

# VU Research Portal

## Measuring asymmetry in strange beauty

Govorkova, E.

2020

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

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

### **citation for published version (APA)**

Govorkova, E. (2020). *Measuring asymmetry in strange beauty*. [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](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# Samenvatting

## WAT?

Deze dissertatie is toegewijd aan de meting van de CP-schendende fase  $\phi_s$  die voortkomt uit  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  en  $\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  vervallen. Dit klinkt ingewikkeld, dus laten we eerst beginnen met een kort overzicht van het universum en wat we er over weten. Alles wat we om ons heen zien bestaat uit verscheidene types van fundamentele deeltjes met verschillende massa's en ladingen. Zij gaan interacties met elkaar aan door middel van fundamentele krachten. Onder de C-transformatie ('charge', *i.e.* lading) converteert elk deeltje in een geassocieerd anti-deeltje dat dezelfde massa, maar tegenovergestelde lading heeft. De P-transformatie (pariteit) inverteert alle ruimtecoördinaten en daarom keert ook de richting van de impuls van het deeltje om. Wanneer we in een speciale spiegel kijken die zowel de C- als P-transformatie toepast, zou de reflectie in zo een spiegel er een beetje anders uitzien dan het origineel. Dit wordt CP-schending genoemd.

Fundamentele deeltjes kunnen aan elkaar binden om andere deeltjes te vormen zoals  $B_s^0$ -mesonen, die combinaties zijn van twee quarks, in dit geval, 'bottom' ofwel  $\bar{b}$ , en 'strange', ofwel  $s$ . Het  $B_s^0$ -deeltje is instabiel met een levensduur van rond de  $1.5 \times 10^{-12}$  seconden, miljoenste van een miljoenste van een seconde! Het  $B_s^0$ -meson kan vervallen naar allerlei deeltjes, maar de vervalsproducten waar wij naar zoeken zijn  $J/\psi$ - en  $\phi$ -mesonen. De  $J/\psi$  bestaat uit een 'charm'-, ofwel  $c$ , en een 'anti-charm'-quark; het is zelf ook instabiel. Het kan onder andere vervallen naar twee leptonen,  $\mu^+$  en  $\mu^-$ , en daar zoeken wij naar. De  $\phi$  bestaat uit een  $s$  en een  $\bar{s}$ -quark en is ook instabiel. Voor ons is het vervalsproces  $\phi \rightarrow K^+K^-$  van belang, waar  $K^\pm$ -hadronen bestaan uit een  $u$  ( $\bar{u}$ ) en een  $\bar{s}$  ( $s$ )-quark. Tijdens de levensduur van een  $B_s^0$ -meson kan het overgaan naar een  $\bar{B}_s^0$ -meson en vice versa. Deze overgang gebeurt gemiddeld 27 keer voordat het deeltje vervalt. Daarom kunnen  $B_s^0$ -mesonen ófwel direct vervallen naar  $J/\psi\phi$ , ófwel eerst overgaan naar een  $\bar{B}_s^0$ -meson om vervolgens te vervallen naar  $J/\psi$ - en  $\phi$ -deeltjes. Wanneer we kijken naar het verval van  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  in onze speciale CP-spiegel, zullen we zien dat in de reflectie het  $\bar{B}_s^0$ -meson ook naar  $J/\psi$ - en  $\phi$ -deeltjes vervalt, aangezien de laatste twee hun eigen anti-deeltjes zijn. Omgekeerd kan een  $\bar{B}_s^0$ -meson ook direct vervallen naar  $J/\psi\phi$  of eerst overgaan naar een  $B_s^0$ -meson. Na een zorgvuldige blik is het mogelijk om te bepalen of het spiegelbeeld verschilt van het origineel, *i.e.* of de kansen van het verval of het anti-verval hetzelfde zijn. De

parameter die dit verschil karakteriseert wordt  $\phi_s$  genoemd. In het Standaard Model van de fundamentele deeltjes wordt verwacht dat deze parameter erg klein is,  $-0.03698^{+0.00081}_{-0.00070}$  rad, wat betekent dat de vervallen van  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  en  $\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  op een bijna identieke wijze gebeuren.

## WAAROM?

Waarom is een meting van  $\phi_s$  belangrijk? Als de gemeten waarde van  $\phi_s$  anders zou zijn dan de verwachte waarde, betekent het dat er nieuwe, onbekende effecten tevoorschijn komen in de  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  en  $\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  vervallen. In het bijzonder zou er een nieuw fundamenteel deeltje kunnen bijdragen aan de  $B_s^0$ - $\bar{B}_s^0$ -transities en zodoende de waarde van  $\phi_s$  kunnen veranderen. Een dergelijke aanpak om te zoeken naar nieuwe deeltjes wordt ook wel een indirecte zoektocht genoemd, waar de consequenties van een deeltje worden waargenomen in tegenstelling tot het deeltje zelf. Als de massa van het nieuwe deeltje veel groter is dan de energieën die experimenteel toegankelijk zijn, zou die niet geproduceerd kunnen worden en niet waargenomen worden met een directe zoektocht. Tegelijkertijd zou zo een nieuw deeltje waarschijnlijk wel processen zoals  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  beïnvloeden en daarmee indirect waargenomen kunnen worden. Vervolgens zouden sommige eigenschappen van het deeltje kunnen worden bepaald. Dit toegenomen bereik is een groot voordeel van de indirecte aanpak.

## HOE?

Hoe kan men de waarde van  $\phi_s$  bepalen? Ten eerste, deeltjes zoals  $B_s^0$ -mesonen zijn niet aanwezig in de gebruikelijke materie om ons heen en daarom moeten ze worden gecreëerd. Een van de hoofdfabrieken voor deeltjesproductie is de LHC-versneller bij CERN, waar protonen worden versneld tot snelheden van ongeveer 0.999999997 keer de lichtsnelheid. Vervolgens worden ze op elkaar gebotst en wordt een gedeelte van de energie van de botsing omgezet in nieuwe deeltjes. In sommige van die botsingen worden  $B_s^0$ -mesonen geproduceerd, die vervolgens kort daarna vervallen. Om de vervalsproducten op te vangen zijn detectoren om de botsingspunten geplaatst. De detector die specifiek ontworpen is om deeltjes die bottom-quarks bevatten te bestuderen is LHCb. Het unieke ontwerp van het experiment is gekozen om de voorwaartse richting maximaal te omvatten, wat er voor zorgt dat veel van de vervalsproducten van b-quarks gevangen kunnen worden. Binnen LHCb gebeuren protonbotsingen ongeveer 30 miljoen keer per seconde. Een systeem van het experiment, de 'trigger', is speciaal ontworpen om interessante gebeurtenissen te selecteren uit het enorme aantal pp-botsingen. In dit geval zijn interessante gebeurtenissen diegenen die de  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  en  $\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  vervallen bevatten. Het trigger-systeem is een geavanceerde architectuur die extreem snel en efficiënt moet kunnen werken om interessante gebeurtenissen te selecteren. Hoe meer relevante gebeurtenissen worden geselecteerd, hoe preciezer de meting van  $\phi_s$  zal zijn.

Het detecteren van alle vervalsproducten,  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  en  $\phi \rightarrow K^+K^-$ , staat de reconstructie toe van het originele  $B_s^0$ - of  $\bar{B}_s^0$ -meson. Specifieke algorithmes

onderscheiden of het meson een  $B_s^0$  of  $\bar{B}_s^0$  was. Het meson reist gemiddeld een afstand van ongeveer 1 cm binnen de LHCb-detector. De meting van deze afstand maakt de berekening van de levensduur mogelijk voor elk  $B_s^0$  ( $\bar{B}_s^0$ )-deeltje. De vergelijking van de kans van het verval van  $B_s^0$  en  $\bar{B}_s^0$  naar dezelfde  $J/\psi\phi$ -eindtoestand leidt vervolgens tot de meting van  $\phi_s$ . In het geval dat de processen in het CP-spiegelbeeld hetzelfde zijn, zou  $\phi_s$  precies nul zijn. Hoe meer het CP-spiegelbeeld anders is dan het origineel, hoe groter de waarde van  $\phi_s$  zal zijn.

## RESULTAAT

Wat is het resultaat van de meting? Voor de meting van de CP-schending die beschreven is in deze dissertatie zijn protonbotsingen gebruikt die gedetecteerd zijn door LHCb in 2015 en 2016. In rond de 117.000 gebeurtenissen van deze botsingen zijn ófwel een  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ , ófwel een  $\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  verval gevonden. Deze vervallen zijn gebruikt om  $\phi_s$  te bepalen, en de gemeten waarde is

$$\phi_s = -0.083 \pm 0.041 \pm 0.006 \text{ rad}$$

waar de eerste onzekerheid komt van de beperkte hoeveelheid  $B_s^0$ -vervallen die zijn gevonden en de tweede door de imperfecties in de methode die is gebruikt om de meting te doen. Binnen de onzekerheden is het resultaat consistent met de verwachte waarde. De  $\phi_s$ -parameter beschrijft CP-schending niet alleen in de vervallen van het  $B_s^0$ - $\bar{B}_s^0$ -systeem naar de  $J/\psi\phi$ -eindtoestand, maar ook andere vervallen zoals  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ ,  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+K^-$  voor de  $m_{KK}$ -regio boven  $1.05 \text{ GeV}/c^2$ ,  $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$  and  $B_s^0 \rightarrow D_s^+D_s^-$ . De combinatie van de metingen van  $\phi_s$  die gebruik maken van al deze vervallen binnen LHCb resulteert in de gecombineerde meting:

$$\phi_s = -0.042 \pm 0.025 \text{ rad}$$

waar de onzekerheid zowel het effect van het beperkte aantal  $B_s^0$ -vervallen die zijn gevonden, als de imperfecte methoden van de metingen beschrijft.

## WAT VOLGT?

De indirecte bepaling van de waarde van  $\phi_s$ , onder de hypothese van het Standaard Model, is veel preciezer dan de huidige experimentele bepaling, wat betekent dat er nog steeds een mogelijkheid is dat nieuwe deeltjes de waarde van  $\phi_s$  beïnvloeden. Om deze te vangen of er zeker van te zijn dat ze er niet zijn, is het essentieel om de onzekerheid van de meting te verkleinen. Dat betekent dat meer data moet worden verkregen en dat de meting van de data moet worden verbeterd. In de komende jaren wordt data die verkregen is bij LHCb in 2017 and 2018 geanalyseerd en zal de statistische onzekerheid van de gemeten waarde van  $\phi_s$  omlaag gaan met een factor van rond de 1.7, wat ons dichterbij het ontrafelen van mogelijke bronnen van nieuwe fenomenen brengt. Hierna zal een meting volgen die zal worden toegepast op data die wordt verkregen met de nieuwere versie van het LHCb-experiment, waar grote delen van de detector vervangen

zullen zijn om zowel meer, als ook meer nauwkeurige data te kunnen verzamelen. De jacht naar nieuwe fenomenen met  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  vervallen zal doorgaan todat het duidelijk wordt of er wel of niet nieuwe deeltjes schuilen in dit proces.

# Acknowledgments

If you are reading this, chances are that we have met during my PhD journey and therefore you've contributed to it in a way. Thank you for this.

The four years of my PhD at Nikhef were a great adventure. One of the reasons is my supervisor. Gerhard, it was fantastic to brainstorm with you on physics ideas and learn from your great experience. I'm very grateful for the freedom you gave me in pursuing research, dankjewel. Patrick, thank you for helping with making this manuscript readable, especially for your patience with *the* articles.

One of the main reasons why doing research at Nikhef bfys group is so great is its amazing atmosphere of eagerness and desire to share and learn. Marcel (aka Baas-1284184214), thank you for carrying out the attitude of the group through the years and encouraging your kids to speak up with Friday cookies. Of course I want to thank each person in the group: Aleksandra, Antonio, Carlos, Cristina, Daniel, Elena, Flavio, Greg, Igor, Jacco, Jeroen, Jordy, Kazu, Laurent, Lennaert, Lera, Lex, Mara, Marjolein, Mauricio, Maxime, Michele, Niels, Sean, Sevda, Silvia, Tjeerd and Wouter. Maarten and Mick, as my scientific besties and translators of my summary, you got a special thank you.

The analysis described in my thesis was performed in collaboration with the  $J/\psi\phi$  team, thank you, Francesca, Greig, Jennifer, Konstantin, Liming, Simon, Veronika and Wenhua.

During my detachment at CERN, I collaborated with amazing people from trigger group, thank you, Conor, Niklas, Rosen, Sascha and Vava. Alex, even though I didn't manage to bring you to the  $J/\psi\phi$  team, I'm very grateful for everything that you have taught me.

Most importantly, I would not be able to make it without the support of my family.

Семья, спасибо.