

**Christian Fernando Mejía Guamán**

**Perspectivas para o decaimento**  
 $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  **no experimento LHCb**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física da PUC-Rio

Orientador: Prof. Carla Göbel Burlamaqui de Mello

Rio de Janeiro  
junho de 2009

**Christian Fernando Mejía Guamán**

**Perspectivas para o decaimento**  
 **$B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  no experimento LHCb**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Carla Göbel Burlamaqui de Mello**

Orientador

Departamento de Física — PUC-Rio

**Prof. André Massafferri Rodrigues**

CBPF

**Prof. Hiroshi Nunokawa**

Departamento de Física - PUC-Rio

**Prof. Érica Ribeiro Polycarpo Macedo**

UFRJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Departamento de Física- PUC-Rio

17de junho de 2009

Todos os direitos reservados. é proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### Christian Fernando Mejía Guamán

Graduou-se em licenciatura Plena em Física na Escuela Politécnica Nacional de Quito em 2007.

#### Ficha Catalográfica

Mejía, Christian

Perspectivas para o decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  no experimento LHCb / Christian Fernando Mejía Guamán; orientador: Carla Göbel Burlamaqui de Mello. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Física, 2009.

v., 84 f.: il. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Tese. 2. Experimento LHCb. 3. Mésons B. 4. Violação de CP.  
I; Göbel Burlamaqui de Mello, Carla; II; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física; III; Título;

CDD: 510

## Agradecimentos

À minha orientadora, professora Carla Göbel Burlamaqui de Mello, por me haver dado a oportunidade de realizar esta dissertação. Pela paciência, tolerância e bom coração com que me ajudou.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro por haver-me acolhido e brindado os meios necessários para a realização deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

A meus pais José e Fanny, meus irmãos Eli, Bey, Nena e Pepe, que sem o apoio deles nada teria sido inspirado.

Ao meus amigos do apartamento Marcelo M., Marcelo S. e Jorginho A., com quem me senti em família.

A meus amigos e companheiros Mary, Paulina, Yoli, Alexander, Anderson, Fábio, Thiago, Laercio e Jeferson.

## Resumo

Mejía, Christian; Göbel Burlamaqui de Mello, Carla. **Perspectivas para o decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  no experimento LHCb**. Rio de Janeiro, 2009. 84p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O experimento LHCb (CERN) tem como um de seus objetivos principais o estudo do fenômeno de Violação da Simetria Carga-Paridade (CP), que seria uma das condições necessárias para assimetria de matéria-antimatéria observada no Universo. O LHCb foi especialmente desenhado para coletar eventos com produção de mésons B (que contém o quark b), cujos decaimentos são a melhor fonte para o estudo da Violação de CP. A observação de efeitos de Violação de CP no decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  depende fundamentalmente dos canais ressonantes intermediários que são produzidos. Ainda que experimentos recentes não tenham observado Violação de CP neste canal, a alta estatística a ser atingida pelo LHCb pode vir a permitir a observação de assimetrias no chamado Dalitz Plot, que fornece informações diretas sobre a dinâmica do decaimento. Nesta dissertação, apresentamos um estudo do decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  com dados simulados do experimento LHCb. O objetivo é estabelecer o número de eventos deste canal que podem ser observados com a luminosidade integrada de  $2 \text{ fb}^{-1}$ , o que corresponderia a um ano nominal de tomada de dados. Foram feitos estudos com amostras simuladas de sinal e de fundo, de forma a estabelecer um critério de seleção de eventos que oferecesse uma alta eficiência para eventos de sinal, com grande rejeição para eventos de fundo. De acordo a este critério, o rendimento esperado para  $2 \text{ fb}^{-1}$  é de cerca de 87 mil eventos  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$ , com um relação fundo/sinal da ordem de 2.

## Palavras-chave

Experimento LHCb; Mésons B; Violação de CP;

## Abstract

Mejía, Christian; Göbel Burlamaqui de Mello, Carla. **Perspective for B decays into three pions in LHCb experiment.** Rio de Janeiro, 2009. 84p. MSc Dissertation — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The LHCb experiment (CERN) has the main objective of studying the phenomenon of Charge-Parity (CP) Violation, which is one of the requisites for observed matter-antimatter asymmetry in the universe. The LHCb has been specially designed to collect events with production of B mesons (containing the b quark), since their decays are the best source for the study of CP violation. The observation of effects of CP violation in the decay  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  depends on its resonant intermediate states. Although CP violation has been observed in this channel so far, the high statistics to achieve by the LHCb may allow the observation of asymmetries in the so-called Dalitz plot distribution, which provides direct information about the dynamics of decay. In this dissertation we present a study of the decay  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  with simulated data of the experiment LHCb. The goal is to establish the number of events in this channel that can be reached with the integrated luminosity of  $2 \text{ fb}^{-1}$ , corresponding to one nominal year of data taking. Studies were performed using signal and background samples, in order to establish selection criteria to achieve a high efficiency for signal events with high background rejection. We obtain an expected yield for  $2 \text{ fb}^{-1}$  of about 87 thousand events of  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$ , with a background to signal ratio of about 2.

## Keywords

LHCb experiment; B mesons; CP violation;

## Sumário

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introdução   | 12 |
| 2     | Introdução teórica                                       | 14 |
| 2.1   | Simetrias Discretas                                      | 14 |
| 2.1.1 | P, C e T para partícula livre                            | 15 |
| 2.1.2 | Operação CP, CPT e T                                     | 17 |
| 2.2   | Modelo padrão  | 18 |
| 2.2.1 | Lagrangiana no MP e o modelo de Higgs                    | 20 |
| 2.3   | Matriz CKM   | 22 |
| 2.3.1 | Triângulo unitário de CKM                                | 23 |
| 2.4   | Violação de CP nos mésons K                              | 26 |
| 2.5   | Os três tipos de violação de CP nos decaimentos de B     | 28 |
| 2.5.1 | Violação de CP em decaimentos                            | 29 |
| 2.6   | Medidas do ângulo  | 30 |
| 3     | Decaimentos em três corpos e                             | 32 |
| 3.1   | Cinemática de Decaimento em Três Corpos e Dalitz Plot    | 32 |
| 3.1.1 | Taxa de transição e espaço de fase dos decaimentos       | 32 |
| 3.1.2 | Decaimentos em três corpos e Dalitz Plot                 | 33 |
| 3.2   | Dinâmica de decaimento em três corpos                    | 34 |
| 3.3   | Decaimento   | 37 |
| 3.3.1 | Diagramas possíveis para o decaimento                    | 37 |
| 3.3.2 | Análise do decaimento pelo experimento BaBar             | 40 |
| 3.3.3 | Técnica de Medida de Anisotropia no Dalitz Plot          | 42 |
| 4     | Experimento LHCb   | 46 |
| 4.1   | LHCb   | 48 |
| 4.2   | O detector de vértices VELO                              | 49 |
| 4.3   | RICH   | 52 |
| 4.3.1 | RICH1  | 53 |
| 4.3.2 | RICH2  | 53 |
| 4.4   | O Magneto  | 53 |
| 4.5   | Trackers   | 54 |
| 4.5.1 | Silicon Tracker  | 55 |
| 4.5.2 | Outer Tracker  | 55 |
| 4.6   | Calorímetros   | 56 |
| 4.7   | Sistema de Múons   | 57 |
| 4.8   | Trigger  | 59 |
| 5     | Estudo do Decaimento                                     | 62 |
| 5.1   | Geração e Reconstrução de Eventos de Monte Carlo no LHCb | 62 |
| 5.1.1 | Software do LHCb   | 63 |
| 5.1.2 | Tipos de Amostras de Eventos                             | 64 |

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| 5.2   | Seleção de Amostras             | 65 |
| 5.2.1 | Varíaveis de Seleção            | 65 |
| 5.2.2 | Pré-seleção da Amostra          | 67 |
| 5.2.3 | Seleção Final da Amostra        | 67 |
| 5.2.4 | Dalitz Plot                     | 76 |
| 5.3   | Sensibilidade para o decaimento | 76 |
| 5.4   | Comentários                     | 78 |
| 6     | Conclusão                       | 79 |



## Lista de figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Representação dos decaimentos dos quarks, a probabilidade de que um quark $q_i$ decai para $q_j$ é proporcional $ V_{q_i q_j} ^2$ . A massa ( $GeV/c^2$ ) dos quarks está junto aos quarks [1]. As representações das setas correspondem à maior e menor probabilidade dependendo da espessura da linha. | 22 |
| 2.2  | Triângulo unitário de CKM em ordem $\lambda^3$ , com seus respectivos ângulos, [1].  | 25 |
| 2.3  | As restrições no plano $\bar{\rho}$ e $\bar{\eta}$ , [2]   | 26 |
| 2.4  | Diagrama mostra como a interação com bósons $W$ gera mixing. Os quarks $q_i$ e $q_j$ são $u$ , $c$ ou $t$ de carga eléctrica $2/3$ , [2].  | 27 |
| 2.5  | Combinação de todas as medidas de $\gamma$ . O valor mais provável esta acima da região esperada pelo ajuste das outras medidas, o erro obtido é muito grande ao combinar essas medidas,[3, 4].  | 31 |
| 3.1  | Dalitz Plot para o decaimento de três corpos, com $m_{12}^2 = s_{12}$ e $m_{23}^2 = s_{23}$ . A área escura (interna) representa a região permitida cinematicamente. Mostra-se também os valores máximos e mínimos de $s_{12}$ e $s_{13}$ [1].   | 35 |
| 3.2  | Decaimento Não-Ressonante e Ressonante de $B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ .  | 36 |
| 3.3  | Decaimento não-ressonante de $B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ .   | 38 |
| 3.4  | Decaimento ressonante tipo <i>tree</i> permitido em cor $B^+ \rightarrow R\pi^+$ onde $R = \rho^0, f_0, \sigma, \dots$   | 38 |
| 3.5  | Decaimento ressonante tipo <i>tree</i> suprimido em cor $B^+ \rightarrow R\pi^+$ onde $R = \rho^0, f_0, \sigma, \dots$   | 39 |
| 3.6  | Decaimento ressonante $B^+ \rightarrow \chi_{c0} \pi^+$ , onde $\chi_{c0} \rightarrow \pi^+ \pi^-$ .   | 39 |
| 3.7  | Decaimento ressonante tipo pingüim $B^+ \rightarrow R\pi^+$ , onde $R = \rho^0, f_0, \sigma, \dots$  | 39 |
| 3.8  | Decaimento ressonante tipo pingüim $B^+ \rightarrow R\pi^+$ , onde $R = \rho^0, f_0, \sigma, \dots$  | 40 |
| 3.9  | a)Significância $S_{CP}^{DP}$ para 300K de sinal e 200K de ruído. b) O gráfico de Gauss para a distribuição $S_{CP}^{DP}$ ; P1, P2 e P3 são os valores para: o valor central, largura e parâmetro de normalização, respectivamente, [5].   | 43 |
| 3.10 | a) Significância $S_{CP}^{DP}$ para o decaimento $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^-$ . b) Distribuição de $S_{CP}^{DP}$ , onde o ajuste com Gaussiana não se adequa [5].   | 44 |
| 3.11 | DP para $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^-$ dividido em 4 regiões [5].   | 45 |
| 3.12 | Distribuição de $S_{CP}^{DP}$ para cada região da Figura 3.11 [5].   | 45 |
| 4.1  | Desenho esquemático do anel acelerador LHC, com seus quatro maiores detectores: ALICE, ATLAS, CMS e LHCb.  | 46 |
| 4.2  | Corte lateral do LHCb, as interações ocorrem no Vertex Locator do espectrômetro de braço único, [6].   | 49 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.3  | Produção dos quarks $\bar{b}b$ na colisão de prótons, e distribuição dos ângulos dos quarks $\bar{b}$ e $b$ [6].  | 50 |
| 4.4  | O sub-detector VELO, [7]  | 51 |
| 4.5  | Identificação das partículas no RICH [8].   | 52 |
| 4.6  | Dimensões dos dois planos TT..  | 55 |
| 4.7  | Estações de traços T1, T2 e T3.   | 56 |
| 4.8  | Detetores TT e T [9].   | 57 |
| 4.9  | Esquema do Sistema de Múons [10].   | 58 |
| 4.10 | O <i>trigger</i> e a aquisição dos dados do detector LHCb, [11].  | 60 |
| 5.1  | Topologia do decaimento. No vértice primário (VP) ocorre a criação da partícula $B$ , que decai no vértice secundário (VS). $\theta$ é o ângulo entre a direção do $B$ definida por $\vec{d}$ e a soma de momentos dos três píons $\vec{p}(3\pi)$ . | 65 |
| 5.2  | Massa da partícula $B^+$ na janela de massa $5279 \pm 300 MeV$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).  | 69 |
| 5.3  | Direção ou cosseno do ângulo $\theta$ com um corte $>0,9999$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).  | 70 |
| 5.4  | Distribuição para $\chi^2(d)$ , destacando o corte em 200, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).  | 70 |
| 5.5  | Distribuição para $\chi^2(\pi)/gl$ com um corte $<4$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).  | 71 |
| 5.6  | PIDK de cada pión na esquerda com o corte $<0$ e o $pT$ de cada pión na direita com o corte $>400$ MeV, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).   | 72 |
| 5.7  | Distribuição do point com corte $<0,05$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).   | 73 |
| 5.8  | O momento de cada pión com o corte $>4$ GeV, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).  | 74 |
| 5.9  | A soma dos momentos transversais $\Sigma pT$ dos píons com o corte $>5500$ MeV, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e $bb$ -inclu (azul).   | 75 |
| 5.10 | O Dalitz Plot de um pión de carga negativa e outro de carga positiva antes dos cortes, em $(GeV/c^2)^2$   | 76 |
| 5.11 | O Dalitz Plot de um pión de carga negativa e outro de carga positiva após dos cortes, em $(GeV/c^2)^2$  | 77 |

## Lista de tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Tabela das três interações fundamentais, partículas transportadoras da força e partículas que sofrem estas forças,[1, 2].                                | 18 |
| 2.2 | Números quânticos: carga elétrica $Q$ , isospin $T$ , terceira componente do isospin $T_3$ e a hipercarga $Y$ , dados pela relação $Q = T_3 + Y/2$ [12]. | 19 |
| 2.3 | Massa dos bósons de interação medidos experimentalmente e os preditos pelo MP, [1].  | 19 |
| 2.4 | Valores de alguns parâmetros da matriz CKM segundo o <i>Particle Data Group</i> ,[1].  | 26 |
| 3.1 | Valores das ramificações BR e a assimetria $A$ para cada canal $B^+/B^-$ , [13]  | 41 |
| 4.1 | Alguns dos parâmetros técnicos do LHC,[6, 7].  | 47 |
| 5.1 | Variáveis e cortes da pré-seleção de eventos.  | 67 |
| 5.2 | Eficiências dos cortes individualmente.  | 68 |
| 5.3 | Eficiências dos cortes consecutivamente.   | 69 |
| 5.4 | Sequencia da simulação do número de eventos após cada etapa. Na última linha temos a eficiência (%) dos eventos selecionados.                            | 69 |