



**Juan Martin Otálora Goicochea**

**Análise de Amplitudes do decaimento  
 $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$  no experimento FOCUS**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção Do título de Doutor em Física

Orientador: Prof. Carla Göbel Burlamaqui de Mello

Rio de Janeiro  
Julho de 2007



**Juan Martin Otálora Goicochea**

**Análise de Amplitudes do decaimento  
 $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$  no experimento FOCUS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção Do título de Doutor em Física. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Carla Göbel Burlamaqui de Mello**

Orientador

Departamento de Física — PUC-Rio

**Prof. Marina Nielsen**

IF-USP

**Prof. Jussara Marques de Miranda**

CBPF

**Prof. Miriam Mendes Gandelman**

IF-UFRJ

**Prof. Ronald Cintra Shellard**

CBPF e PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de Julho de 2007

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

### Juan Martin Otálora Goicochea

Graduou-se em Engenharia Eletrônica na Pontifícia Universidad Católica del Perú (Lima, Perú). Trabalhou junto a diferentes empresas peruanas (D'onfrio, Solgas, BDO Compandina, Buenaventura, Visatech) realizando Desenvolvimento e Análise de Sistemas de Informação. Realizou o Mestrado em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro na Área de Telecomunicações no Centro de Telecomunicações (CETUC). Trabalhou como Engenheiro de Pesquisa no CETUC. Culminou o Mestrado em Administração de Empresas e Negócios na Fundação Getúlio Vargas. Desenvolveu junto com a sua orientadora de Doutorado ferramentas para o Análise do Decaimento do Meson  $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ .

#### Ficha Catalográfica

Otálora Goicochea, Juan Martin

Análise de Amplitudes do decaimento  $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$  no experimento FOCUS / Juan Martin Otálora Goicochea; orientadora: Carla Göbel Burlamaqui de Mello. – 2007.

145 f.: il.(col.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Física) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Física – Tese. 2. Física de partículas. 3. Mésons Charmosos. 4. Modelo isobárico. 5. FOCUS. 6. Análise de amplitudes. I. Göbel, Carla. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

## Agradecimentos

À minha família, em especial à minha filha Gabriela.

À minha orientadora Professora Carla Göbel pelo apoio, amizade, e incentivo para a realização deste trabalho.

Aos colegas da Colaboração FOCUS pela imensa ajuda, em particular John Cumalat, Kevin Stenson e Alberto Reis.

A todos os meus amigos da PUC-Rio, CBPF e UFRJ entre professores, alunos e funcionários.

À Capes, CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Otálora Goicochea, Juan Martin; Göbel, Carla. **Análise de Amplitudes do decaimento  $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$  no experimento FOCUS**. Rio de Janeiro, 2007. 145p. Tese de Doutorado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho de tese é destinado ao estudo do decaimento do méson  $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$  com dados coletados pelo experimento FOCUS do Fermilab. O estado final, composto por 4 mésons pseudo-escalares, pode ser alcançado através de uma considerável variedade de sub-estruturas ressonantes. O propósito da análise é encontrar quais são estes possíveis canais intermediários através de suas contribuições e fases relativas. Para tanto, é utilizado o formalismo de Análise de Amplitudes usando o chamado Modelo Isobárico. A dinâmica do decaimento é definida através de uma função que contém as características (formas funcionais das ressonâncias, distribuição angular, etc) dos canais que intervêm no decaimento e cujo domínio é um espaço de fase determinado por 5 invariantes (devido às restrições de decaimento em quatro corpos sem spin). A função é então ajustada ao conjunto de dados coletados.

Nos resultados, verificamos uma grande contribuição do méson vetor-axial  $a_1(1260)$  (52%) seguido do vetor-axial  $K_1(1400)$  (34%). Além disso, o modelo apresenta contribuição da ressonância  $\sigma$  (cerca de 8%, vinda de  $a_1(\sigma\pi)K_S$  e  $\sigma K_S\pi$ ) e uma razoável contribuição da ressonância escalar  $\kappa^-$  (14%). O estado  $\kappa$  já foi visto em seu modo neutro em outros decaimentos de charme, porém ainda não em seu modo carregado. Não encontramos contribuição significativa do decaimento direto em 4 corpos (não-ressonante). Esta tese vem se somar ao esforço no entendimento da dinâmica das interações fortes a baixas energias, que nos últimos anos tem ganhado da física de mésons charmosos uma importante contribuição.

## Palavras-chave

Física de partículas. Mésons Charmosos. Modelo isobárico. FOCUS. Análise de amplitudes.

## Abstract

Otálora Goicochea, Juan Martin; Göbel, Carla. **Amplitude Analysis of the Decay  $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$  in FOCUS experiment.** Rio de Janeiro, 2007. 145p. PhD Thesis — Department of Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis is devoted to the study of the decay  $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$  with data collected from the FOCUS experiment, at Fermilab. The final state composed of 4 pseudo-scalars can be produced through a number of resonant sub-structures. The purpose of this analysis is to find the contributing intermediate states by measuring their relative strengths and phases. For that, the Amplitude Analysis formalism is used, with the so-called Isobar Model. The decay dynamics is described through a function which has the features of the contributing channels (functional forms of the resonances, angular distribution, etc) and which domain is a phase space determined by 5 invariants (due to the kinematical constraints of a 4-body spinless decay). The data sample is thus fitted to this function.

Our results show a dominant contribution of the axial-vector meson  $a_1(1260)$  (52%), followed by the  $K_1(1400)$  axial-vector (34%). Moreover, the model presents a contribution from the  $\sigma$  meson (about 8% as  $a_1(\sigma\pi)K_S$  and  $\sigma K_S\pi$ ) and a significant contribution from the scalar  $\kappa^-$ . The  $\kappa$  state has been reported in its neutral mode in other charm decays but not in its charged mode. We find no significant contribution from the direct 4-body decay (non-resonant). This work adds to the effort in the understanding of the strong-interaction dynamics at low energies, which in recent years have been receiving an important contribution from charm meson physics.

## Keywords

High Energy Physics. Charm Mesons. FOCUS Experiment. Amplitude Analysis.

# Sumário

1	Introdução	15
1.1	O Modelo Padrão	17
1.2	Os Mésons Charmosos	19
1.3	Mésons Escalares em Decaimentos de Charme	23
2	Formalismo de Análise	25
2.1	O Espaço de Fase	25
2.2	Decaimentos Ressonantes e Não-Ressonantes	27
2.3	O Modelo Isobárico	31
2.4	Aplicando o Modelo Isobárico aos Modos Ressonantes do Decaimento	35
2.5	A Amplitude Total	40
2.6	Resultados Anteriores	41
3	Experimento E831/FOCUS	44
3.1	A Linha de Feixes	45
3.2	O Feixe de Prótons	45
3.3	O Feixe de Fótons	47
3.4	O Alvo	47
3.5	Os Detectores de Tiras de Silício	48
3.6	Os Magnetos de Análise	51
3.7	As Câmaras Proporcionais Multifilares (MWPC's)	51
3.8	Os Contadores Čerenkov	52
3.9	Os Calorímetros	56
3.10	Os Detectores de Múons	57
3.11	O Sistema de <b>Trigger</b>	58
3.12	O <i>Trigger</i> do Primeiro Nível: Master Gate	59
3.13	O <i>Trigger</i> do Segundo Nível	61
4	Reconstrução de Dados	63
4.1	Reconstrução de Trajetórias ( <i>Tracking</i> )	63
4.2	Determinação de Momento	67
4.3	Identificação de Partículas pelo Algoritmo de Čerenkov	68
4.4	Determinação de Vértices ( <i>Vertexing</i> )	70
4.5	Reconstrução de Vês	71
5	Seleção da Amostra	76
5.1	Seleção-1	77
5.2	Identificação, Filtragem, Armazenamento e Transferência de Dados	77
5.3	Otimização de Cortes	81
5.4	O <i>Background</i>	82
5.5	Ajuste do espectro de massa	89
5.6	Simulação de Eventos: Monte Carlo ROGUE e FastMC	91
5.7	Modelo para a Aceptância	92

6	O Método de Ajuste	<b>95</b>
6.1	p.d.f. do Sinal	95
6.2	O Ajuste por Máxima Verossimilhança	97
6.3	Considerações nos Cálculos	99
6.4	A Forma da Largura dos Vetores Axiais	102
6.5	Teste de Consistência do Algoritmo de Ajuste	103
6.6	Avaliando a Qualidade do Ajuste	104
7	Resultados	<b>106</b>
7.1	Resultados do Ajuste	106
7.2	Estimativa dos Erros Sistemáticos	114
8	Conclusões	<b>122</b>
	Referências Bibliográficas	<b>124</b>
A	O Ambiente do Programa de Ajuste	<b>127</b>



## Lista de figuras

- 1.1 Diagramas de decaimento dos mésons charmosos. (a) Espectador Externo, (b) Espectador Interno, (c) Aniquilação, (d) Troca, (e) Pinguim e (f) Mistura. 20
- 1.2 Diagramas de Feynman do decaimento do méson  $D^+$ . (a) O quark  $c$  se acopla com o quark  $s$  e o quark  $u$  se acopla com o quark  $d$  (Favorecido por Cabibbo). (b) O quark  $c$  se acopla com o quark  $s$  e o quark  $u$  se acopla com o quark  $s$  (Suprimido por Cabibbo). (c) O quark  $c$  se acopla com o quark  $d$  e o quark  $u$  se acopla com o quark  $d$  (Suprimido por Cabibbo). (d) O quark  $c$  se acopla com o quark  $d$  e o quark  $u$  se acopla com o quark  $s$  (Duplamente Suprimido por Cabibbo). 22
- 2.1 Decaimentos de 4 Corpos. (a) decaimento não-ressonante. (b), (c), (d) e (e) decaimentos ressonantes. (b) três decaimentos de dois corpos sucessivos. (c) um decaimento de três corpos seguido de um decaimento de dois corpos. (d) um decaimento de dois corpos seguido de dois decaimentos de dois corpos. (e) um decaimento de dois corpos seguido de um decaimento de três corpos. 27
- 2.2 Diagramas correspondentes ao modo Favorecido por Cabibo para o decaimento  $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ . 30
- 3.1 Esquema do espectrômetro do experimento E831/FOCUS 44
- 3.2 Os átomos de hidrogénio são ionizados negativamente no *Cockreft-Walton*. Depois são acelerados no *Linac* e os elétrons são impedidos, injetando os prótons dentro do *Booster*. O *Booster* então acelera os prótons até 8 GeV e injeta eles no *Main Ring*. O *Main Ring* acelera os prótons até 150 GeV e depois os injeta no *Tevatron*. O *Tevatron* que contem 100 magnetos super-condutores acelera os prótons até 1 TeV antes de serem enviados para a Área de alvo fixo. 46
- 3.3 Etapas para a obtenção do feixe de fótons. 48
- 3.4 Distribuição da coordenada  $z$  dos vértices primário e secundário para eventos de charme limpos de *background*. A distribuição do vértice primário (pontos pretos) mostra a localização dos segmentos do alvo e das estações TSSD (observe-se que uma pequena fração dos eventos é produzida na região ativa de detecção de trajetória). A distribuição do vértice secundário (pontos cinzas) mostra como a maioria dos eventos ocorre fora do material. 49
- 3.5 Esquema do início do sistema de *tracking*. Os alvos, os dois TSSD, as quatro estações SSD e os cintiladores TR1 e TR2, utilizados como *trigger*. 50
- 3.6 Topologia da distribuição geométrica de um evento  $e^+e^-$ . 52
- 3.7 Orientação das vistas das MWPC's. P0 e P3 são do tipo 1 e P1, P2 2 P4 do tipo 2. As diferenças entre as MWPC de tipo 1 e tipo 2 são mostradas na figura. 53

3.8	Esquema da Radiação Čerenkov.	54
3.9	C1: células 1-40 (região externa) espelhos esféricos, 41-90 (região interna) espelhos planos. C2: células 1-54 (região interna), 55-110 (região externa) espelhos esféricos. C3: todas as células usam espelhos esféricos.	55
3.10	Vista esquemática do Calorímetro Hadrônico.	57
3.11	Esquema da configuração de HV (a) e OH (b).	60
4.1	Representação da passagem de um partícula carregada pelo PWC.	64
4.2	Percentual de acendimentos aleatórios versus o número da célula em C2. Para células que se encontram localizadas perto do feixe a taxa é de aproximadamente 40 %.	69
4.3	Distribuição de $W_\pi - W_K$ para káons e píons em eventos gerados por simulação Monte Carlo para duas faixas de momento.	70
4.4	Ilustração da topologia de um Vê para o decaimento $K_S^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ . A linha tracejada denota a partícula neutra não observada e as linhas sólidas representam os dois píons carregados.	72
4.5	Diferentes tipos de decaimentos de Vês.	73
5.1	Histograma de massa $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ após o processo de seleção inicial.	80
5.2	Histograma da projeção $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$	83
5.3	Região de baixa massa e alta massa para o estudo da estrutura do <i>background</i> combinatorial.	84
5.4	Projeções de massas invariantes para estudo do <i>background</i> combinatorial na região de baixa massa.	85
5.5	Projeções de massas invariantes para estudo do <i>background</i> combinatorial na região de alta massa.	86
5.6	Espectro da projeção de massa $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ dos eventos de <i>background</i> charmoso que passaram o processo de seleção. (a) $D_s^+ \rightarrow K^{*+} \bar{K}^{*0}$ , (b) $D_s^+ \rightarrow K_S K^- \pi^+ \pi^+$ NR, (c) $D_s^+ \rightarrow K_S \pi^- K^+ \pi^+$ NR.	87
5.7	Função de ajuste do espectro $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ .	90
5.8	Esquema do cálculo da matriz acceptance.	93
5.9	Projeções unidimensionais da função acceptance.	94
5.10	Projeções em duas dimensões da função acceptance.	94
6.1	Um decaimento de dois corpos no primeiro nível seguido de dois decaimentos de dois corpos no segundo nível.	99
6.2	Forma da Largura do vetor-axial $a_1(1260)$ . São realizadas varias iterações até obter estabilidade	103
7.1	Projeções de massas invariantes para os Resultados obtidos pela aplicação do Algoritmo de Ajuste ao modelo MARK III.	107
7.2	Projeções de massas invariantes para os Resultados obtidos pela aplicação do Algoritmo de Ajuste ao Modelo Central.	111
7.3	Projeções de massas invariantes para os resultados obtidos para o Modelo sem o Canal $\kappa^-$ (Projeções que ficam mais comprometidas com a retirada do $\kappa^-$ ).	113
A.1	Janela principal do programa.	127

A.2	Opções do menú <i>Data</i> .	128
A.3	Opções do menú <i>Process</i> .	128
A.4	Opções do menú <i>Other</i> .	129
A.5	Janela de filtragem de dados e de ajuste de dados.	130
A.6	Histograma da massa do $D^+$ .	131
A.7	Janela de entrada de cortes da opção <i>PlotCuts</i> .	131
A.8	histograma da massa do $D^+$ depois de aplicar os cortes.	132
A.9	janela de entrada de parametros de ajuste da massa do $D^+$ .	132
A.10	Resultado do ajuste de dados.	133
A.11	Janela de saída de parametros de ajuste da massa do $D^+$ .	133
A.12	Janela de ajuste de dados.	134
A.13	Janela de Geração de FastMC.	135
A.14	Fórmula da Amplitude de Lorentz.	135
A.15	Fórmula do Fator de Forma.	136
A.16	Resultados do ajuste de dados.	136
A.17	Parâmetros do histograma da massa do méson $D^+$ .	137
A.18	Configuração de parâmetros das partículas.	137
A.19	Forma da largura do vector axial $a_1(1260)$ .	138
A.20	Janela de comparação de histogramas.	139
A.21	Comparação de Histogramas da massa $K_S\pi^-$ .	140
A.22	Histograma 2D da massa $\pi^-p\pi^+$ vs $K_S\pi^-$ (Dados).	141
A.23	Histograma 2D da massa $\pi^-p\pi^+$ vs $K_S\pi^-$ (FastMC)..	141
A.24	Janela de manipulação de dados de Tree.	142
A.25	Estudo do <i>background</i> charmoso. São obtidos BR, eficiência e número de eventos.	143
A.26	Função de ajuste e histograma do <i>background</i> charmoso.	143
A.27	Janela de criação da matriz acceptância.	144
A.28	Projeção $\pi^+\pi^+$ da matriz acceptância.	144
A.29	Janela de cálculo de $\chi^2$ .	145
A.30	Resultados do cálculo $\chi^2$ para o modelo final.	145

## Lista de tabelas

2.1	Possíveis Estados Intermediários.	28
2.2	Lista de Ressonâncias Conhecidas.	28
2.3	Valores de massa e largura nominais de algumas ressonâncias. Os valores são tirados do PDG [31] com exceção do $\sigma$ [20] e $\kappa$ [22], cujos parâmetros vêm do experimento E791.	33
2.4	Massa e largura nominais dos vetores-axiais considerados, segundo o PDG .	34
2.5	Fatores de Forma para os diferentes momentos angulares relativos. Para $J = 0$ , usa-se o fator de forma de Tornqvist e para $J = 1$ ou $J = 2$ usa-se o fator de forma Blatt-Weisskopf. $r_X$ é o raio efetivo da partícula X	34
2.6	Canais de decaimento $D^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ MARK III.	41
2.7	Resultados obtidos pela Colaboração FOCUS no estudo decaimento $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ .	43
3.1	Características do SSD: AR, área de alta resolução. BR área de baixa resolução.	50
3.2	Características dos magnetos M1 e M2.	51
3.3	Características dos contadores Čerenkov.	54
3.4	Limiares de momento para identificação de partículas.	55
3.5	Lógica dos sete <i>triggers Master Gates</i> . Os Master Gates denotados como (PS) são usados para calibração. O termo $2B$ é usado para $(H \times V)_2 + [(H \times V)_1 \cdot OH_1]$ .	61
3.6	Lógica para diferentes <i>triggers</i> de segundo nível que foram usados durante o <i>tracking</i> de dados.	62
5.1	Definição de variáveis relevantes.	78
5.2	Cortes para os candidatos a $K_S$ 's .	79
5.3	Critério de prioridade na escolha de $K_S$ 's que compartilham um mesmo traço.	79
5.4	Cortes para os candidatos a $\pi$ 's .	80
5.5	Limiares de Otimização de Cortes para o Decaimento $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ .	81
5.6	Cortes Ótimos para o decaimento $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ .	82
5.7	Parâmetros obtidos pelo ajuste no espectro $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ .	88
5.8	Número de eventos para o <i>background</i> charmoso na janela de massa de 1.731-1.981.	89
5.9	Parâmetros do Ajuste do Espectro $K_S \pi^- \pi^+ \pi^+$ .	91
6.1	Resultado do teste de consistência do algoritmo de ajuste	104
7.1	Resultados obtidos para o modelo Mark III	108
7.2	Modelo Central (10 Canais) vs. Modelo de 13 Canais	109
7.3	Modelo Central + Canal Não-Ressonante	112
7.4	Modelo Central vs. Modelo sem $\kappa^-$	113
7.5	Modelo Central vs. Modelo sem $\sigma$	114

7.6	Cortes Fortes e Fracos para o decaimento $K_S\pi^-\pi^+\pi^+$ .	116
7.7	Erros Sistemáticos Tipo Divisões da Amostra	117
7.8	Erros Sistemáticos do Experimento	118
7.9	Valores de massa e largura a serem considerados na análise de efeitos sistemáticos para as ressonâncias $a_1(1260)$ , $\kappa^-$ e $\sigma^0$	119
7.10	Erros Sistemáticos por Variações no Modelo.	120
7.11	Resultado do Ajuste do Modelo Central. O primeiro erro é estatístico, o segundo é sistemático devido ao experimento, o terceiro é sistemático devido a variações no modelo.	121

*–Quem um dia ira dizer que não existe razão  
nas coisas feitas pelo coração. E quem irá  
dizer*

**Renato Russo, Eduardo e Mônica.**