

VU Research Portal

Search for exotic long-lived particles with the LHCb detector

David, P.N.Y.

2016

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

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

citation for published version (APA)

David, P. N. Y. (2016). *Search for exotic long-lived particles with the LHCb detector*. [PhD-Thesis – Research external, 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

Samenvatting

Vormen de tot nu toe gekende elementaire deeltjes en interacties de fundamenteelste beschrijving van de natuur? En als dat zo is, hoe is het universum zoals we het waarnemen dan tot stand gekomen?

Het standaardmodel van de deeltjesfysica beschrijft de elektromagnetische interactie en de sterke en zwakke kernkracht als relativistische kwantumveldentheorieën, met interacties afgeleid van ijsymmetrieën tussen twaalf elementaire fermionen. Het is een uitbreiding van de kwantumelektrodynamica, die de interacties tussen elektronen, atoomkernen en licht en andere vormen van elektromagnetische straling die een rol spelen in processen op atomaire en moleculaire schaal met veel succes beschrijft. De sterke kernkracht, die atoomkernen samenhoudt, wordt beschreven door een theorie die gekleurde quarks vastzet in kleur-neutrale gebonden toestanden, *e.g.* protonen en neutronen. De zwakke kernkracht die verantwoordelijk is voor nucleaire vervalprocessen, wordt gemodelleerd door de uitwisseling van geladen of neutrale vectorbosonen. De grote massa van deze boodschapperdeeltjes zorgt ervoor dat de interactie zwak is in vergelijking met de sterke en elektromagnetische interactie, en maakt de vervalprocessen traag.

Over het algemeen komen de voorspellingen van de theorie zeer goed overeen met experimentele waarnemingen. Ze biedt evenwel geen verklaring voor de waargenomen structuur in het massaspectrum en de eigenschappen van de fermionen, of waarom de schaal van de elektrozwakke symmetriebreking zo laag ligt: de natuurlijke schaal voor een fundamenteelere theorie is de Planckschaal, waar kwantumeffecten en de zwaartekracht verenigd moeten worden. Daarom wordt het standaardmodel verondersteld onvolledig te zijn, en bij een natuurlijke oplossing voor de zopas vermelde problemen worden nieuwe waarneembare effecten verwacht bij energieën in de buurt van de TeV-schaal.

Een andere reden waarom het standaardmodel onvolledig is, komt uit de kosmologie. De huidige modellen kunnen de evolutie van het heelal, op grote zowel als op kleine schaal, beschrijven, in de veronderstelling dat het universum, naast de baryonische materie die we zien, ook een niet-baryonische materie-achtige component bevat, donkere materie, en een kosmologische constante of donkere energiecomponent. Beide aannames zijn goed gemotiveerd — donkere materie is ook nodig om

de dynamica van melkwegstelsels te beschrijven; de versnelde uitdeining van het universum is een experimenteel gegeven — maar de juiste aard en oorsprong zijn een raadsel. Ook voor een juiste voorspelling van de hoeveelheid materie die geproduceerd is in het jonge universum, zijn nieuwe interacties nodig.

Deze vragen geven een reden om op zoek te gaan naar een vollediger beschrijving van de natuur, en naar experimentele resultaten die bij de ontwikkeling daarvan kunnen helpen. In de voorbije decennia zijn allerlei modellen voor uitbreidingen van het standaardmodel voorgesteld, maar tot dusver hebben experimenten voor geen daarvan duidelijk bewijs geleverd. Integendeel, de mogelijke zichtbare effecten van nieuwe deeltjes en interacties zijn sterk beperkt.

De grote hoeveelheid botsingen die de LHC-experimenten sinds 2009 hebben geregistreerd, maken het mogelijk om het standaardmodel experimenteel te testen en nieuwe deeltjes te zoeken bij een tot nog toe onbereikbare energie en precisie. Aangezien de meeste inelastische proton-protonbotsingen bij een energie van enkele TeV veroorzaakt worden door de sterke kernkracht, en zelfs de meeste zeldzame processen goed beschreven worden door het standaardmodel, worden de botsingen met nieuwe deeltjes of andere afwijkingen aan het oog onttrokken door een grote hoeveelheid achtergrond. De interessante processen worden daarom van de achtergrond gescheiden door gebruik te maken van karakteristieke eigenschappen, bijvoorbeeld een eindtoestand waarvan de zichtbare onderdelen aangeven dat een groot deel niet gedetecteerd is, volledig gereconstrueerde vervallen van gekende zwaardere deeltjes *etc.*

Dit werk richt zich op de waarneming van nieuwe deeltjes door middel van hun verval op een andere plaats dan het proton-proton botsingspunt waar ze geproduceerd zijn. Nauwkeurige sporenreconstructie laat toe om vervallen te onderscheiden tot op enkele mm van het productiepunt, dankzij de precisie van silicium vertexdetectoren. Deze detectoren worden door de meeste collider-experimenten gebruikt om vervallen van beauty- en charmhadronen te herkennen en te bestuderen. Zulke hadronen hebben een gemiddelde levensduur van de grootte-orde 1 ps, wat aan de LHC overeenkomt met een vertex die ongeveer een centimeter verplaatst is.

De LHCb-detector is specifiek ontworpen om zware quarkvervallen te bestuderen, en kan dus ook gebruikt worden om te zoeken naar de vervallen van langlevende exotische deeltjes. De vertexdetector kan sporen reconstrueren van vervallen tot 20 cm van het interactiepunt langs de bundellijn en tot ongeveer 4 cm in het vlak loodrecht daarop. Bovendien is het voorwaartse gebied, met hoeken tot 250–300 mrad met de bundellijn, volledig uitgerust met detectoren: sporendetectoren en identificatiedetectoren voor geladen deeltjes, en calorimeters die gevoelig zijn aan alle elektromagnetisch en sterk interagerende deeltjes.

De experimentele uitdaging om nieuwe verschijnselen te ontdekken in de dataset

van een LHC-detector bestaat eruit $\mathcal{O}(10^{14})$ achtergrondbotsingen te verwijderen, en toch nog het bestaan van het signaalproces te kunnen aantonen op basis van zo weinig mogelijk botsingen waarin dit plaatsvindt. Deze reductie gebeurt in verschillende stappen, met veelal strikte beperkingen op de gebruikte rekenkracht en harde schrijfruimte. De eerste en minst flexibele stap is een hardwaretrigger die het uitlezen van de detector controleert: de LHCb detector kan ten hoogste voor 1×10^6 van de ongeveer 12×10^6 botsingen die de LHC per seconde produceert, volledig uitgelezen worden. De beslissing wordt genomen op basis van een ruwe schatting van de deeltjes met de hoogste loodrechte impulsen in de calorimeters en de muondetector.

De volledig uitgelezen *events* worden naar een rekencentrum gestuurd, waar ongeveer 30×10^3 processen van een softwaretrigger de twee volgende reductiestappen uitvoeren. De eerste stap begint met de volledige sporenreconstructie in de vertexdetector. Interessante sporen, die niet recht naar een botsingspunt terugwijzen, zoals de vervalproducten van zware quarks, of die overeenkomen met een spoor in de muondetector, worden verder gereconstrueerd aan de andere kant van het magnetisch veld, zodat hun loodrechte impuls, die typisch groter is voor de bestudeerde processen dan voor achtergrond, voor de verdere selectie gebruikt kan worden. Voor het in dit werk bestudeerde signaal, een verplaatste vertex met een groot aantal sporen, werd een selectie toegevoegd voor paren van sporen, zodat de spoorkwaliteitsvereisten, die sporen van vervallen op meer dan 5 mm benadelen, lossers konden worden gemaakt dan in de standaard één-spoor selectie. De tweede softwaretriggerstap bestaat uit een groot aantal verschillende selecties die allemaal kandidaten reconstrueren die zeer gelijkaardig zijn aan die gebruikt voor de uiteindelijke metingen. De vervallen van exotisch langlevende deeltjes worden hier gereconstrueerd door een algoritme dat alle sporen in de vertexdetector gebruikt om hun productievvertices te zoeken. Vertices buiten het interactiegebied en met een groot aantal sporen zijn signaalkandidaten. De gereconstrueerde invariante massa en de impuls van de sporen worden gebruikt om het aantal aanvaarde events te beperken. Alle events met ten minste één kandidaat die aan de vereisten voldoet, worden opgeslaan.

De eerste stap van een analyse die uitgevoerd wordt op een opgeslagen dataset is meestal een her-reconstructie van de kandidaten, vanaf de detectorsignalen, met de meest nauwkeurige versie van de reconstructie, op het wereldwijde LHC computing grid, zonder de strikte rekentijdbeperking van de trigger. In dit specifieke geval werden, naast de volledig hergereconstrueerde vertices, ook de triggerkandidaten hergebruikt, om de efficiëntie en overlap met de triggerselectie te maximaliseren. De vertices worden gebruikt als referentiepunten voor de volledige reconstructie van de uitgaande quarks van het verval als twee hadronjets. Daarvoor wordt een

clusteralgoritme gebruikt dat gereconstrueerde deeltjes, geladen en neutraal, met gelijkaardige impulsrichtingen groepeerd. Voor de geladen deeltjes wordt de informatie van de vertexdetector en de sporendetectoren zo veel mogelijk gebruikt: sporen die niet compatibel zijn met het veronderstelde vervalpunt, de vertex, komen niet in aanmerking, en de impulsbepaling helpt de precisie op de totale jetimpuls te verbeteren. De vereiste van twee jets die passen bij de triggerkandidaat zorgt voor een voldoende reductie. Deze worden aangevuld met de kandidaten gevonden bij de vertices die gereconstrueerd zijn met behulp van de uitgebreidere offline sporenverzameling.

De dataset wordt vervolgens onderverdeeld in categorieën aan de hand van de loodrechte verplaatsing van de interactieregio. Het aantal gevonden achtergrondkandidaten neemt sneller af als functie van die variabele dan voor een typisch signaal, door de verschillende levensduur. De achtergrond wordt verder onderdrukt met selecties voor de vertex, de kwaliteit van de jets en de compatibiliteit van de jets met de vertex. Twee types instrumentele achtergrond kunnen volledig geëlimineerd worden: een deeltje afkomstig van de proton-protonbotsing kan botsen met het detectormateriaal, waarbij andere deeltjes kunnen geproduceerd worden, met sporen die op een signaalvertex lijken. Dergelijke vertices worden verwijderd door kandidaten uit het gebied rondom de detectoronderdelen te verwijderen. Een tweede groep achtergrondvertices werd geïdentificeerd als een combinatie van bijna evenwijdige sporen, mogelijk afkomstig van interacties van de bundel met colimators, en sporen van de proton-protonbotsingen. Als veel siliciumstrips in hetzelfde stuk van de detector geraakt worden, kan het reconstructie-algoritme een groot aantal tracks dicht bij elkaar vinden, waaruit vertices gemaakt kunnen worden. Deze achtergrond wordt verwijderd op basis van de karakteristieke spoor- en hitdistributies in dergelijke events.

De overblijvende achtergrondvertices komen voort uit willekeurige combinaties van sporen van zware quarkvervalen, materiaalinteracties en slecht gereconstrueerde deeltjes met een laag momentum, afkomstig van dezelfde of verschillende primaire botsingen. Twee categorieën kunnen onderscheiden worden: kandidaten die gedomineerd worden door een enkele zware quarkjet of materiaalinteractie, waar de deeltjes geclusterd worden in twee jets dicht bij elkaar, en kandidaten waar de eindproducten van beide kanten van een botsing met een paar zware quarks bijdragen, wat jets oplevert met ongeveer tegenovergestelde richtingen in het loodvlak op de bundellijn. De invariante massadistributie van de eerste categorie, met kleine openingshoek, heeft een piek bij lage massa en neemt snel af, terwijl de tweede categorie een minder snel afnemend spectrum oplevert. De bijdrage bij hoge massa van de laatste component wordt sterk verminderd door de twee laatste selectievereisten: de kandidaat moet terugwijzen naar een proton-protonbotsingspunt en de

openingshoek mag niet te groot zijn.

De invariante massadistributie van de dijetkandidaten wordt dan gefit, in iedere categorie van verplaatsing afzonderlijk, met een empirisch model dat een bijdrage voor het veronderstelde signaal en voor elk van de achtergrondtypes bevat: de grootste achtergrondbijdrage met kleine openingshoek wordt beschreven door een analytisch model dat naar een exponentiële distributie neigt bij hoge invariante massa, en wordt helemaal bepaald door de data, in iedere categorie afzonderlijk. Voor de tweede bijdrage wordt een vaste vorm toegevoegd, ook met een exponentiële staart bij hoge massa, met een helling die vastgezet wordt op de waarde die de distributie voor de hele dataset samen het beste beschrijft bij hoge invariante massa, voordat de laatste twee selecties toegepast worden. Uit statistische hypotheses tests worden bovenlimieten op de productie van langlevende deeltjes met de veronderstelde eigenschappen bekomen.

Een gevoeligheid tot het niveau van enkele pb, of een vertakkingsverhouding van 20 % van het Brout-Englert-Higgsboson in het standaardmodel, werd bereikt, voor langlevende deeltjes met gemiddelde levensduur in het interval 2–500 ps en massa 25–50 GeV/c². Dit beslaat het gebied met lage massa en levensduur dat moeilijk bereikbaar is voor de andere LHC-experimenten, en dat voorheen bestudeerd is aan de Tevatronversneller, met een lagere botsingsenergie en kleinere datasets. Voor het bestudeerde gedeelte van de parameter ruimte zijn de LHCb-resultaten de meest gevoelige tot nu toe.

Door de minimale aannames in deze zoektocht — het verval van slechts één langlevend deeltje wordt verondersteld, en de selectie berust enkel op het verval van zo'n deeltje naar quarks, en geen andere eigenschappen van de botsing die het voortbrengt — zijn de resultaten ook toepasbaar op andere modellen die de productie van langlevende deeltjes met quarkvervalven voorspellen, mits een correctie wordt toegepast voor de mogelijk verschillende fractie van de vervallen dat zich in het geïnstumenteerde gedeelte van de detector bevindt. De ontwikkelde methodes kunnen ook toegepast worden bij de analyse van de grotere datasets die in de komende jaren bij een hogere botsingsenergie verzameld zullen worden, en bij verschillende eindtoestanden, om de productie van exotische langlevende deeltjes te ontdekken of verder te begrenzen.