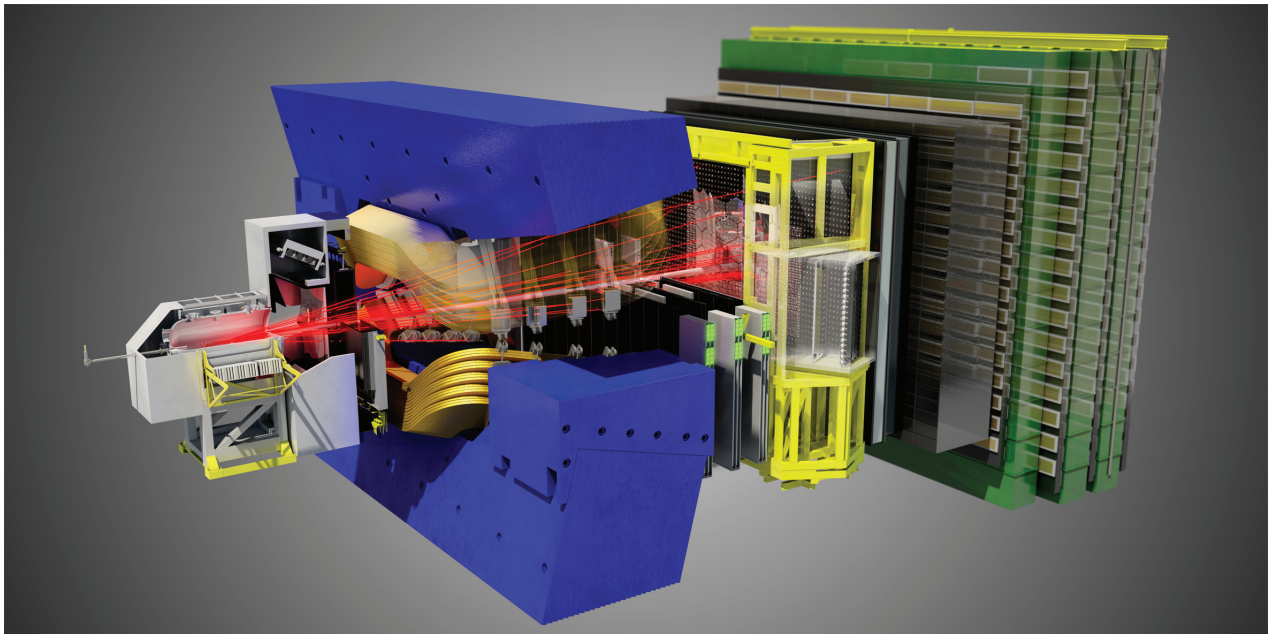
Het Standaardmodel en het Kobayashi-Maskawamechanisme

In 1967 en 1968 introduceerden Glashow, Salam en Weinberg een model voor de zwakke wisselwerking tussen de drie toen bekende quarks, u, d en s, die nu nog steeds geldt als het

Standaardmodel. Nadat ’t Hooft en Veltman in 1971 hadden aangetoond dat deze theorie consistent is in alle ordes van storingsrekening, oftewel renormaliseerbaar is, werd deze theorie alom geaccepteerd.

Kort daarna bedachten Kobayashi en Maskawa een manier om schending van CP symmetrie in dit Standaardmodel op te nemen zonder een nieuwe kracht te introduceren [3]. In navolging van Cabibbo beschreven zij dat de zwakke wisselwerking plaatsvindt tussen toestanden die een superpositie zijn van de massa-eigentoestanden van verschillende quarks. Het gevolg hiervan is dat de sterkte van de zwakke wisselwerking tussen quarks wordt beschreven door complexe getallen en dat materie- en anti-materieprocessen plaatsvinden met quantummechanische amplitudes die elkaars complex geconjugeerde zijn.

Alleen als er minimaal zes verschillende soorten quarks bestaan, verdeeld over drie generaties, zal dit zogenaamde CKM-mechanisme kunnen werken. Ten tijde van hun artikel in 1972 waren slechts drie soorten quarks waargenomen en Kobayashi en Maskawa poneerden dat er drie nieuwe nog te ontdekken quarks zouden moeten bestaan. De tweede quarkgeneratie werd gecomplementeerd door de ontdekking van het



Figuur 2 Weergave van een gebeurtenis in het LHCb-experiment. In het rood de gereconstrueerde deeltjessporen die door de detectorlagen vliegen.

charmquark c in 1974 en het bestaan van een derde generatie werd geleverd door de ontdekking van het bottomquark b in 1977. Met de ontdekking van het topquark t weten we nu dat er drie generaties elementaire deeltjes bestaan, hetgeen precies het minimum is om CP-schending in het Standaardmodel te accommoderen. Helaas is de CP-schending zoals beschreven door het CKM-mechanisme volstrekt onvoldoende om de baryogenese te beschrijven die noodzakelijk is om het waarneembare heelal te beschrijven. Dit is de motivatie om te zoeken naar nieuwe manieren waarop

CP-schending kan voorkomen. Deze speurtocht is de missie van het LHCb-experiment.

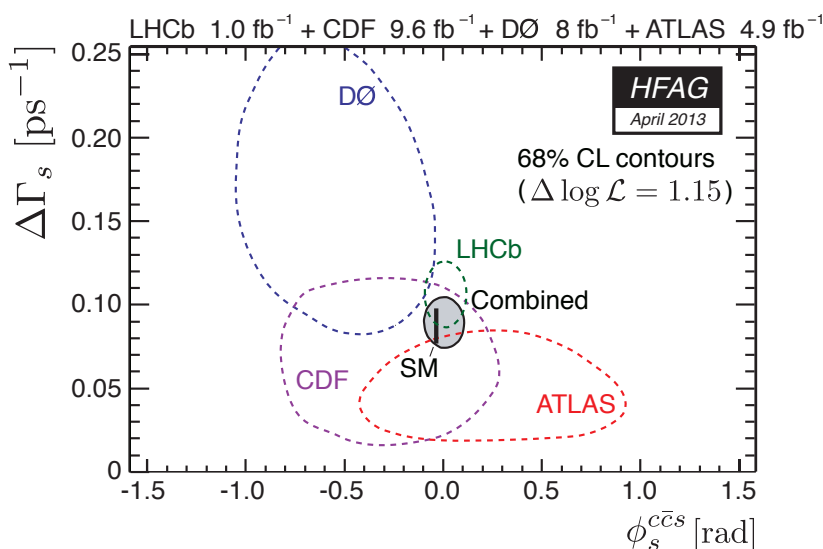
CP-schending bestuderen met het B-meson

K-mesonen, waarbij CP-schending voor het eerst is waargenomen, zijn deeltjes met een relatief lage massa. Daardoor zijn effecten van de sterke wisselwerking tussen het s - en d -quark moeilijk te berekenen en waarnemingen van CP-schending eveneens lastig kwantitatief te interpreteren. Dit is wel mogelijk bij vervalsprocessen van de zwaardere B-mesonen,

deeltjes die bestaan uit een b -quark en / of een anti- d - of een anti- s -quark. Deze B-mesonen bieden los van hun hoge massa nog een ander voordeel: b -quarks zijn derde-generatiequarks, wat in het CKM-model betekent dat de CP-asymmetrieën groter kunnen zijn dan bij kaonen. Dit werd meteen duidelijk in de eerste meting van CP-schending bij B-mesonen in de BaBar- en Belle-experimenten [4], bij vervallen van (anti) B_0 -mesonen naar een zogenaamde J/ψ meson (een c -quark en een anti- c -quark) en een neutraal kaon. Deze vervallen bleken zeer verschillend te verlopen voor B_0 -mesonen en anti- B_0 -mesonen.

Zoeken naar nieuwe fysica: LHCb

Een B-meson kan op vele manieren vervallen naar lichtere deeltjes, waarvan het bovengenoemde verval een voorbeeld is. Op dit moment zijn er enkele honderden vervalsmogelijkheden bekend. In een klein deel van deze vervallen wordt er enige CP-asymmetrie voorspeld. Als het CKM-mechanisme de enige bron van CP-schending is, moeten al deze vervallen een consistent beeld opleveren. Mocht er een verval zijn dat niet overeenstemt met de voorspelling, dan betekent dit dat er nieuwe fysica in het spel is. Om te zoeken naar mogelijke nieuwe bronnen van CP-schending is er een specifiek experiment gebouwd aan de LHC-versneller dat deze processen



Figuur 5 De CP-schendingsparameter ϕ_s van het verval $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ uitgezet samen met de B_s -mixingparameter $\Delta\Gamma_s$, zoals gemeten bij verschillende experimenten. De groen gestippelde cirkel geeft de LHCb-meting[7], de zwarte cirkel het gecombineerde resultaat van alle experimenten en de zwarte lijn de voorspelling van het Standaardmodel.

Titel

B-mesonen, gebonden toestanden van een b-quark met een ander quark, behoren tot de zwaarste deeltjes toestanden met een levensduur die lang genoeg is om experimenteel waar te kunnen nemen. Het blijkt dat neutrale B-mesonen een bijzondere eigenschap vertonen: ze kunnen tijdens hun levensduur via de zwakke wisselwerking overgaan van deeltje naar anti-deeltje en vice versa. De hiervoor verantwoordelijke diagrammen zijn weergegeven in figuur 3.

In het Standaardmodel blijkt dat, indien de massa van het up-, charm- en top-quark gelijk zouden zijn, deze processen destructief zouden interfereren en het nettoresultaat nul zou zijn: geen deeltje-antideeltjeovergangen. Dit uitdovingsmechanisme is vernoemd naar de bedenkers ervan, Glashow, Iliopoulos en Maiani (GIM) [5].

Echter, gezien de buitengewoon grote massa van het top quark zal de uitdoving maar beperkt effectief zijn en kunnen deze materie-antimaterie-oscillaties worden waargenomen. Het GIM-mechanisme voorspelt dat de oscillaties sneller plaatsvinden al naar gelang the top-quark zwaarder is. De experimentele waarneming van deze B-oscillaties [6] was daarmee een van de eerste aanwijzingen dat de massa van het top-quark vele malen groter was dan die van de andere quarks.

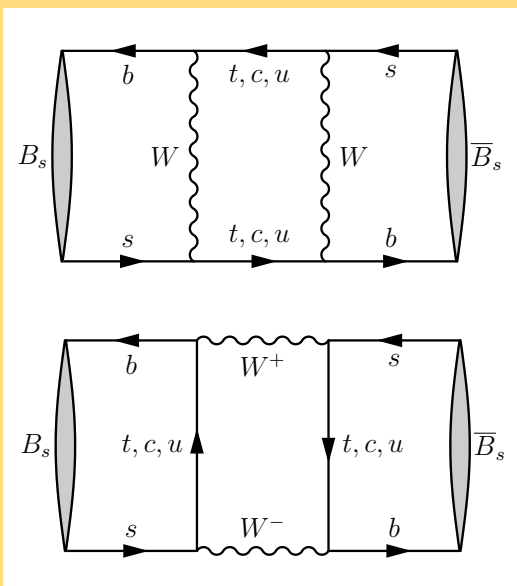
Een bijkomend gevolg van deze oscillaties is dat B-mesonen en anti-B-mesonen geen eenduidige levensduur en massa hebben maar dat er twee lineaire combinaties van B- en anti-B-mesonen bestaan – de fysieke deeltjes – die elk een meetbare levensduur en massa hebben [7]. Het verschil in massa en levensduur van deze twee deeltjes worden Δm en $\Delta \Gamma$ genoemd.

In figuur 4 is in het rood de tijdsverdeling te zien van een

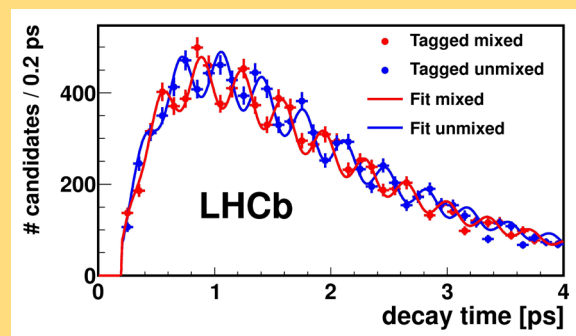
sample van B_s -mesonen dat verrijkt is in gevallen waarin ze als deeltje (antideeltje) geproduceerd zijn maar op het moment van verval geïdentificeerd zijn als hun antideeltje (deeltje). In het blauw is het sample dat verrijkt is in mesonen die op het moment van verval in dezelfde toestand zijn als bij hun productie. Het oscillatiepatroon is duidelijk zichtbaar en heeft een frequentie van 2,8 THz.

De meting van de oscillatiefrequentie bepaalt de grootte van de quantummechanische amplitude van het mixing-diagram. Echter, deze amplitude heeft ook een complexe fase, die precies voorspeld wordt door het Standaardmodel. Mochten er ook deeltjes van buiten het Standaardmodel een rol spelen bij deze overgang, dan is juist deze fase een gevoelig meetinstrument.

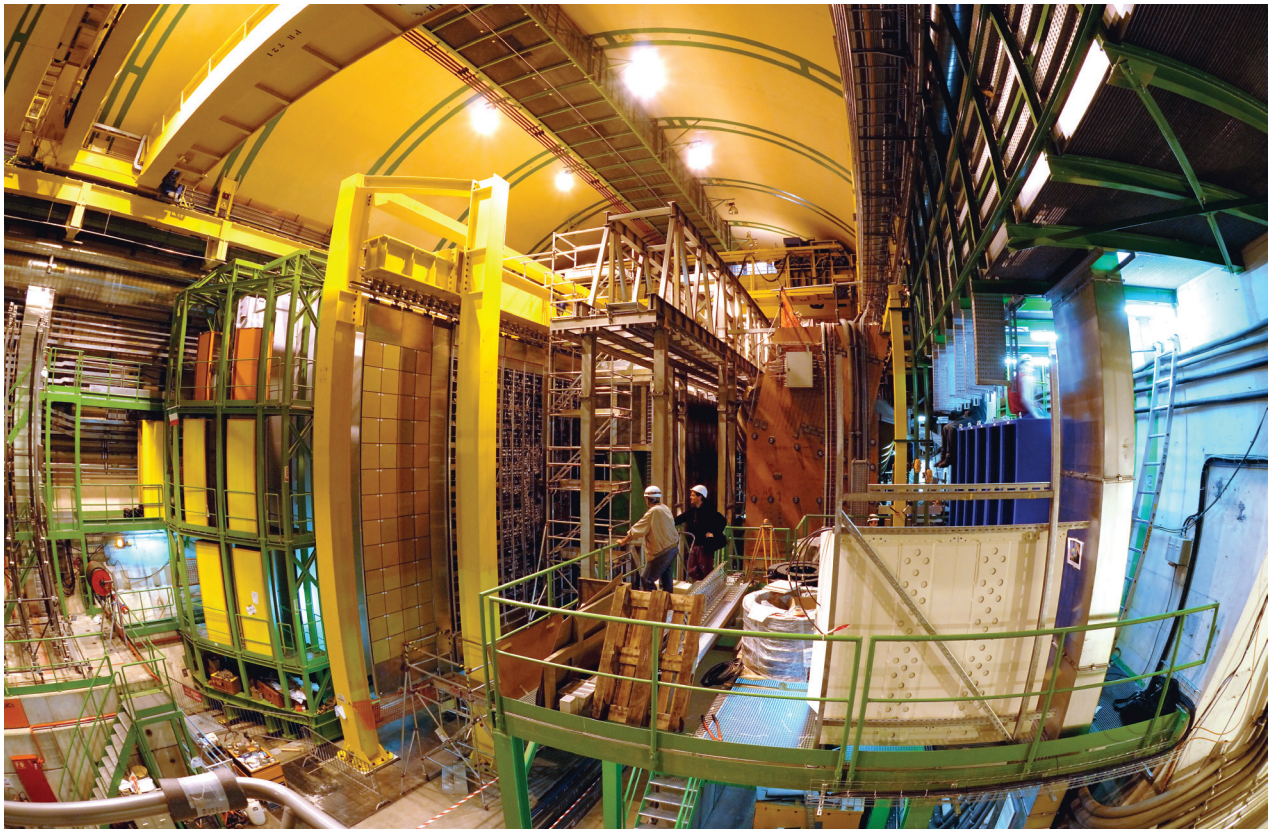
Om deze fase te meten wordt een interferentiemeting gedaan die overeenkomsten vertoont met het beroemde ‘twee spleten’-experiment met licht van Young in de negentiende eeuw. Door een eindtoestand te kiezen waarin zowel het B_s - als ook het anti- B_s -deeltje kunnen vervallen, zal er dankzij het oscillatieproces quantummechanische interferentie optreden tussen amplitudes met en zonder oscillatie. Het opmerkelijke is dat de fase van deze interferentie-amplitude een omgekeerd teken heeft al naar gelang de begin toestand een B_s -meson is of een anti- B_s -meson. De grootte van deze interferentie-amplitude is de maat van CP-schending en is evenredig met de complexe fase van het oscillatiediagram. Het resultaat van deze meting [8] is te zien in figuur 5, waar de gemeten fase ϕ_s weergegeven wordt, samen met het levensduur verschil $\Delta \Gamma_s$. Binnen de tot nu toe behaalde precisie is er geen afwijking te zien van de Standaardmodelvoorspelling.



Figuur 3 Twee vormen van het quantummechanische Feynmandiagram dat de overgang van een B_s -mesonen naar het anti- B_s -meson mogelijk maakt. Er is alleen een netto-overgang als de u-, c- en t-quarkmassa's onderling verschillen.



Figuur 4 De tijdsverdeling van B_s -mesonen die al (rood) dan niet (blauw) een netto-overgang van deeltje naar antideeltje hebben ondergaan. Naast het oscillatiegedrag wordt de vorm van de verdeling bepaald door het exponentiele verval van de instabiele B_s -deeltjes en de zuiverheid van het gegevensbestand.



De LHCb-detector. Foto: CERN.

nauwkeurig in kaart brengt: LHCb. In de proton-protonbotsingen van de LHC worden B-mesonen in zeer grote hoeveelheden geproduceerd. Bij ongeveer een op de honderd botsingen ontstaan er b-quarks, wat betekent dat er ongeveer 100.000 B-mesonen per seconde worden geproduceerd. Figuur 2 geeft een voorbeeld hoe het LHCb-experiment zo'n botsing reconstrueert.

Tijdens de LHC-meetseries van 2011 en 2012 zijn er in ongeveer 10^{11} B-mesonen geproduceerd in het experiment. Deze stortvloed aan gegevens en de vele vervalsmogelijkheden van B-mesonen maakt een veelzijdige zoekstrategie mogelijk. Enerzijds worden directe quarkovergangen, de zogenaamd *tree*-vervallen, in kaart gebracht en anderzijds overgangen die via een (virtuele) intermediaire toestand verlopen, de zogenaamd *loop*-vervallen. In het eerste geval zijn er alleen de bekende quarkinteracties in het spel, terwijl in het tweede geval eventueel een tussentoestand van onbekende (bijvoorbeeld supersymmetrische) deeltjes kan voorkomen.

Een zeer onderscheidende test van het Standaardmodel betreft het verval van een B_s -meson (een b-quark en een anti-s-quark) naar een J/ψ -meson en een ϕ -meson (een s-quark en een anti-s-

quark). Dit verval is het B_s -equivalent van het B_0 -verval waarbij voor het eerst CP-schending werd waargenomen bij BaBar en Belle. Echter, het CKM-mechanisme voorspelt dat de CP-schending zeer klein zal zijn. Dit maakt dit verval uitermate geschikt voor een directe test naar de aanwezigheid van andere bronnen van CP-schending: de observatie van een verschil tussen het Bs- en het anti-Bs-verval zou direct bewijs zijn dat er nieuwe fysica in het spel moet zijn. Het LHCb heeft 21.000 van dergelijke vervallen geanalyseerd en het resultaat is weergegeven in figuur 5. Met de huidige precisie is de meting in overeenstemming met het Standaardmodel.

Conclusie en vooruitblik

Als elk deeltje in de natuur door zijn anti-deeltje vervangen zou worden zou er in eerste instantie niet veel veranderen: de sterke kernkracht en het elektromagnetisme zouden identieke processen veroorzaken als in het huidige universum. Echter, we weten nu dat de zwakke wisselwerking verschillen zal veroorzaken. Dit stelt ons in staat om een absolute definitie te maken van wat een materiedeeltje en wat een anti-materiedeeltje is. De CP-schending die tot dusver is waargenomen is grotendeels in overeen-

stemming met het CKM-mechanisme. B-vervallen maken het mogelijk om effecten van nieuwe (bijvoorbeeld supersymmetrische) deeltjes te zien door de CP-schending in verschillende processen te vergelijken. Dit programma is in gang gezet in de eerste twee jaren van het LHCb-experiment en zal in de toekomst verder ontplooid worden. Het is hierbij interessant om op te merken dat de gevoeligheid van deze speurtocht naar nieuwe deeltjes bepaald wordt door de (statistische) precisie van de metingen en niet beperkt wordt door de bundelenergie van de LHC-versneller.

Referenties

- 1 N.Zurlo *et al.*, (ATHENA collab.), *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 153401.
- 2 J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch en R. Turley, *Phys. Rev. Lett.* **13**, (1964) 138.
- 3 M. Kobayashi en T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.* **49** Vol 2, 652 (1973).
- 4 B. Aubert *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 091801, K. Abe *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 091802.
- 5 S.L. Glashow, J. Iliopoulos en L. Maiani, *Phys. Rev. D* **2** (1970) 1285.
- 6 H. Albrecht *et al.*, *Phys. Lett. B* **192** (1987) 245.
- 7 M. Gell-Mann en A. Pais, *Phys. Rev. Lett.* **97** (1955) 1387.
- 8 LHCb collaboration, R. Aaij *et al.*, arXiv:1304.2600, Submitted to *Phys. Rev. D*.