



# DECAIMENTOS HADRÔNICOS DE TRÊS CORPOS: UMA SIMULAÇÃO DO PROCESSO $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$

**Palavras-Chave:** FÍSICA DE PARTÍCULAS, DECAIMENTO DE 3 CORPOS, DALITZ PLOT.

**Autoras:**

Karolainy Martins Figueira, IFGW – Unicamp  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Patrícia Camargo Magalhães (orientadora), IFGW – Unicamp

---

## INTRODUÇÃO

A física de partículas hadrônica estuda os hádrons, partículas formadas por quarks. Essas partículas podem formar mésons, compostos por um quark e um antiquark, ou bárions, compostos por três quarks ou três antiquarks [1]. Um dos grandes mistérios da física moderna é a assimetria entre matéria e antimatéria no universo, que, segundo a teoria do Big Bang, teriam sido criadas em quantidades iguais.

Uma possível explicação para essa predominância da matéria passa necessariamente por novas fontes de violação da simetria de carga e paridade (CP), que relaciona a matéria a antimatéria. Essa violação foi observada em experimentos que estudam os decaimentos de mésons, como os do tipo D, investigados em experimentos como o LHCb (Large Hadron Collider beauty) no CERN. Por isso, o estudo desses decaimentos é uma ferramenta importante para investigar a origem da assimetria matéria-antimatéria e possíveis falhas ou extensões do Modelo Padrão.

Este trabalho tem como objetivo estudar o decaimento  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  por meio da construção do espaço de fase utilizando o modelo isobárico. A partir da análise dos estados intermediários ressonantes e da interferência entre eles, representados em diagramas de Dalitz, espera-se compreender melhor o comportamento desse decaimento e suas implicações para a física de partículas.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os decaimentos de três corpos podem ocorrer de duas formas: diretamente ou por meio de estados intermediários ressonantes, como ilustrado na Figura 1. No decaimento direto, a partícula mãe decai em três partículas filhas de forma “imediate”. Já no decaimento ressonante, a partícula mãe decai inicialmente em uma partícula e em um estado intermediário instável (ressonância), que posteriormente decairá em duas outras partículas, resultando no mesmo estado

final do decaimento direto. O espaço de fase leva em conta tanto o canal direto quanto os possíveis estados intermediários ressonantes, permitindo a análise das interferências entre esses diferentes caminhos de decaimento.

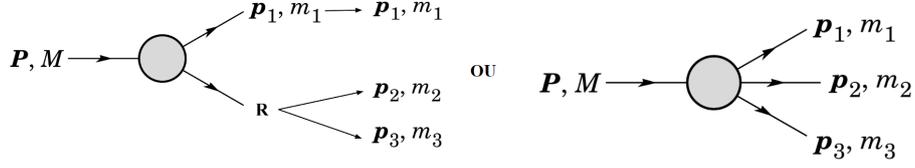


Figura 1: Adaptado de [2]

A taxa de decaimento é descrita pela equação 1:

$$d\Gamma = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{32m^3} |\mathcal{M}|^2 ds_{12} ds_{23}, \quad (1)$$

onde  $\mathcal{M}$  representa a amplitude invariante do decaimento, que encapsula toda a dinâmica do processo, e  $s_{12}$  e  $s_{23}$  são as variáveis de Dalitz utilizadas na análise do decaimento de três corpos.

O diagrama de Dalitz, é um gráfico bidimensional, que contempla o espaço de fase do decaimento de partículas de spin 0. Para construir esse diagrama, faz-se uso de variáveis puramente cinemáticas, mas, por meio da análise do gráfico, é possível obter informações sobre a dinâmica do processo, evidenciadas pela presença de ressonâncias. As variáveis utilizadas são construídas a partir da conservação de energia e momento. São elas:

$$s_{12} = m_{12}^2 = (p_1 + p_2)^2 = (p - p_3)^2, \quad (2a)$$

$$s_{23} = m_{23}^2 = (p_2 + p_3)^2 = (p - p_1)^2, \quad (2b)$$

$$s_{31} = m_{13}^2 = (p_3 + p_1)^2 = (p - p_2)^2. \quad (2c)$$

onde  $p$  é o quadrimomento da partícula que decai (neste caso  $D^+$ ) e  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$  são os quadrimomentos das partículas no estado final ( $K^-$ ,  $\pi^+$  e  $\pi^+$ )

Para descrever o decaimento, é usado o modelo isobárico, que representa o processo como uma soma coerente de amplitudes associadas a cada termo ressonante e não ressonante (decaimento direto). A expressão da amplitude de probabilidade é dada pela equação 3.

$$\mathcal{M}(s_{ij}, s_{jk}) = a_{\text{NR}} e^{i\phi_{\text{NR}}} + \sum_r a_r e^{i\phi_r} BW_r(s_{ij}) \cdot P_L(\cos \theta), \quad (3)$$

onde  $a_{\text{NR}}$  e  $a_r$  são as magnitudes dos termos não ressonantes e ressonantes,  $\phi_r$  é a fase relativa entre cada termo, responsável pelas interferências construtivas e destrutivas,  $BW_r(s_{ij})$  é a função que modela a forma da ressonância e o termo  $P_L(\cos \theta)$  é o polinômio de Legendre de ordem  $L$  que encapsula os efeitos do spin  $L$  de cada ressonância.

## METODOLOGIA

As simulações foram inicialmente desenvolvidas no ambiente Python, e posteriormente migradas para o ambiente ROOT [3], onde também foi feito o ajuste dos parâmetros da amplitude: magnitude e fase. O ambiente ROOT junto da biblioteca GooFit [4] permite ajustes de verossimilhança mais precisos e eficientes, uma vez que a biblioteca possui funções específicas para a análise de decaimentos de 3 corpos através dos diagramas de Dalitz.

As simulações feitas no Python, começaram com fases relativas nulas entre as ressonâncias. Nessa configuração, o diagrama de Dalitz reflete apenas as contribuições modulares. Em seguida, o valor das fases foram incluídas com base no artigo da colaboração FOCUS [5], revelando padrões de interferência entre os canais e mostrando como essas fases são fundamentais para representar o comportamento físico real do decaimento. Foram feitas também simulações separadas com ressonâncias de spin 0, 1 e 2, o que permitiu observar como cada uma afeta o espaço de fase. As simulações foram feitas via o método de Monte Carlo.

No ambiente ROOT, novas simulações foram realizadas, e os ajustes das fases e magnitudes foram feitos usando dados simulados [6] que foram gerados a partir de um modelo fitado aos dados recentes da colaboração LHCb, mas que ainda não são públicos. Esses dados simulados reproduzem fielmente os resultados experimentais da colaboração FOCUS, como mostra a Figura 2, e possuem um volume maior, permitindo uma análise mais detalhada. Nessa análise foram considerados como dados experimentais reais.

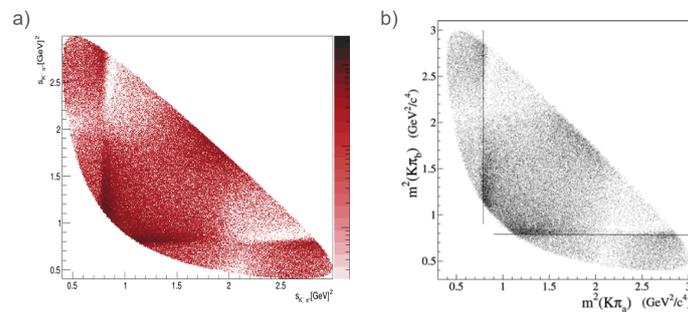


Fig. 3. The  $K^- \pi^+ \pi^-$  Dalitz plot.

Figura 2: Em a) diagrama de Dalitz dos dados simulado e em b) diagrama de Dalitz retirado do artigo da colaboração FOCUS [5].

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os diagramas de Dalitz simulados inicialmente no Python mostram claramente a importância da fase relativa entre as ressonâncias. Quando as fases foram nulas, o padrão do diagrama apresentou apenas as contribuições modulares das amplitudes, como na Figura 3-a. Já ao incluir as fases relativas extraídas do artigo da colaboração FOCUS, surgiram interferências visíveis, resultando em um padrão que reproduz melhor a estrutura observada experimentalmente (Figura 3-b).

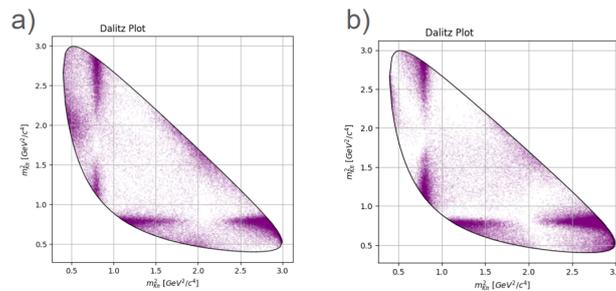


Figura 3: Em a) Dalitz sem fases, ou com fase igual a 0 e em b) Dalitz com fases do artigo da colaboração FOCUS

Simulações separadas considerando ressonâncias com spins específicos evidenciaram como o spin afeta o espaço de fase: ressonâncias escalares (spin 0) formam faixas uniformes, que podem ser mais suaves a depender da largura da ressonância; as vetoriais (spin 1) apresentam uma supressão central; e as tensoriais (spin 2) exibem duas regiões simétricas de supressão, compatíveis respectivamente com os polinômios de Legendre de ordem 1 ( $\cos \theta$ ) e ordem 2 ( $\cos^2 \theta$ ). Esses efeitos podem ser claramente observados nos diagramas da Figura 4. Tais resultados reforçam que a combinação de spins, magnitudes e fases é crucial para entender a forma e os padrões do diagrama de Dalitz.

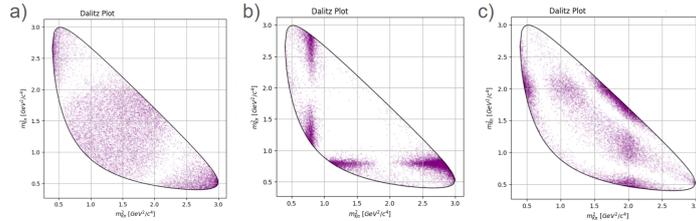


Figura 4: Dalitz plot evidenciando os efeitos do spin, com ressonâncias em a) com spin = 0, em b) com spin = 1 e em c) com spin = 2

No ambiente ROOT, ao comparar os diagramas de Dalitz gerados com GooFit e os simulados no Python, notou-se diferenças na simetria dos diagramas, como mostrado na Figura 5. Isso ocorre porque a biblioteca GooFit permite gerar diagramas simétricos, enquanto no Python as variáveis das ressonâncias em cada canal são independentes, gerando assimetrias. Apesar de ter sido possível reproduzir o resultado do Python no GooFit, os ajustes e análises foram realizados a partir do diagrama simétrico, que é o esperado pela literatura.

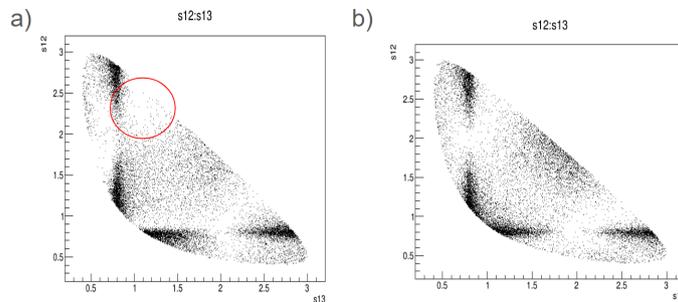


Figura 5: a) Resultado da simulação no Python, reproduzido no GooFit, em vermelho evidencia-se a assimetria entre a região superior e inferior do diagrama, em b) Dalitz simulado no GooFit, implementado simétrico.

Após os ajustes, um novo diagrama de Dalitz foi gerado (Figura 6-d), usando os valores atualizados de fase e magnitude. Observa-se que o espaço de fase ajustado reproduz bem os dados experimentais.

Para avaliar a qualidade do ajuste, analisou-se o Pull, que indica a proximidade do modelo com os dados. Nos gráficos da Figura 6 (a, b e c), os valores dos pares  $s_{ij}$  aparecem em azul e o ajuste em vermelho. Quando as curvas se sobrepõem, o Pull tende a zero, indicando um bom ajuste. De modo geral, as oscilações do Pull em torno de zero são pequenas para todos os pares, qualificando o ajuste como satisfatório. No entanto, algumas regiões apresentam oscilações maiores, indicando a necessidade de aprimorar o modelo, o que inclui dar mais liberdade aos parâmetros do ajuste, como os limites de massa e larguras das ressonâncias, para que o modelo possa se adequar melhor aos dados.

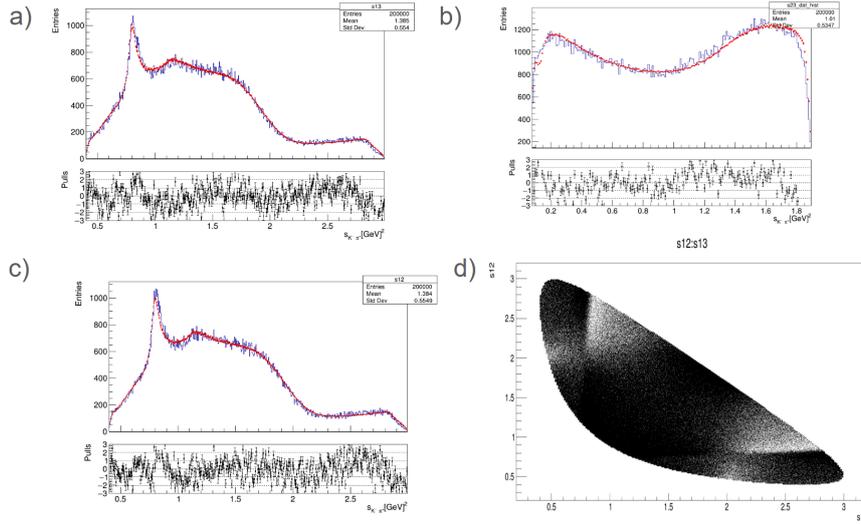


Figura 6: Ajuste das variáveis de Dalitz, em a)  $s_{13} = s_{K^-\pi_1^+}$ , em b)  $s_{23} = s_{\pi_1^+\pi_2^+}$  e em c)  $s_{12} = s_{K^-\pi_2^+}$ . Em d) Espaço de fase do decaimento  $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$  com fases e magnitudes ajustadas.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho, desenvolveu-se uma simulação do decaimento  $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$  utilizando o modelo isobárico para construir o diagrama de Dalitz, com foco na análise qualitativa dos efeitos dinâmicos de ressonâncias intermediárias. Através de implementações em Python e ROOT, foi possível observar os impactos das fases relativas, do spin das ressonâncias e da interferência entre canais no espaço de fase.

Os resultados obtidos mostram boa concordância com os dados experimentais reportados na literatura, sendo possível reproduzir o espaço de fase do decaimento a partir dos ajustes realizados. Espera-se, nas próximas etapas, investigar mais a fundo a implementação das simulações, com o objetivo de compreender melhor tanto a formação dos diagramas mais simétricos esperados quanto a origem de assimetrias inesperadas. Esses avanços podem contribuir para uma descrição mais precisa da estrutura do decaimento e de seus mecanismos dinâmicos.

## Referências bibliográficas

- [1] David Griffiths. *Introduction to elementary particles*. John Wiley & Sons, 2020.
- [2] S. Navas et al. “Review of particle physics”. Em: *Phys. Rev. D* 110.3 (2024), p. 030001. DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001.
- [3] ROOT Team. *ROOT: A Data Analysis Framework*. 2025. URL: <https://root.cern/>.
- [4] GooFit Team. *GooFit: A GPU-friendly framework for fitting and optimization*. 2025. URL: <https://goofit.github.io/>.
- [5] J. M. Link et al. “The  $K^- + S$ -wave from the  $D^+ \rightarrow K^- + \pi^+\pi^+$  decay”. Em: *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics* 681 (1 out. de 2009), pp. 14–21. ISSN: 03702693. DOI: 10.1016/j.physletb.2009.09.057.
- [6] Colaboração LHCb. *Pseudodados fornecidos internamente por membros da colaboração LHCb que investigam esse processo*. 2025.