



Josué Danilo Molina Rodriguez

**Busca de violação CP em decaimentos
charmosos hadrônicos em três corpos.**

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
Dezembro de 2011



Josué Danilo Molina Rodriguez

**Busca de violação CP em decaimentos
charmosos hadrônicos em três corpos**

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.

Profa. Carla Göbel Burlamaqui de Mello
Orientadora
Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. José Helder Lopes
UFRJ

Prof. Geraldo Monteiro Sigaud
Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de dezembro de 2011.

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

Josué Danilo Molina Rodriguez

Graduou-se em Física na Universidad Nacional Autónoma de Honduras UNAH em 2008.

Ficha Catalográfica

Molina, Josué

Busca de violação CP em decaimentos charmosos hadrônicos em três corpos / Josué Danilo Molina Rodriguez; orientador: Carla Göbel Burlamaqui de Mello. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Física, 2011.

v., 119 f.: il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Tese. 2. Física de Charme. 3. Violação CP. 4. Anisotropia no Dalitz Plot. 5. LHCb. I; Mello, Carla Göbel Burlamaqui de; II; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física; III; Título;

CDD: 530

para Karen e Camila

Agradecimentos

Na parte mais funda do inferno de Dante está o nono círculo, congelado lugar onde são punidos os ingratos e desleais, distribuídos em quatro esferas diferentes. Especificamente na *Esfera da Giudecca* estão hostilmente alojados, sumersos totalmente no gelo, aqueles que não guardaram lealdade nem agradecimento aos seus mestres. Como eu sou mais do tipo de pessoa que gosta de praia e clima ensolarado, aproveito a ocasião para agradecer àquelas pessoas que contribuíram à minha formação até hoje, sobretudo aos meus mestres da vida e da ciência:

Ao Lic. Segisfredo Infante, pelas inúmeras conversas sobre os mais variados tópicos do saber universal, pela esperança no futuro da humanidade, pela amizade desinteressada e principalmente, pelo maravilhoso livro “El Correo de Mr. Job”¹.

Ao Dr. Gustavo Pérez, por ter me guiado no mundo da Mecânica Quântica, durante a minha época de estudante da graduação em física na UNAH, por ter iniciado em mim o desejo de conhecer de perto a física de partículas, pelas boas discussões sobre ciência, e por ter possibilitado a minha vinda para o Brasil.

À professora Dra. Carla Göbel, por dar significado vivo à frase *minha orientadora*, dedicando generosamente o tempo para me transmitir os mais lúcidos ensinamentos, pela competência com que me guiou durante o mestrado, enriquecendo meu conhecimento com suas argumentações e sugestões científicas. Por sua crítica sempre tão oportuna e construtiva, exigindo sempre o melhor esforço - como é mister que seja- no desenvolvimento da pesquisa. Pelas palavras de incentivo, sempre tão necessárias nos momentos de aridez intelectual, que me encorajaram a aprimorar minha capacidade para interpretar e explicar os variados fenômenos referentes à física de partículas. Principalmente por ter sido um exemplo de probidade como pessoa, por me ensinar a amar esta área da física, pela compreensão e bom convívio. Bem-haja, estou-lhe muito grato.

Um sentido agradecimento ao grupo de pesquisa de charme, a colaboração Rio-Oxford do LHCb: Alberto dos Reis e Danielle Tostes, do grupo de Altas Energias LAFEX-CBPF; Daniel Vieira, Érica Polycarpo e Sandra Amato, do Laboratório de Partículas Elementares (LAPE)-UFRJ; assim como Matthew Charles e Hamish Gordon, da Oxford University.

Gostaria de agradecer também a todos meus colegas do Departamento de Física, a meus amigos da Favelinha e a todas aquelas amizades

¹O Correio de Mr. Jó

que contribuíram a tornar agradáveis as diferentes fases desta pesquisa, principalmente àqueles que com interessantes conversas e conselhos, me propiciaram lembranças memoráveis. *Tenho amigos para saber quem eu sou, pois vendo-os loucos e santos, bobos e sérios, crianças e velhos, nunca me esquecerei de que a normalidade é uma ilusão imbecil e estéril.*² Agradeço aos meus amigos, sempre apostos nos momentos difíceis ou nas horas de descontração, Maciel Mello, Leonel, e, muito longe daqui, o Dr. Abraham Corleone, Alexis, Baltazar e Orlin. Valeu gente, vocês são demais.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, por me acolher brindando os meios necessários para realizar este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo suporte financeiro.

E principalmente, às minhas belas princesas Karen e Camila por se constituírem em fontes de inspiração nova cada dia, por me cederem o precioso tempo a que têm direito, para que eu pudesse vir para o Brasil. Porque são elas a razão da minha existência, *Karencita* por estar sempre comigo na distância, e *Camilita* por me fortalecer pelo internet com um sorriso, um beijo e balbuciando um *papai eu te amo*, contudo ela ainda não saiba o seu significado, me dá a maior vontade de ser melhor pessoa e querer salvar o mundo. Do brilho dos teus olhos se ilumina meu caminhar.

²Fernando Pessoa

Resumo

Molina, Josué; Göbel Burlamaqui de Mello, Carla. **Busca de violação CP em decaimentos charmosos hadrônicos em três corpos..** Rio de Janeiro, 2011. 119p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O LHCb é um dos experimentos do LHC (Large Hadron Collider) que tem como objetivo principal o estudo do fenômeno de violação da simetria de Carga e Paridade (CP), que está relacionada à assimetria entre matéria e antimatéria no universo. Sabe-se, no entanto, que a magnitude da assimetria tal como prevista pelo Modelo Padrão (MP) não é suficiente para explicar aquela observada, o que parece indicar que deve haver outras fontes de violação de CP através de nova física. Nesta dissertação, apresenta-se um estudo da busca de Violação de CP em decaimentos em três corpos do méson D. Para tais mésons, as previsões do Modelo Padrão indicam efeitos muito pequenos - assimetrias não maiores que 0,1%. Entretanto, efeitos de nova física prevêem assimetrias maiores, até 1%, o que faz com que a busca de Violação de CP neste setor se torne um cenário atraente. Esta análise, feita com os dados obtidos pelo detector LHCb durante o ano 2010, baseia-se na comparação da distribuição de eventos na região física do espaço de fase para D^+ e D^- , o chamado Dalitz Plot. Em particular, buscou-se efeitos de violação de CP no canal $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ - onde o Modelo Padrão prevê uma assimetria pequena porém não nula - tendo como base o estudo de canais de controle (onde o MP prediz violação de CP nula) $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ e $D_s^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$. Com a estatística de 2010, correspondendo a cerca de 400 mil eventos de D^+ e D^- em $KK\pi$, não foi encontrada evidência de violação de CP. É apresentado também um estudo inicial da seleção para o canal $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$ - que é desafiador devido ao alto nível de eventos de fundo - para no futuro ser implementado também o estudo de violação de CP neste canal.

Palavras-chave

Física de Charme; Violação CP; Anisotropia no Dalitz Plot; LHCb;

Abstract

Molina, Josué; Mello, Carla Göbel Burlamaqui de (Advisor). **Search for CP violation in three body hadronic charmed decays**. Rio de Janeiro, 2011. 119p. MSc Dissertation — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The LHCb is one of the LHC (Large Hadron Collider) experiments that has as main purpose the study of the charge parity (CP) symmetry violation phenomena, which is related to the matter and antimatter asymmetry in the universe. It is known, however, that the magnitude of the asymmetry as predicted by the Standard Model (SM) is not enough to explain the one observed, which suggests that there must be other sources of CP violation through a new physics. This dissertation presents a study of the search for CP violation in three bodies decays of the meson D. For these mesons, the Standard Model predictions indicate very small effects - asymmetries not greater than 0.1%. However, effects of new physics predict asymmetries larger than 1%, which makes the search for CP violation in this sector an attractive problem. This analysis, done with the data obtained by the LHCb detector during the year 2010, is based on the comparison of the distribution of events in the physical region of phase space for D^+ and D^- , called the Dalitz plot. In particular, we looked for effects of CP violation in the channel $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ -where the Standard Model predicts a small but nonzero asymmetry- based on the study of control channels (where the SM predicts null CP violation) $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ and $D_s^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$. With the statistics of 2010, corresponding to about 400 000 events for D^+ and D^- in $KK\pi$, we found no evidence of CP violation. It is also presented an initial study of selection for the channel $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$ - which is challenging due to the high level of background events - to be implemented in a future study of CP violation in this channel.

Keywords

Charm Physics; CP Violation; Dalitz plot Anisotropy; LHCb;

Sumário

1	Introdução	13
2	O Modelo Padrão	17
2.1	Simetrias	19
2.1.1	Paridade	20
2.1.2	Conjugação de Carga	22
2.1.3	Inversão Temporal	23
2.2	Violação de Carga e Paridade	24
2.3	Violação de CP no Modelo Padrão	27
2.3.1	Mecanismos de Violação de CP em Charme	31
2.3.2	Mésons Charmosos e Violação de CP	34
3	Decaimentos Hadrônicos de Charme em Três Corpos	38
3.1	Limites Cinemáticos e Dalitz Plot	39
3.2	Métodos para busca de Violação de CP em 3 Corpos	43
3.2.1	Modelo Isobárico	43
3.2.2	Anisotropia no Dalitz plot	47
3.3	Violação de CP no canal $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	49
3.3.1	Resultados do CLEO para busca de Violação CP em $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$	50
3.3.2	Resultados para $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	50
4	O Experimento LHCb	52
4.1	Os Experimentos do LHC	54
4.2	O Detetor LHCb	55
4.3	Reconstrução de Trajetórias	56
4.3.1	O Magneto	56
4.3.2	Sistema de Traços	57
4.4	Identificação de Partículas	60
4.4.1	RICH	60
4.4.2	Sistema de Calorímetros	61
4.4.3	Sistema de Múons	63
4.5	Sistema de Trigger	65
4.5.1	Trigger Nível 0	65
4.5.2	Trigger de Alto Nível HLT	66
4.6	Sistema de Seleção Online	67
4.7	Sumário	68
5	A Seleção das Amostras $D^\pm \rightarrow h^\mp h^\pm h^\pm$	69
5.1	Condições de Tomada de Dados em 2010	70
5.2	Trigger	70
5.2.1	L0	71
5.2.2	Hlt1	72
5.2.3	Hlt2	73

5.3	Principais Variáveis Para a Seleção de Dados	75
5.3.1	Stripping $D^\pm \rightarrow h^\mp h^\pm h^\pm$	77
5.4	A Seleção final dos canais $D^\pm \rightarrow h^\mp h^\pm h^\pm$	80
5.4.1	Seleção do canal de controle $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	81
5.4.2	Seleção dos canais $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$	83
5.4.3	Seleção do canal de estudo $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	85
6	Busca de Violação de CP em $D^\pm \rightarrow h^\mp h^\pm h^\pm$	93
6.1	Simulação de Violação de CP	94
6.2	Estudo dos Canais de Controle e Background	101
6.2.1	Busca de Assimetrias no Canal de Controle $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	101
6.2.2	Busca de Assimetrias no Canal de Controle $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$	102
6.2.3	Busca de Assimetrias no Background do espectro $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	104
6.3	Resultados	106
6.3.1	Resultados Para o Decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$	106
6.3.2	Perspectivas Para o Canal $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	109
7	Conclusões	110

Lista de figuras

2.1	Triângulo unitário de CKM.	33
2.2	Diagramas de Feynman para o decaimento de mésons charmosos.	39
2.3	Detalhe do diagrama pinguim.	39
2.4	Diagramas árvore e pinguim para o decaimento $D^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$.	40
3.1	Limites do Dalitz plot	44
3.2	Dalitz plot	49
3.3	Mirandizing $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$	51
3.4	Diagramas árvore-Pinguim	52
4.1	Localização dos experimentos no LHC	58
4.2	Vista lateral do LHCb	59
4.3	Visão esquemática do magneto do LHCb	60
4.4	Geometria dos sensores do VELO.	61
4.5	Tracker Turincensis	62
4.6	Estações de traços T1-T3.	62
4.7	Gráficos da distribuição de momentos do RICH	64
4.8	RICH 1 e RICH 2	65
4.9	Sistema de Múons	66
4.10	Sistema de Seleção Online	71
5.1	Luminosidade integrada ao longo do tempo	73
5.2	Topologia do processo de produção do méson D e seu decaimento $D \rightarrow K \pi \pi$.	78
5.3	Espectro de massa do canal de controle $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ na saída da Stripping	82
5.4	Espectro de massa dos decaimentos $D^\pm(D_s^\pm) \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ na saída da Stripping	82
5.5	Espectro de massa dos decaimentos $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ na saída da Stripping	83
5.6	Ajuste da janela de massa para o decaimento $D \rightarrow K \pi \pi$	85
5.7	Ajuste da janela de massa para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.	87
5.8	Espectro de massa para o decaimento $D \rightarrow \pi \pi \pi$.	89
5.9	Distribuição de variáveis de D em 3 pi	90
5.10	Distribuição de variáveis para aplicar TMVA	91
5.11	Gráfico da rejeição de ruído em função da eficiência no sinal para os classificadores do TMVA.	93
5.12	Espectro de massa após aplicação do TMVA para $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$.	94
5.13	Espectro de massa após aplicação do TMVA para $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ com valor BDT > 0.2.	95
6.1	Amostra com 500K eventos que representa o padrão dos decaimentos apenas com flutuação estatística.	102

6.2	Simulações de VCP	103
6.3	Resultados Para $D \rightarrow K\pi\pi$	105
6.4	Resultados Para $D_s \rightarrow KK\pi$	107
6.5	Resultados de Mirandizing para o background de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$	108
6.6	Resultados de Mirandizing para o background de $D \rightarrow \pi\pi\pi$	109
6.7	Resultados do teste de assimetria para $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.	111

Lista de tabelas

2.1	Simetrias e as grandezas conservadas associadas a estas.	22
3.1	Expressões para os fatores de Blatt-Weisskopf e a distribuição angular em termos dos momentos (p_i, q_i) , as massas invariantes e os valores mostrados na tabela 3.2.	47
3.2	Valores das constantes a_1 , a_2 e a_3 para as expressões da tabela 3.1.	48
3.3	Representação do ajuste conjunto para as amplitudes de D^+ e D^- no modelo CLEO-c.	48
3.4	CLEO fit	53
3.5	Resultados do ajuste isobárico das ressonâncias para decaimento $D \rightarrow \pi\pi\pi$ feito pela colaboração CLEO. Para cada contribuição a magnitude relativa, fase e fração do ajuste é fornecida. Os erros são, nesta ordem, estatísticos e sistemáticos.	54
3.6	Sumário das medições de assimetria CP para os decaimentos $D^\pm \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ e $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$.	54
4.1	Resumo com as condições de rodada do LHC para 2010.	55
5.1	Resumo com os valores dos cortes utilizados na decisão de trigger HLT1TrackAllL0.	76
5.2	Cortes Nas Partículas Filhas.	81
5.3	Cortes Nas Combinações dos Traços antes do ajuste (pre-fit).	81
5.4	Cortes no candidato a D.	83
5.5	Sumário dos requerimentos de trigger para as três amostras de dados usadas em 2010.	85
5.6	Tabela com cortes nas variáveis para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.	86
5.7	Cortes lineares aplicados às variáveis da amostra do decaimento $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$	88
5.8	Cortes nos classificadores do TMVA.	92
5.9	Amostra final com o número total de eventos da stripping 12 para usar nas análises. Para $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ e $D_s^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ usaram-se apenas as amostras 1 e 3 com ambas as polaridades do magneto.	92
6.1	Magnitudes e fases relativas para D^+/D^- .	100
6.2	Resultados dos testes de Mirandizing para algumas simulações de violação de CP.	101
6.3	Resultados da análise para $D \rightarrow K\pi\pi$.	106
6.4	Resultados da análise para $D_s \rightarrow KK\pi$.	106
6.5	Resultados da análise para as laterais de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.	108
6.6	Resultados da análise na região de background de $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$.	108
6.7	Resultados finais da análise para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.	111
6.8	Resultados dos testes de Mirandizing para uma binagem de 20×20 , para o decaimento $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.	111

- 6.9 Testes de Mirandizing para várias binagens e combinações do magneto para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$. 112

*Por quê existe simplesmente o ser e não antes
o nada?*

*M. Heidegger
Introdução à Metafísica*