

VU Research Portal

Ageing and the Decay of Beauty

van Eijk, D.

2012

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

van Eijk, D. (2012). *Ageing and the Decay of Beauty: Radiation Hardness of the LHCb Outer Tracker and Time-Dependent CP Violation using Bos $\rightarrow J/\psi$ Decays*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Nederlandse Samenvatting

Veroudering en het Verval van Schoonheid Stralingshardheid van de LHCb Outer Tracker en Tijdsafhankelijke CP-Schending in Vervallen van het Type $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$

Dit proefschrift markeert het einde van mijn promotie. Gedurende de vier jaar van mijn onderzoek hebben veel mensen me gevraagd naar mijn werk als deeltjesfysicus. Tot mijn verbazing waren dat vooral mensen van buiten het vakgebied. Ik denk dat hun interesse voortkomt uit vragen die iedereen zichzelf wel eens stelt, zoals 'waar bestaat materie uit?' en 'hoe is ons universum ontstaan en hoe zal het eindigen?'. Dit soort vragen vormen de motivatie voor fundamenteel natuurkundig onderzoek. Mijn hoop is dat al die mensen met wie ik de afgelopen vier jaar heb gesproken in ieder geval delen van dit proefschrift kunnen lezen en begrijpen. Daarom zal ik nu eerst beginnen met een algemene introductie over deeltjesfysica, om uiteindelijk mijn eigen onderzoek te kunnen uitleggen. Daarna zal ik de resultaten van mijn onderzoek samenvatten, waarbij ik de titel van mijn proefschrift als leidraad neem: ik begin met tijdsafhankelijke CP-schending in vervallen van het type $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ (uitspraak: *bee es naar jee psie fie*) en eindig met de stralingshardheid van de LHCb Outer Tracker.

Deeltjesfysica en de LHC

De LHC is een deeltjesversneller die protonen versnelt en laat botsen in een cirkelvormige tunnelbuis van 27 kilometer lang en die zich 100 meter onder de grond bevindt. De protonen botsen miljoenen keren per seconde op vier verschillende locaties langs de omtrek van de versneller. Op die locaties zijn grote deeltjesdetectoren gebouwd rondom het botsingspunt om de botsingen of zogenoemde *events* te detecteren. Informatie over de passage van deeltjes door de verschillende subdetectoren van zo'n experiment wordt opgeslagen op computers, zodat de botsingen later met speciale software gereconstrueerd en geanalyseerd kunnen worden. In de begindagen van de deeltjesfysica daarentegen werd de informatie over dit soort botsingen opgeslagen door simpelweg een foto te nemen, zoals te zien is in Figuur S.1 in de Engelstalige samenvatting (bijschriften derhalve in het Engels).

Ik heb mijn onderzoek uitgevoerd bij het LHCb-experiment, één van de vier grote experimenten van de LHC. LHCb is een experiment dat zich richt op B -fysica, vandaar de toevoeging 'b'. Bij dit soort experimenten worden de eigenschappen van zogeheten B -mesonen bestudeerd. Om te begrijpen wat dit voor deeltjes zijn en wat voor eigenschappen

ze hebben is het belangrijk om eerst te kijken naar het zogenoemde Standaardmodel van de deeltjesfysica.

Het Standaardmodel

Het Standaardmodel beschrijft onze huidige kennis van de elementaire deeltjes en hun onderlinge interacties. Er zijn meerdere manieren om over dit model na te denken. In principe is het een wiskundige formule, maar je zou het ook kunnen beschouwen als de verzameling van alle fundamentele bouwstenen van de natuur, zoals te zien is in Figuur S.2.

Het Standaardmodel is een theorie die zeer nauwkeurige en juiste voorspellingen doet voor vele metingen die de afgelopen decennia zijn uitgevoerd. Maar er zijn ook verscheidene problemen met dit model. Eén van deze problemen is eigenlijk de 'raison d'être' voor de LHC en is vrij goed bekend bij het algemene publiek: het vinden van het Higgsdeeltje. Ondanks dat ik tijdens mijn promotie zelf niet heb meegewerkt aan deze zoektocht, is het werk dat ik heb gedaan aan CP-assymetrieën gerelateerd aan het Higgsdeeltje. Dit komt doordat de zogenoemde Yukawa-termen in het Standaardmodel, die de koppelingen tussen het Higgsveld en de fermionen beschrijven om massa te genereren, juist die termen zijn die CP-assymetrieën kunnen genereren, zoals wordt uitgelegd in Hoofdstuk 1. Ik besteed hier enige aandacht aan de zoektocht naar de Higgs, omdat deze puzzel zeer recent lijkt te zijn opgelost.

Het Higgsdeeltje

Het Higgsdeeltje werd voorspeld in 1964 door onder andere Peter Higgs en is een noodzakelijk onderdeel van het Standaardmodel, omdat het massa genereert voor alle andere fundamentele deeltjes. Er wordt naar gezocht in de ATLAS- en de CMS-detector, twee andere van de vier grote experimenten bij de LHC. Zeer recent, op 4 juli 2012, hebben deze twee onderzoekscollaboraties de ontdekking aangekondigd van een nieuw boson dat in overeenstemming lijkt te zijn met een Higgsboson zoals wordt verwacht in het Standaardmodel. Deze bijzondere vondst werd bekend gemaakt in een wereldwijd uitgezonden persconferentie die werd gehouden op CERN in het bijzijn van Peter Higgs zelf. Het doel van de metingen was niet alleen om het Higgsdeeltje te vinden, maar ook om de massa ervan te bepalen. De ATLAS-collaboratie heeft een massa gemeten van $126.0 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$ [78], en de CMS-collaboratie heeft in een onafhankelijke meting een massa van $125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$ gevonden [79]. In de komende jaren zullen de eigenschappen van dit nieuwe fundamentele deeltje bestudeert worden om het Standaardmodel verder te testen. Wat de resultaten van deze studies ook zullen zijn, met de ontdekking van dit nieuwe boson lijkt een einde gekomen te zijn aan een langlopende zoektocht binnen het Standaardmodel en in de deeltjesfysica in het algemeen.

Fundamentele Krachten in het Standaardmodel

Zoals gezegd beschrijft het Standaardmodel alle elementaire deeltjes en hun interacties. In de natuur komen vier fundamentele krachten voor. Zo'n fundamentele kracht laat zich gelden door de interactie van een deeltje met één van de zogeheten krachtdragers (Z , W , g en γ in Figuur S.2). Van deze vier fundamentele krachten zijn er twee die in het alledaagse leven

voelbaar zijn: de zwaartekracht en de elektromagnetische kracht (bijvoorbeeld elektriciteit). De twee overgebleven natuurkrachten zijn de zogeheten zwakke kernkracht en de sterke kernkracht. Deze twee zijn niet direct voelbaar voor ons, omdat deze krachten zich alleen op zeer kleine (subatomaire) schaal doen gelden. De zwakke kernkracht is betrokken bij veel radioactieve vervalLEN en de sterke kernkracht werkt als de spreekwoordelijke lijm die quarks bij elkaar houdt om protonen of andere gebondenquarktoestanden, zogenaamde hadronen, te vormen. Het Standaardmodel verenigt de sterke en zwakke kernkracht en de elektromagnetische kracht, respectievelijk door middel van gluondeeltjes (g), Z - en W -deeltjes en fotonen (γ -deeltjes). Het is tot nu toe echter onmogelijk gebleken om ook de zwaartekracht in te lijven in het Standaardmodel.

De Inhoud van ons Universum

Naast de al beschreven problemen is er nog een andere opvallende puzzel in de deeltjesfysica, die volgt uit kosmologische observaties en te maken heeft met de inhoud van ons universum. Bij het bestuderen van baansnelheden van sterren in de buitenste regionen van melkwegstelsels, verwacht men op grond van de wetten van Newton dat deze omgekeerd evenredig afneemt met de wortel van de afstand tot het centrum van het melkwegstelsel. Observaties laten echter zien [80] dat deze snelheid nagenoeg constant blijft als een functie van de afstand tot het centrum, zoals geschetst in Figuur S.3. De beste verklaring tot nu toe is dat er naast de normale, zichtbare materie zoals in sterren (met materie wordt een substantie bedoeld die onderhevig is aan de zwaartekracht) een bepaalde vorm van onzichtbare materie bestaat. Uit de eerdergenoemde observaties van baansnelheden kan worden afgeleid dat de fractie van bekende zichtbare materie ten opzichte van onbekende zogeheten donkere materie ongeveer één op vijf is. Het Standaardmodel beschrijft geen deeltjes die deze donkere materie kunnen verklaren, en derhalve verklaart het Standaardmodel slechts 20% van alle materie in ons universum.

Nieuwe Fysica

Teneinde de beschreven problemen van het Standaardmodel op te lossen, hebben theoretisch fysici nieuwe wiskundige modellen opgesteld die het Standaardmodel omvatten en uitbreiden. Deze zogeheten Nieuwe Fysicamodellen voorspellen nieuwe soorten deeltjes en interacties, waarbij de nieuwe deeltjes bijvoorbeeld kandidaat zouden kunnen zijn voor donkere materie. De experimenten bij de LHC vormen voor wetenschappers een unieke omgeving waar naar deze nieuwe deeltjes en interacties gezocht kan worden. Deze zoektochten worden grofweg op twee manieren uitgevoerd: direct en indirect. Bij de ATLAS- en de CMS-detector wordt direct naar de hypothetische deeltjes gezocht in de vervalproducten van de proton-protonbotsingen. Bij LHCb daarentegen wordt indirect naar Nieuwe Fysica gezocht door parameters te meten die worden beïnvloed als nieuwe deeltjes zouden bijdragen aan bepaalde processen. Als een significante afwijking wordt gemeten ten opzichte van de voorspelling zoals gedaan door het Standaardmodel, zou dat een aanwijzing zijn voor Nieuwe Fysica. Het onderwerp van mijn proefschrift is de meting van zo'n soort parameter die symbolisch wordt weergegeven door ϕ_s . Om uit te leggen wat deze parameter precies voorstelt, is nog een ander ingrediënt nodig: antimaterie.

Antimaterie

Het schematische plaatje van het Standaardmodel, zoals weergegeven in Figuur S.2, is eigenlijk incompleet. In 1928 voorspelde de natuurkundige Paul Dirac namelijk op wiskundige gronden dat er zo iets als antimaterie moest bestaan. Dit betekende dat elk deeltje in het Standaardmodel een antideeltje als partner zou hebben. In Figuur S.4 staan bijvoorbeeld de quarks aangeduid met hun bijbehorende antideeltjes of antiquarks. Met de ontdekking van het positron in 1932 kreeg Dirac zijn gelijk. Een positron is het antideeltje van het welbekende negatief geladen elektron, en draagt daarom een positieve lading. De foto in Figuur S.1 laat het eerste positron zien dat ooit is waargenomen. De identiteit van het deeltje werd afgeleid uit de richting van de kromming van de baan in een magnetisch veld, aangezien die tegengesteld was aan de richting die werd verwacht voor een elektron, zoals aangegeven in de foto. Als een materiedeeltje en een antimateriedeeltje elkaar tegenkomen, zullen ze elkaar in een flits 'vernietigen' of annihileren. Dat doen ze letterlijk, omdat bij dit proces een foton (een lichtdeeltje) wordt uitgezonden. In het laatste deel van deze introductie op mijn onderzoek, zal ik uitleggen wat B -mesonen precies zijn, wat CP-schending betekent en hoe dit gerelateerd is aan de parameter ϕ_s .

B -mesonen, CP-schending en ϕ_s

Mesonen zijn quasi-stabiele deeltjes die bestaan uit twee quarks. B -mesonen zijn mesonen waarvan één quark een b -quark of een \bar{b} -quark (zo wordt een anti- b aangegeven) is. Deze b -quarks hebben als bijnaam 'schoonheidsquarks', naar de 'b' van *beauty*. Evenzo worden B -mesonen ook wel 'schoonheidsmesonen' genoemd. En daarmee zijn we aangekomen bij de titel van mijn proefschrift, omdat ik het verval van een schoonheidsmeson heb bestudeerd. De precieze inhoud van een B_s^0 -meson is $(\bar{b}s)$ en de vervalproducten in vervallen van het type $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ zijn het J/ψ meson ($c\bar{c}$) en het ϕ meson ($s\bar{s}$).

Het laatste ingrediënt dat nodig is om uit te leggen wat de parameter ϕ_s nou precies betekent, is een eigenschap van B -mesonen die menging wordt genoemd: B -mesonen oscilleren heen en terug naar hun eigen antideeltje, een proces dat razendsnel verloopt, ongeveer 18 biljoen keer per seconde. Bij een botsing tussen twee protonen in LHCb, worden in principe evenveel B_s^0 -mesonen als \bar{B}_s^0 -mesonen geproduceerd. Als gevolg van menging zal het verval naar de vervalproducten J/ψ en ϕ plaatsvinden op een moment waarop het zogenoemde moederdeeltje ofwel een B_s^0 -meson, of een \bar{B}_s^0 -meson, of zelfs een kwantummechanische superpositie van de twee is.

Afhankelijk van de vervaltijd van het B -meson kan er een verschil zijn in de vervalsnelheid tussen vervallen waarbij het oorspronkelijk geproduceerde deeltje een B_s^0 -meson en een \bar{B}_s^0 -meson was. Dit effect heet tijdsafhankelijke CP-schending¹ en wordt geïllustreerd in Figuur S.5. De parameter ϕ_s is een maat voor de hoeveelheid tijdsafhankelijke CP-schending in vervallen van het type $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$. In het Standaardmodel is de voorspelling dat de waarde van ϕ_s zeer klein is, terwijl sommige Nieuwe Fysicamodellen een aanzienlijk hogere waarde voorspellen. Elke significante afwijking van de voorspelling van het Standaardmodel in de gemeten waarde van ϕ_s kan daarom een aanwijzing zijn voor Nieuwe Fysica. In de

¹De 'C' en de 'P' in CP-schending staan respectievelijk voor lading (*charge*) en pariteit (*parity*). Voor meer informatie, zie Hoofdstuk 1.

volgende alinea zal ik mijn meting van ϕ_s presenteren.

Het Verval van Schoonheid: Tijdsafhankelijke CP-Schending in Vervallen van het Type $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$

Het Standaardmodel voorspelt dat $\phi_s = -0.036 \pm 0.002$ [17]. Elke significante afwijking van dit getal is een aanwijzing voor Nieuwe Fysica. De waarde die ik gemeten heb is $\phi_s = 0.00 \pm 0.10$ (stat.) ± 0.02 (syst.), wat binnen de foutenmarge in overeenstemming is met de voorspelling van het Standaardmodel. Het resultaat van de analyse die ik heb uitgevoerd kan ook gepresenteerd worden en vergeleken met eerdere experimenten door contouren te tekenen in het $(\phi_s, \Delta\Gamma_s)$ -vlak, waar $\Delta\Gamma_s$ het verschil in levensduur is tussen twee typen B_s^0 -mesonen. Dit staat aangegeven in Figuur S.6. De breedte van de contouren zegt iets over de precisie van de meting en dit figuur laat daarom zien dat de meting in dit proefschrift op dit moment de meest precieze is.

Ondanks dat de gemeten waarde van ϕ_s op dit moment in overeenstemming is met het Standaardmodel, is het belangrijk om deze meting te verfijnen. Dat kan door meer data toe te voegen en meerdere vervalkanalen te bestuderen die gevoelig zijn voor deze parameter. Op deze manier wordt de onzekerheid van de meting verkleind en kunnen mogelijke afwijkingen van het Standaardmodel geobserveerd worden. Ik zal nu het tweede deel van mijn onderzoek bespreken, waarin ik me heb bezig gehouden met de stralingshardheid van de LHCb Outer Tracker.

Veroudering: Stralingshardheid van de LHCb Outer Tracker

De Outer Tracker (OT) is één van de subdetectoren van het LHCb-experiment en wordt gebruikt om de sporen van geladen deeltjes door de detector te reconstrueren die ontstaan bij de proton-protonbotsingen. Om passerende deeltjes te detecteren, gebruikt de OT rietjes gevuld met een ionisatiegas die als cathode dienen met een centrale anodedraad. De OT bestaat uit drie detectiestations, waarbij elk station weer uit vier detectielagen bestaat. Verder heeft de OT een modulair ontwerp, wat betekent dat de OT is opgebouwd uit 432 modules met 128 rietjes, ofwel zo'n 55000 rietjes in totaal. Een module wordt gebouwd door de rietjes aan de modulepanelen te lijmen.

Na de constructie en voor het installeren van de modules in het LHCb-experiment bleek uit laboratoriumproeven [30] dat de prestatie van bepaalde modules achteruit ging als gevolg van uithardingsgassen afkomstig van de lijm die gebruikt werd bij de moduleconstructie. In de context van deeltjesdetectortechnologie wordt de vermindering van detectorprestaties, bijvoorbeeld door uithardingsgassen, ook wel veroudering genoemd.

Na installatie in het LHCb-experiment zijn de modules onderworpen aan verscheidene behandelingen om veroudering te verminderen of tegen te gaan [41, 30, 42]. Mijn proefschrift vat de resultaten samen van testen die zijn uitgevoerd om de prestaties van de OT-modules na installatie in het LHCb-experiment te controleren. Deze testen werden uitgevoerd door modules opzettelijk te bestralen en te scannen met een opstelling die aan de voorkant van de

modules kan worden geplaatst. Voordat er een zuurstofcomponent aan het ionisatiegas was toegevoegd lieten enkele modules ernstige stralingsschade zien. Dit effect werd zelfs geobserveerd na relatief kleine ontvangen doses, hoewel er ook sterke variaties tussen verschillende modules voorkwamen. Na de toevoeging van O_2 aan het ionisatiegas was er slechts kleine of helemaal geen stralingsschade.

Om het gedrag van OT-modules te blijven controleren na het starten van de LHC in 2009, zijn twee methoden verzonden. De eerste methode gebruikt dezelfde scanopstelling die hierboven is beschreven om regelmatig referentiescans te maken van een aantal modules. Deze scans worden handmatig uitgevoerd bij het LHCb-experiment en kunnen daarom alleen gedaan worden tijdens technisch onderhoud aan de LHC als er geen botsingen plaatsvinden. De tweede methode gebruikt de sporen van geladen deeltjes die geproduceerd worden bij de LHC-botsingen door de treffingsefficiëntie te bestuderen als een functie van de versterkingsdrempel van de electronica van de OT. Deze zogeheten drempelscans worden uitgevoerd als de LHC operationeel is en botsingen maakt in de LHCb-detector.

Ik heb beide methodes om de prestaties van OT-modules te controleren toegepast in mijn onderzoek. In mijn proefschrift concludeer ik dat geen van beide methodes significante stralingsschade aan de OT hebben kunnen aantonen. Beide methodes zullen echter regelmatig worden herhaald om de stralingshardheid van de OT te controleren.