

Alice in Wonderland en de gespiegelde mesonen

Natuurkundigen dachten altijd dat een deeltje en zijn spiegelbeeld zich hetzelfde gedragen. Zoals Alice in Wonderland al ondervond, is de wereld achter de spiegel echter niet dezelfde. Wereldwijd zijn natuurkundigen op zoek naar nieuwe eigenaardigheden achter de spiegel, die misschien wel de nekslag betekenen voor de huidige theorie over elementaire deeltjes.

**Bram van den Broek,
Max Baak en
Levien van Zon**

Bram van den Broek en Max Baak zijn vijfdejaars studenten Natuur- en Sterrenkunde aan de Vrije Universiteit Amsterdam. Levien van Zon is vijfdejaars Milieu-Natuurwetenschappen aan dezelfde universiteit.

In Amerika, Japan en Duitsland schieten natuurkundigen deeltjes en antideeltjes op elkaar in krachtige versnellers. Ondertussen wordt hard gewerkt aan experimenten met nóg grotere machines, zoals de Large Hadron Collider (LHC) in Genève. En dit alles voor het meten van iets ogenschijnlijk onbenulligs: minieme variaties in de vervaltijd van een deeltje, het zogenaamde B-meson. Toch zijn die wellicht de sleutel tot een van de grootste raadsels van de natuurkunde.

Waarom zien we geen antimaterie in het heelal? Sterren, planeten en nevels: ze bestaan alle uit normale materie. "Dat is vreemd", aldus prof dr ing Jo van den Brand, directeur van de afdeling Subatomaire Fysica aan de Vrije Universiteit in Amsterdam, "want voor zover we verwachten, zijn bij de Oerknal gelijke hoeveelheden materie en antimaterie ontstaan. Intuïtief vermoed je dat materie en antimaterie volkomen gelijkwaardig zijn, alleen hun eigenschappen zoals lading zijn precies tegengesteld. Maar om het heelal zoals we dat nu zien te verklaren, moet zo'n tien microseconden na de oerknal een voorkeur voor materie zijn ontstaan. Vrijwel alle deeltjes en antideeltjes zijn met elkaar een reactie aangegaan en omgezet

in straling. Slechts een klein beetje materie bleef over. Aan de hoeveelheid straling die we zien, weten we dat slechts één op de miljard deeltjes de slachting heeft overleefd, dus de verdeling hoeft maar lichtelijk uit balans te zijn."

Niemand weet precies de oorzaak van deze asymmetrie, maar de natuurkundigen hebben wel een vermoeden. In 1967 wees de Russische theoreticus (en dissident) Andrei Sacharov op de voorwaarden die nodig zijn om in het jonge universum een voorkeur voor materie te doen ontstaan. De belangrijkste daarvan is, dat deeltjes en antideeltjes zich niet precies hetzelfde gedragen. Doen ze dat wel, dan kan er immers nooit een overschot van deeltjes ontstaan. Het verschijnsel dat ze zich verschillend gedragen, heet 'CP-schending'. Als ze verschillen in gedrag vertonen, kunnen ze met een verschillend tempo vervallen zodat een van beiden uiteindelijk de overhand krijgt.

Gebroken spiegels

Het begrip CP-schending heeft alles met symmetrieën te maken. Symmetrie is een van de meest krachtige begrippen in de moderne natuurkunde, omdat het tot een wiskundig elegante beschrijving van het gedrag van materie leidt. Een



symmetrie van een systeem van deeltjes betekent zoveel als: iets doen met het systeem zonder dat zijn gedrag verandert. Zo zijn de natuurwetten symmetrisch in plaats en tijd.

Een fundamenteel gegeven is dat een symmetrie altijd leidt tot een behoudswet. Zo volgt de wet van behoud van energie uit het feit dat de natuurwetten niet in de tijd veranderen – ofwel tijdsymmetrisch zijn. Evenzo hangen de resultaten van een experiment niet af van de plaats waar het wordt uitgevoerd. Deze plaats-symmetrie leidt tot de wet van behoud van impuls.

“Er zijn ook meer abstracte symmetrieën,” gaat Van den Brand verder. “Stel dat in het hele universum alle deeltjes worden omgewisseld met hun antideeltjes, een zogenaamde C-transformatie (de C is van charge, lading, omdat deeltjes en antideeltjes een tegengestelde lading hebben). Zou je het verschil zien?

Of wat als we, zoals Alice in Wonderland, door de spiegel stappen en een wereld binnengaan waarin alle ruimtecoördinaten zijn gespiegeld? Technisch heet dit een P-transformatie (de ‘P’ is van pariteit). Men ging er vroeger vanuit dat deze ‘gespiegelde’ werelden zich exact hetzelfde gedragen als onze gewone wereld. Dat houdt in dat C en P fundamentele natuursymmetrieën zijn, zoals verandering in plaats en tijd.”

Alice kwam er al snel achter dat de wereld achter de spiegel niet hetzelfde was. Zo ook toonden experimenten van eind jaren vijftig aan dat in de zwakke wisselwerking, een van de vier fundamentele natuurkrachten, de beide symmetrieën C en P geschonden zijn. “In de natuur vinden we linksomdraaiende neutrino’s, deeltjes die in grote hoeveelheden door de zon worden geproduceerd. Als je een C-transformatie zou toepassen op zo’n deeltje, krijg je een

Alice

Zoals een deeltje en zijn antideeltje, gedragen ook Tweedledee en Tweedledum, die Alice in haar avonturen ontmoet, zich niet exact hetzelfde.

linksomdraaiend anti-neutrino. Maar deze deeltjes komen in de natuur nergens voor. Hetzelfde geldt voor de pariteitsomkeer: het neutrino in de spiegel is een rechtsomdraaiend neutrino, maar dat komt in onze gewone wereld niet voor. Net als een vampier heeft het neutrino geen reflectie in de spiegel.”

Je kunt echter ook beide spiegelingen tegelijk op een neutrino toepassen. Zo’n dubbelspiegeling (een CP-transformatie) levert je een deeltje dat wél bestaat: het rechtsomdraaiende anti-neutrino. Hoewel een afzonderlijke C- of P-spiegeling leidt tot een niet-bestaand deeltje, levert de gecombineerde CP-spiege-

Spiegeling levert niet-bestaand deeltje

ling een bestaand deeltje. Anders gezegd: C en P afzonderlijk zijn geen symmetrieën van de natuur, maar het lijkt erop dat CP dat wel is.

Deeltjesfysici waren er jarenlang van overtuigd dat CP-symmetrie een echte natuursymmetrie was. Ze waren dan ook compleet verbijsterd toen James Cronin en Val Fitch in 1964 een CP-schending waarnamen. Dit tweetal experimenteerde met weer een ander soort deeltjes: de zogeheten neutrale kaonen. Die zijn opgebouwd uit twee quarks. Quarks zijn deeltjes waaruit bijvoorbeeld ook de protonen en neutronen van de atoomkern zijn opgebouwd. Er zijn er zes van, met hun antideeltjes. Onze kaonen bestaan uit een downquark en het antideeltje van de strangequark (de 'anti-strange'). Ook de kaonen hebben antideeltjes, opgebouwd uit een anti-downquark en een strangequark. Je ziet: het antideeltje van een antideeltje is het deeltje zelf.

Het vreemde is dat we in de natuur niet de neutrale kaonen en hun antideeltjes waarnemen, maar een soort van kwantummechanische mengvorm daarvan. Het zijn er twee, aangeduid als de kortlevende en de langlevende kaonen. De eerste vallen na gemiddeld 9×10^{-11} seconde uiteen in twee pionen. De langlevende houden het gemiddeld ruim vijfhonderd keer zo lang uit, en kunnen dan op diverse manieren uiteenvallen. Als echter deze vervalsprocessen CP-symmetrisch zouden zijn, dan valt aan te tonen dat de langlevende kaonen nooit in twee pionen kunnen vervallen. Toch is dat precies wat Cronin en Fitch sporadisch zagen. "Die waarneming kun je alleen verklaren door aan te

nemen dat zowel de kortlevende als de langlevende kaonen 0,3% meer van het deeltje bevatten dan van het antideeltje. Dat duidt op een lichte voorkeur voor materie boven antimaterie, terwijl CP-symmetrie een exact gelijke verhouding zou inhouden. CP-symmetrie is dus geschonden, al is het minimaal", aldus Van den Brand. Cronin en Fitch hielden er in 1980 de Nobelprijs voor de natuurkunde aan over.

Barsten in het standaardmodel

Onze kennis over de fundamentele deeltjes en hun wisselwerkingen is samengevat in het zogenaamde standaardmodel. Deze theorie beschrijft alle waargenomen subatomaire deeltjes en hun interacties in termen van enkele fundamentele bouwstenen. In de afgelopen dertig jaar is het standaardmodel nauwelijks gewijzigd, maar om het overwicht aan materie in het heelal te verklaren, moet het wellicht op de helling.

Het standaardmodel staat een beetje CP-schending toe in het gedeelte dat de zwakke wisselwerking tussen de quarks beschrijft, maar geeft hiervoor geen verklaring. Je kunt daaruit voorspellen hoeveel materie bij het ontstaan van het heelal is overgebleven als gevolg van de asymmetrie. "Maar dit blijkt niet genoeg om de waarnemingen te verklaren", legt Van den Brand uit. "Het model voorspelt vele malen minder materie dan we zien. Dat suggereert dat er andere manieren zijn waarop de natuur zich niet aan de CP-symmetrie houdt, met andere woorden: dat het standaardmodel incompleet is."

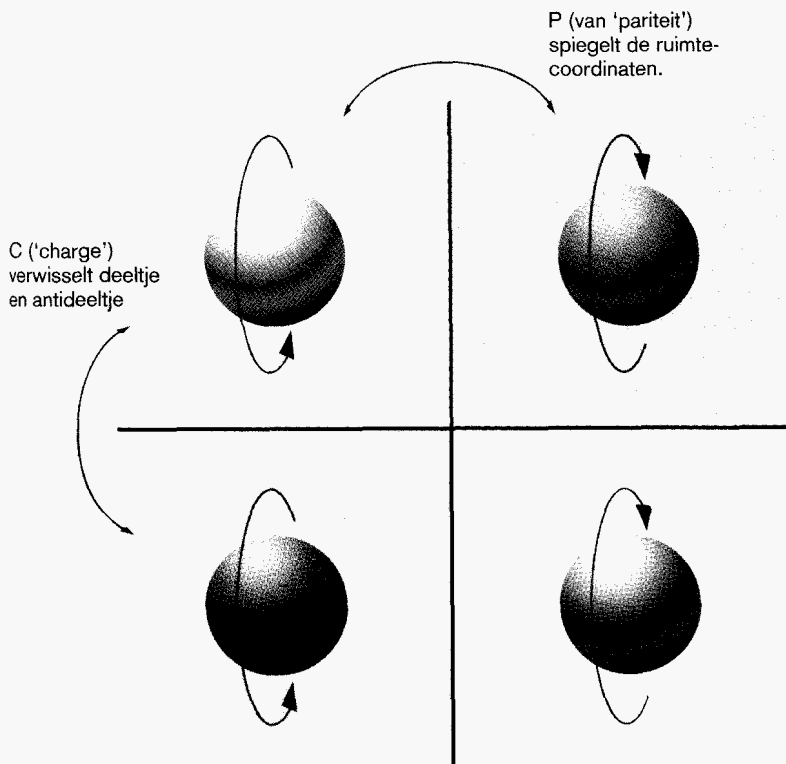
Natuurkundigen hebben diverse pogingen ondernomen om het model uit te breiden. Elke poging bevat nieuwe vormen van CP-schending. Voorbeelden

van zulke uitbreidingen zijn de invoering van een vierde groep quarks of van een nieuwe fundamentele natuurkracht, de zogenaamde superzwakke wisselwerking. Een andere mogelijkheid is de introductie van extra Higgsdeeltjes, of van zogenaamde supersymmetrieën waarbij alle deeltjes 'superpartners' hebben, zoals bijvoorbeeld 's-quarks' of 's-leptonen'.

Experimenten moeten orde brengen in het woud van deze exotische verzinsels. Een vruchtbare plaats om nieuwe vormen van CP-schending te zoeken, is bij de familie van het kaon. In 1980 werd het B-meson ontdekt, de grote broer van het kaon, en zoals dat vaker het geval is bij broers, vertonen die in vele opzichten dezelfde eigenschappen. Het B-meson bevat in plaats van het strange-quark het veel zwaardere bottom-quark. Hierdoor kan grote broer op veel meer manieren vervallen. Natuurkundigen verwachten dan ook dat het een veel grotere CP-schending laat zien. Daarnaast hopen de fysici dat de verschillende manieren van vervallen CP-schending vertonen op andere plaatsen dan alleen de zwakke wisselwerking. "B-mesonen zijn de deeltjes waarop ik heb ingezet", verklaart Van den Brand. "Ze zijn het subatomair equivalent van een Zwitsers zakmes. Hiermee vergeleken zijn kaonen een bot aardappelschilmesje."

B-fabrieken

Om te kunnen experimenteren heb je natuurlijk wel B-mesonen nodig. De race om deze deeltjes te maken is wereldwijd in volle gang. "De concurrentie is moordend", aldus Van den Brand. "Iedereen wil als eerste de CP-prijs in de



Spiegels

Linksboven het linksomdraaiende neutrino. Een spiegeling P tovert het om in een rechtsomdraaiend neutrino (rechtsboven). Een C-transformatie levert een linksomdraaiend anti-neutrino (linksonder). Geen van beide bestaan. Slechts de gecombineerde CP-transformatie levert een bestaand deeltje: het rechtsomdraaiende anti-neutrino.

wacht slepen.” Over de te volgen strategie bestaan echter meerdere ideeën. Natuurkundigen bij SLAC in Californië en KEK in het Japanse Tsukubo schieten met deeltjesversnellers elektronen en positronen (dat zijn de antideeltjes van elektronen) op elkaar. De versnellers zijn ware B-fabrieken, die miljoenen B-mesonen per jaar produceren, voldoende om CP-schending te bestuderen in het zogenaamde ‘gouden vervalskanaal’. Het gouden vervalskanaal is een van de manieren waarop het B-meson uiteenvalt, namelijk in een kortlevend kaon en een makkelijk waarneembaar deeltje dat ‘J/psi’ heet. In plaats van de schamele onbalans van 0,3%, helt de weegschaal hier maar liefst 10% over naar de materiezijde. Binnenkort hopen de experimentatoren de eerste resultaten te oogsten.

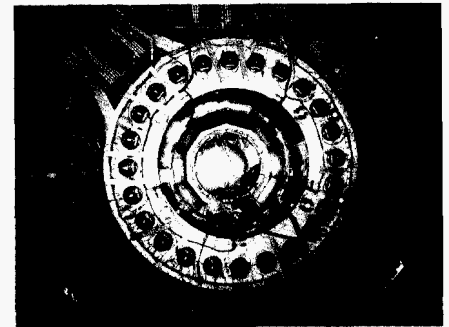
“De versnellers bij SLAC en KEK verschaffen zeker nieuwe inzichten, maar om een volledig beeld van de CP-schending te krijgen, zul je alle manieren waarop het B-meson vervalft, moeten uitpluizen,” zegt Van den Brand. “Daarvoor heb je andere machines nodig, machines die nóg meer B-mesonen maken. Fermilab in Chicago en CERN in Genève bouwen daarom nieuwe deel-

tjesbotsers, die in 2005 moeten worden opgeleverd.”

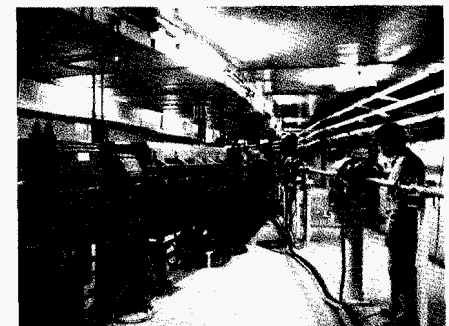
De groep van Van den Brand werkt mee aan het LHCb-project van CERN. LHCb staat voor Large Hadron Collider beauty, waarbij ‘beauty’ de meer prozaïsche naam is voor het nuchtere ‘bottom’. De LHC schiet protonen met vrijwel de lichtsnelheid tegen elkaar, en produceert daarbij miljarden B-mesonen per jaar. “Hoeveelheden die de andere versnellers in het stof doen bijten”, zegt Van den Brand. De hoop is dat deze experimenten de weg wijzen naar een sterkere bron van CP-schending die in het vroege universum aan het werk is geweest. Van den Brand: “Het zou kunnen dat het experiment het standaardmodel slechts bevestigt, maar ik hoop toch dat er meer uitkomt.”

B-fabrieken

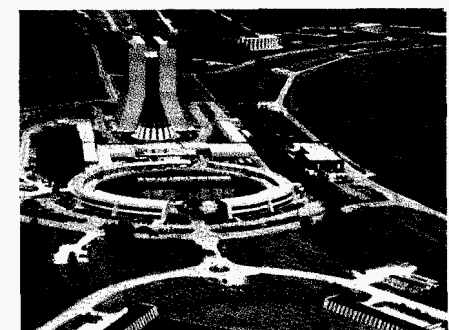
De versnellers die in de race zijn om verval van B-mesonen te meten: SLAC in Californië en KEK in het Japanse Tsukubo. Fermilab in Chicago en CERN in Genève bouwen momenteel nog grotere versnellers om het verval precies te kunnen uitpluizen.



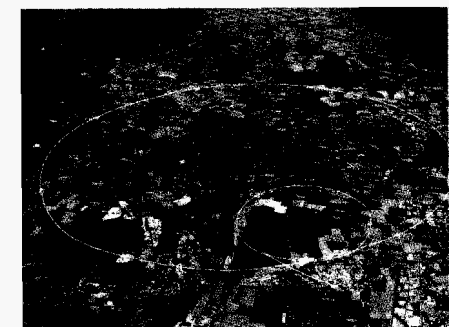
SLAC



KEK



Fermilab



CERN