

# Samenvatting

Er is een vakgebied binnen de moderne fysica dat de fundamentele vragen der materie probeert te beantwoorden. Deze vragen, welke filosofen van alle tijden hebben beziggehouden, gaan over het identificeren en begrijpen van de fundamentele ondeelbaar bouwstenen waaruit de wereld is opgebouwd. Opmerkelijk is dat meer dan twee millennia nadat de filosoof Democitus de notie van atomen of  $\acute{\alpha}\tau\omicron\mu\alpha$  - Grieks voor ondeelbaar - heeft geïntroduceerd, hedendaagse wetenschappers nog steeds geen sluitende antwoorden hebben op deze fundamentele vragen. Het lijkt erop dat het zichtbare heelal bestaat een handvol elementaire deeltjes die zijn ondergebracht in twee verschillende categoriën. Namelijk *gauge bosons*, welke verantwoordelijk zijn voor het mediëren van alle bekende krachten tussen de deeltjes (met de uitzondering van de zwaartekracht), en *fermions* welke de bouwblokken zijn van materie. Het recentelijk ontdekte Higgs deeltje [4, 5] is een speciaal type boson dat een centrale rol speelt in het genereren van massa voor deeltjes. Fermions kunnen verder worden onderverdeeld in twee categoriën. *Quarks* vormen samengestelde deeltjes zoals het proton en het neutron. Het zwaarste quark echter, het  $t$  quark, zal vervallen voordat het een samengesteld deeltje kan vormen. Het bekendste *lepton* is het electron. Samen met de protonen en neutronen vormen elektronen de atomen. Leptonen en quarks spelen een cruciale rol in processen zoals de formatie van sterren en hebben zo een directe impact op de manier waarop leven op aarde is geëvolueerd.

## Deeltjes fysica en Het Standaard Model

Het Standaard Model is een state of the art mathematisch model dat de interacties tussen fermionen beschrijft [6-8]. Dit is een quantum mechanisch proces. Het beschrijven zo'n proces vereist het berekenen

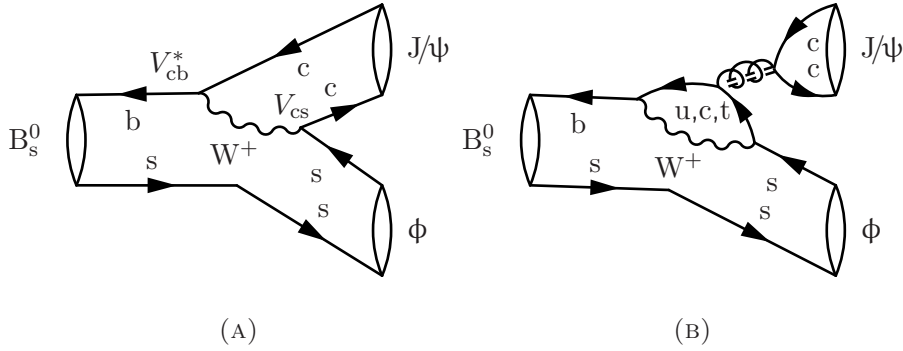
van de kans op een bepaalde uitkomst van het proces. Dit behelst niet-triviale berekeningen. Het voorspellend vermogen van het Standaard Model kan daarom worden beschouwd als een belangrijke prestatie. Het recentelijk ontdekte Higgs boson [4, 5], dat een belangrijke rol speelt in de verklaring hoe deeltjes massa verkrijgen, maakt het Standaard Model compleet.

Ondanks het succes van het Standaard Model, zijn er nog steeds fenomenen en observaties welke het model niet kan verklaren. Wellicht de meest opvallende is de afwezigheid van een beschrijving van de meest bekende, en toch de meest zwakke, natuurkracht: de zwaartekracht. Een ander voorbeeld betreft antimaterie; een toestand van materie, waarbij de quantum numbers voor elektrische lading en pariteit omgekeerd zijn aan die van materie. De waargenomen materie-antimaterie disbalans in het heelal [19–21] is niet voldoende beschreven in het Standaard Model. De bovenstaande fenomenen zijn slechts een paar voorbeelden die de onvolledigheid van het model blootleggen. Daarom is het des te meer van belang de voorspellingen van het Standaard Model wetenschappelijk te toetsen en zo het model te verbeteren. Significante verschillen tussen de metingen en de voorspellingen kunnen een aanwijzing zijn voor *Nieuwe Fysica*.

### ***CP* schending en Nieuwe Fysica**

Materie en antimaterie zijn gecreëerd in gelijke hoeveelheden tijdens de eerste fase van de oerknal, aldus de gevestigde theoriën [19–21]. Dit idee suggereert de notie van een symmetrie tussen materie en antimaterie: *CP* symmetrie. Perfecte *CP* symmetrie betekent dat interacties van materie op dezelfde manier verlopen als interacties van antimaterie. Echter, het huidige heelal bestaat bijna geheel uit materie. Het ontstaan van *CP schending* is een vraagstuk waar het Standaard Model geen sluitende verklaring voor geeft.

Het idee dat de natuur processen prefereert waar de betrokken deeltjes materie zijn boven processen waar de deeltjes antimaterie zijn wordt beschreven in het Standaard Model. Echter, het model kan de grootte van de asymmetrie tussen materie en antimaterie niet voldoende verklaren. Daarom wordt er gezocht naar andere bronnen van *CP* schending,



FIGUUR S.4: Eerste orde *tree* (links) en hogere orde *penguin* (rechts)  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$  verval diagrammen.

buiten het Standard Model. Een manier om hier naar te zoeken is door die parameters te bestuderen waar de Standaard Model een minimale  $CP$  schending voorspelt. Een significante observatie van  $CP$  schending geeft dan een directe hint voor de aanwezigheid van Nieuwe Fysica. Het verzamelen van veel van zulke hints helpt fysici bij het identificeren van de zwakke plekken in het Standaard Model. Daarnaast geeft het richting aan de zoektocht naar alternatieve modellen, zoals *Supersymmetry e.g.* [41–43].

### De zwakke fase $\phi_s$

Een interessante parameter waar de Standaard Model een waarde van ongeveer nul voorspelt is de zwakke fase  $\phi_s$ . Deze parameter manifesteert zichzelf in de interactie  $b \rightarrow c\bar{c}s$ , waar een  $b$  vervalt naar drie andere quarks. Een veelbelovend vervalkanaal voor de meting van  $\phi_s$  is  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ , zie Figure S.4a. De Standaard Model voorspelling van  $\phi_s$  en de meest precieze meting van deze parameter door LHCb zijn:

$$\phi_s^{\text{LHCb}} = -0.010 \pm 0.039 \text{ rad}, \quad (\text{S.9a})$$

$$\phi_s^{\text{SM,tree}} = -0.03761 \begin{matrix} +0.00073 \\ -0.00082 \end{matrix} \text{ rad}. \quad (\text{S.9b})$$

Uit bovenstaande meting volgt dat de waarde van  $\phi_s$  is overeenstemming is met de Standaard Model voorspelling. Elke mogelijke bijdrage van Nieuwe Fysica aan  $\phi_s$  moet daarom heel klein zijn. Vanuit het experimentele oogpunt wordt deze meting nu pas echt interessant: de statistische onzekerheid van de meting is bijna klein genoeg om een verschil tussen de gemeten waarde en de SM voorspelling aan te kunnen tonen. De toekomstige metingen van  $\phi_s$  markeren dan ook een tijdperk van hoge precisie metingen, waar het bestaan van Nieuwe Fysica al dan niet zal worden aangetoond.

Echter, wanneer experimentele metingen met zulke hoge precisie kunnen worden uitgevoerd kunnen zelfs de kleinste effecten zichtbaar worden. Er is een belangrijke bijdrage aan de experimentele meting van  $\phi_s$  welke tot dusver niet in acht werd genomen. Het betreft de bijdragen van zogenaamde *pinguïn topologiën*, zie Figure S.4. Hoewel de bijdragen van deze pinguïn topologiën klein zijn, zullen ze de Standaard Model voorspelling,  $\phi_s^{\text{SM,tree}}$ , veranderen met  $\Delta\phi_s^{\text{peng}}$ . Gegeven het feit dat potentiële Nieuwe Fysica bijdragen aan  $\phi_s$  klein zijn (Eq. S.9), is het van cruciaal belang de bijdragen van pinguïn topologiën te onderscheiden van die door Nieuwe Fysica. Immers, Nieuwe Fysica verandert de Standaard Model voorspelling ook met een kleine waarde  $\Delta\phi_s^{\text{NP}}$ , zoals weergegeven in de volgende vergelijking:

$$\phi_s^{\text{eff}} = \phi_s^{\text{SM,tree}} + \Delta\phi_s^{\text{peng}} + \Delta\phi_s^{\text{NP}}, \quad (\text{S.10})$$

met  $\phi_s^{\text{eff}}$  de experimentele  $\phi_s$  meting. Het is dus van groot belang de bijdragen van pinguïn topologiën correct af te schatten. Hiervoor worden andere  $B_s^0$  vervalkanalen gebruikt, zogenaamde controle kanalen. De gekozen controle kanalen, bijvoorbeeld  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^{*0}$  hebben dezelfde tree en pinguïn topologiën als  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ . Door gebruik te maken van bepaalde quark symmetriën is het mogelijk om nauwkeurig de grootte van  $\Delta\phi_s^{\text{peng}}$  te bepalen. Dit is noodzakelijk voor precieze meting van  $\Delta\phi_s^{\text{NP}}$  en de bepaling van de aanwezigheid van Nieuwe Fysica.

### De analyse van botsingen van deeltjes

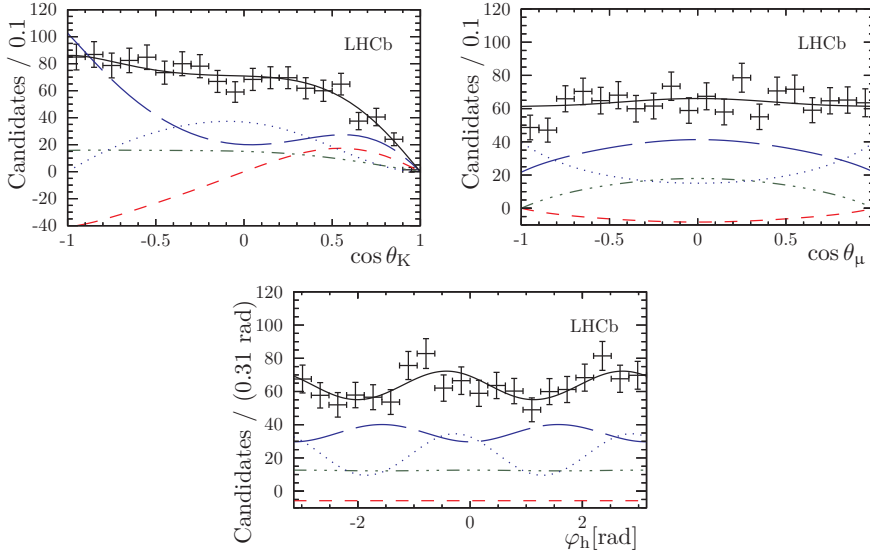
Zoals beschreven speelt de parameter  $\Delta\phi_s^{\text{peng}}$  een belangrijke rol in de zoektocht naar Nieuwe Fysica. Een aantal interessant aspecten van de

meting van deze parameter worden hieronder toegelicht. Ten eerste de LHC, op CERN, de meest krachtige deeltjes versneller op aarde. Deze is gebouwd door wetenschappers waarbij gebruik is gemaakt van state of the art technologieën. De machine kan twee proton bundels versnellen tot ongeveer de snelheid van het licht. De bundels worden met elkaar in botsing gebracht op een bepaald punt in de ruimte, het zogenaamde interactie punt, waaromheen detectoren zijn geïnstalleerd. De energie dichtheid van een zo'n proton-proton botsing is net zo hoog als toen het heelal een miljardste van een seconde oud was. Om deze zeer energetische botsingen in perspectief te plaatsen: de energiedichtheid van een enkele proton-proton botsing is vergelijkbaar met de energie van het heelal een miljardste van een second na de oerknal. Door deze omstandigheden met de LHC te creëren kunnen fysici als het ware terug kijken in de tijd. Op deze manier kan informatie worden verkregen over de toestand van materie en antimaterie in het vroege heelal.

Het LHCb experiment, op CERN, is speciaal ontworpen voor de studie van  $CP$  schending. Het ontwerp van de detector, zowel de hardware als de software, is geoptimaliseerd voor het meten van interacties van zogenaamde *zware* quarks (b en c quarks). Muonen zijn een belangrijk vervalproduct in veel vervalkanalen waarin LHCb geïnteresseerd is. Daarom is bij het ontwerp van LHCb veel aandacht besteed aan het detecteren van muonen, met name van muonen die propageren in een smalle kegel in de richting van de bundel.

Data van proton-proton botsingen in de LHC zijn verzameld om hierop interessante analyses te kunnen verrichten, waaronder de meting van  $\Delta\phi_s^{\text{peng}}$ . De data worden opgeslagen en bewerkt zodanig dat de aanwezigheid van ruis zoveel mogelijk is onderdrukt. Imperfecties in de detector kunnen biases en resolutie effecten introduceren in de analyse. Hiervoor wordt gecorrigeerd zodanig dat een fit van het fysica model aan de data een valide en robuuste schatting geeft van de te meten fysica parameters. Het fit proces is gebaseerd op het principe van de *maximum likelihood*. De likelihood is een functie van de te meten parameters, gegeven de geobserveerde data. Wanneer deze functie maximaal is, geeft het de beste schatting van de te meten parameters gegeven de data waaraan de fit is gemaakt.

Om het resultaat van de fit aan het  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^{*0}$  controle kanaal



FIGUUR S.5: Het gefitte model (zwarte lijn) is op de  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^{*0}$  data (zwarte kruizen) afgebeeld. De verschillende componenten van het model die relevant zijn voor de  $CP$  structuur zijn afgebeeld met gekleurde lijnen.

te visualiseren wordt het model op de data afgebeeld, zie Figure S.5. Er worden drie variabelen bepaald uit de data:  $\cos\theta_K$ ,  $\cos\theta_\mu$  en  $\varphi_h$ . Deze variabelen zijn allen gerelateerd aan de bewegingsrichting van de vervalproducten van het  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^{*0}$  verval.

Uit de likelihood fit aan de data, met in acht name van [37, 48, 51, 93], volgt voor de bijdragen van de pinguïn topologiën aan  $\phi_s$ :

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{s,0}^{\text{peng}} &= 0.000^{+0.010}_{-0.014}, & \Delta\phi_{s,\parallel}^{\text{peng}} &= 0.001^{+0.012}_{-0.016}, \\ \Delta\phi_{s,\perp}^{\text{peng}} &= 0.003^{+0.012}_{-0.016}. \end{aligned} \quad (\text{S.11})$$

met de parameters uitgedrukt in rad ( $\phi_s$  is het argument van een complex getal). De parameter  $\Delta\phi_s^{\text{peng}}$  is gesplitst in drie *polarisaties*. Het

decay  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$  hangt af van de configuratie van de spin quantum getallen van de deeltjes. Dit resulteert in drie polarisatie toestanden:  $\parallel$ ,  $\perp$  en 0 respectievelijk voor parallel, loodrecht, longitudinaal. Op eenzelfde manier hangt  $\phi_s$  af van de polarisatie en kan de waarde van  $\phi_s$  voor elke polarisatie worden gemeten.

### Impact en conclusies

Uit de gemeten waarden van  $\Delta\phi_s^{\text{peng}}$  in Eq. S.11 volgt dat de bijdrage van pinguïn topologiën aan de  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$  vervalsamplitude inderdaad klein is, namelijk  $< 0.017$  rad or  $< 1^\circ$ . Gegeven dat de gemeten waarde van  $\phi_s$  óók klein is (zie Eq. S.9a), is het toch noodzakelijk rekening te houden met bijdrage van de pinguïn topologiën wanneer  $\phi_s$  wordt gemeten. Om een uitspraak te kunnen doen over het bestaan van Nieuwe Fysica in  $\phi_s$  is het noodzakelijk de hoeveelheid beschikbare data te vergoten. Wellicht is de hoeveelheid data die zal worden verzameld tijdens LHCb Run 2 niet genoeg, en zal de data uit de upgrade fase pas uitsluitel geven.