

# INTRODUÇÃO À FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS: OS FUNDAMENTOS E AS FERRAMENTAS

**Aluno: Rafael Silva Coutinho**  
**Orientador: Carla Göbel Burlamaqui de Mello**

## Introdução

Durante muito tempo, se buscou identificar as partículas fundamentais e suas interações. Do ponto de vista teórico, foi possível descrever as interações forte, eletromagnética e fraca através das chamadas teorias de gauge renormalizáveis: a interação forte é descrita pela Cromodinâmica Quântica, enquanto que as forças eletromagnéticas e fracas são descritas conjuntamente pela Teoria Eletrofraca. Este conjunto de teorias ficou conhecido como Modelo Padrão e desde seu estabelecimento já predisse a existência de várias partículas e fenômenos. Do ponto de vista experimental, temos nos deparado com a construção de grandes aceleradores e detectores de partículas que possibilitaram várias descobertas e confirmações do Modelo Padrão. Nesse sentido, a Física de Partículas, ou Física de Altas Energias, se propõe a estudar os constituintes elementares da matéria e suas interações. As partículas elementares da matéria são os quarks e léptons, todos férmions de spin  $\frac{1}{2}$ . Existem 6 tipos (sabores) de quarks – *up* ( $u$ ), *down* ( $d$ ), *charm* ( $c$ ), *strange* ( $s$ ), *top* ( $t$ ), e *bottom* ( $b$ ) – e 6 tipos de léptons – o elétron ( $e$ ) e seu neutrino ( $\nu_e$ ), o múon ( $\mu$ ) e seu neutrino ( $\nu_\mu$ ) e o tau ( $\tau$ ) e seu neutrino ( $\nu_\tau$ ). Estes são agrupados em três famílias:

$$\begin{array}{l} \text{Quarks :} \\ \text{Léptons:} \end{array} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Os quarks não são observados individualmente, mas em grupos chamados hádrons. Os hádrons podem conter três quarks – os bárions -, ou são estados quarks-antiquark - os mésons. Exemplos de bárions são os prótons ( $uud$ ) e os nêutrons ( $udd$ ), e os mésons mais conhecidos são os píons, como  $\pi^+$  ( $u\bar{d}$ ). Os hádrons compostos por quarks mais pesados (segunda e terceira família) podem ser produzidos e estudados em experimentos de colisões a altas energias, levados a cabo nos grandes aceleradores em diversos países.

Dessa maneira, temos trabalhado em busca de familiarizar-nos tanto a nível conceitual como através da prática relacionada à análise de dados em física experimental.

## Objetivos

O objetivo deste projeto foi iniciar os primeiros estudos na área de Física de Partículas. Tal proposta teve duas linhas de abordagem. A primeira, mais teórica, visava adquirir os elementos fundamentais para o acercamento e entendimento da física das partículas elementares e suas interações. A segunda, mais prática e voltada para a área experimental, é o aprendizado de métodos computacionais atuais da área.

## Metodologia

Iniciou-se o projeto com a familiarização de alguns conceitos de relatividade restrita e mecânica quântica [1]. Utilizando esses conhecimentos, foram feitos cálculos em medidas de conservação do quadri-momento e energia para decaimento de partículas. Em seguida desenvolvemos estudos direcionados sobre a estrutura do Modelo Padrão das interações

fundamentais e suas partículas. Na física a simetria é representada como quando suas leis são válidas mesmo ocorrendo alterações no sistema, ou seja, invariância em qualquer tipo de transformação. Nesse sentido focamos nossos estudos nas simetrias das naturezas, em particular as simetrias discretas de Carga (C) e Paridade (P). A conjugação de Carga (C) seria a troca da partícula pela sua anti-partícula. Exemplos de conjugação de C poderia ser observada aplicando o operador C no fóton. Entretanto aplicando o mesmo operador em um neutrino canhoto obteríamos um anti-neutrino canhoto, porém, este não é observado na natureza representando um caso de não conservação da conjugação de carga. A inversão de Paridade (P) seria basicamente a inversão de coordenadas da partícula. Sabemos que a paridade é invariante em transformações eletromagnéticas e fortes, porém esta não se conserva na força fraca. O produto das simetrias C e P são conhecidos como Carga-Paridade (CP) e este é invariante mediante interação forte e eletromagnética. Foi observada em 1964 por James Cronin and Val Fitch a violação de CP em decaimentos fracos de káons neutros, que até então se acreditava ser uma simetria exata da natureza. Desde a primeira observação deste efeito, importantes esforços teóricos e experimentais têm sido feitos para entender sua origem. Isto está motivado pelas conseqüências fundamentais que este fenômeno tem no nosso entendimento da natureza: a violação CP define uma distinção absoluta entre a matéria e anti-matéria; é uma das condições necessárias para a geração dinâmica da assimetria barionica no universo; a violação de CP fornece um teste de base para o Modelo Padrão. A origem da violação de CP no Modelo Padrão é a Matriz Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) que representa uma matriz unitária que contém informações da mudança de sabor no decaimento fraco.

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{bmatrix}$$

Os nove elementos não são independentes, e a matriz é caracterizada por três parâmetros reais (ângulos de rotação) e uma fase complexa. É a presença deste parâmetro complexo que introduz a violação de CP de maneira natural dentro do Modelo.

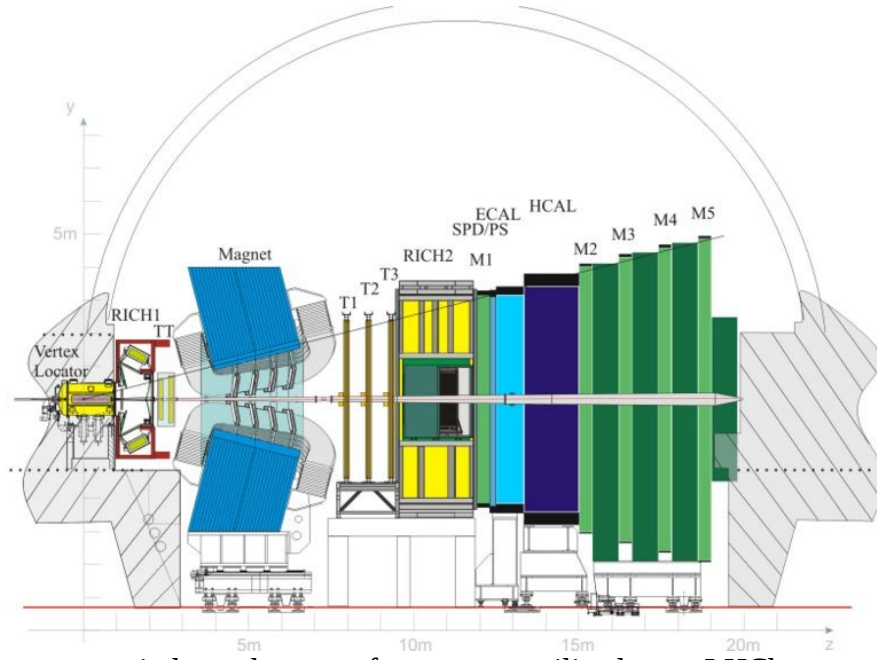
Paralelamente a isso, procuramos nos deparar com o caráter experimental da área iniciando o estudo em experimentos de altas energias principalmente em relação a detectores e aceleradores [2]. Para tanto, tivemos primeiro que analisar quais eram os mecanismos pelos quais isolamos partículas para utilizarmos nos experimentos. Além disso, ocorreu a investigação dos tipos de aceleradores e os principais métodos de detecção de partículas. Este processo ocorre primeiramente com a aceleração da partícula em uma trajetória linear até adquirir uma velocidade inicial em que ela é colocada numa trajetória circular enquanto outra partícula inicia este mesmo processo. Em certo instante de tempo as duas partículas colidem ocorrendo o evento na região do detector. De maneira geral, os aceleradores são equipamentos que fornecem energia a feixes de partículas subatômicas eletricamente carregadas. Todos os aceleradores de partículas possibilitam a concentração de alta energia em pequeno volume e em posições arbitradas e controladas de forma precisa. Os primeiros aceleradores a serem utilizados foram os eletrostáticos que possuíam uma limitação visto que sua voltagem era fixa. Dessa maneira, foram desenvolvidos novos tipos de aceleradores que possibilitam uma maior energia: aceleradores lineares e circulares.

Os aceleradores lineares são baseados no princípio da ressonância. Nesse caso, uma série de tubos chamados *tubos de mudança* ficam localizadas no vácuo e conectados com terminais alternados de osciladores de frequência. Esses sucessivos tubos permitem um aumento da velocidade da partícula possibilitando uma maior energia. Entretanto, estes são limitados por necessitarem de maiores tubos para compensar o aumento da velocidade. Os aceleradores circulares são construídos para promover uma trajetória curvada para as

partículas. Neste caso foram desenvolvidos os cíclotrons que possuem uma geometria na forma de D baseando-se no mesmo princípio de ressonância. Como o acelerador no magneto adquire uma trajetória circular com raio crescente ocorre uma perda de foco do feixe havendo a necessidade um sistema de re-focalização para forçá-los a permanecer numa órbita: aumento da massa devido a essa correção; limitação da energia da partícula para evitar erro. Para resolver esse problema foram desenvolvidos aparelhos Síncrotrons que ajustam órbitas estáveis em que a frequência de revolução é igual a da diferença de potencial. Dessa maneira, utilizando o mesmo princípio de cíclotron e com a solução do Síncrotrons foram desenvolvidos os Síncrotrons. Estes utilizam o princípio de estabilidade de fase em que existe um sincronismo entre o campo elétrico e a frequência de revolução da partícula. Existem grandes aceleradores que funcionam segundo este sistema, como o Tevatron no Fermilab e o LHC em Genebra.

O LHCb (Large Hadron Collider Beauty Experiment for Precision Measurements of P-Violation and Rare Decays) é um dos quarto experimentos aprovados para o futuro acelerador de partículas CERN, o Large Hadron Collider (LHC). Este acelerador terá 27 km de circunferência, atingindo uma energia de 14 trilhões de elétron-volts (14 TeV) no centro de massa da interação próton-próton; este valor é muito superior à mais alta energia alcançada atualmente, do Tevatron (Fermilab). O LHCb está desenhado para ter um papel fundamental na elucidação do processo de violação de CP, além do estudo de várias propriedades dos decaimentos de méson B. Os resultados a serem obtidos poderão verificar se a violação de CP observada na natureza é explicada completamente pelo Modelo Padrão. No caso de que não se cumpram as expectativas do modelo, o LHCb poderá fornecer informações cruciais para contribuir ao entendimento de uma nova física.

Quando aceleramos partículas para colidirem a altas velocidades necessitamos possuir recursos potentes capazes de detectar os resultantes do processo. Entretanto a busca por essas informações é difícil principalmente devido ao rápido decaimento das partículas o que nos conduz ao estudo de seus produtos de decaimentos. De uma forma geral buscamos informações sobre a trajetória, o momento ou energia e massa ou carga da partícula. Como exemplo de detector nos baseamos no utilizado no LHCb. Este possui diversas câmaras responsáveis para adquirir informações específicas da partícula. A região do vertex esta localizada na região do evento o que necessita de uma grande precisão. Para isso são utilizados cintiladores para determinar a trajetória da partícula. Em seguida a RICH-1 é um detector de Cherenkov. Quando uma partícula carregada move-se com velocidade uniforme no vácuo, ela não emite radiação. Caso esta partícula mova-se com velocidade superior à da luz em um *meio material* ela emite radiação eletromagnética que pode ser na faixa visível. A luz emitida possui um espectro de frequências do azul ao ultravioleta. A luz azul pode ser detectada com um tubo foto multiplicador, enquanto a luz ultravioleta pode ser convertida em elétrons usando moléculas foto-sensitivas que estão misturadas com o gás na câmara de ionização. Dessa forma, este método proporciona um meio de distinguir partículas de momentum iguais, mas com massas diferentes. Em seguida temos antes e depois dos magnetos um sistema para reconstruir as trajetórias das partículas carregadas e medir seus momentos. Além disso, temos ECAL e HCAL que são os calorímetros eletromagnéticos e hadrônicos que possibilitam a medida da energia de elétrons, fótons e hádrons. Isto é feito baseando-se na energia depositada no meio pela absorção de uma partícula que cria uma cascata de novas partículas.



Procuramos ainda conhecer as ferramentas utilizadas no LHCb, com a familiarização da linguagem C++ [3] e o pacote de bibliotecas e interface gráfica Root [4]. Começamos criando histogramas e ajustando gráficos de funções utilizando amostras de simulações do Root. Em seguida, desenvolvemos programas que simulam o decaimento de partículas em três corpos. Em uma reação de partículas  $p_a + p_b \rightarrow p_1 + \dots + p_n$  impomos a condição do quadri-momentum no estado final dos vetores do momentum.

$$E_a + E_b = \sum_{i=1}^n E_i \quad (1.1)$$

$$p_a + p_b = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$E_i^2 = p_i^2 + m_i^2 \quad i = a, b, 1, \dots, n$$

No estado final dos vetores de momentum identificamos um espaço dimensional  $3n$  em que  $n$  representa o numero de partículas. Utilizando as 4 condições em (1.1) definimos nesse espaço uma superfície de dimensão  $3n - 4$  chamado espaço de fase. Entretanto, analisando o evento do centro de massa da partícula mãe e sendo os produtos de decaimento partículas sem spin, deve haver isotropia no decaimento, ou seja, três variáveis são triviais o que nos deixa com  $3n - 7$  variáveis essenciais. Considerando o caso particular de um decaimento em 3 corpos,  $p \rightarrow p_1 + p_2 + p_3$ , haveria portanto 2 variáveis para descrever o processo de decaimento. Se definirmos as massas quadradas invariantes[5]:

$$s_{12} \equiv s_1 = (p_1 + p_2)^2 = (p - p_3)^2$$

$$s_{23} \equiv s_2 = (p_2 + p_3)^2 = (p - p_1)^2$$

$$s_{31} \equiv s_3 = (p_3 + p_1)^2 = (p - p_2)^2$$

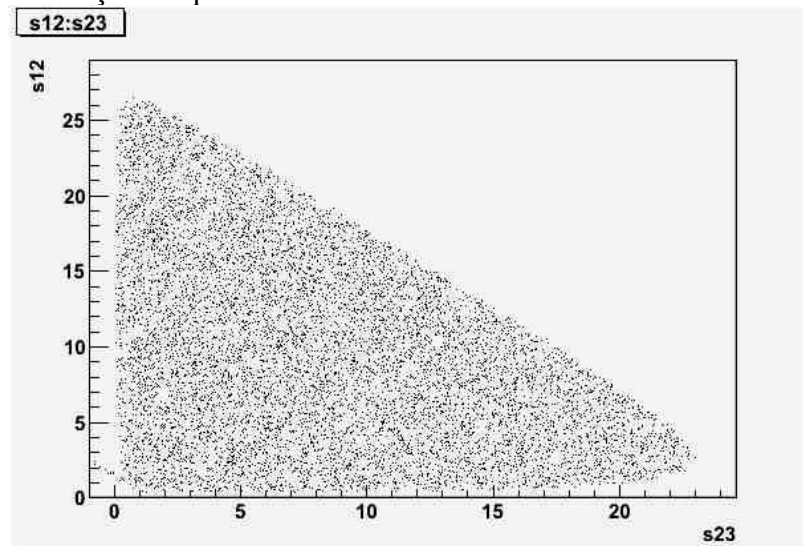
Tal que estão vinculadas por:

$$s_1 + s_2 + s_3 = s + m_1^2 + m_2^2 + m_3^2$$

Devido à conservação de quadri-momento poderíamos escolher nossas variáveis como  $s_{12}$  e  $s_{23}$ , definindo então um espaço de fase bidimensional conhecido como Dalitz Plot. Dessa forma, como escolha principal discutimos o decaimento do méson  $B^+ \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+$  que se enquadra nesse espaço de fase. O estado final acima pode ser produzido através de diferentes

estados ressonantes intermediários. Por exemplo, (1)  $B^+ \rightarrow K^*(\pi^+)$ ;  $K^* \rightarrow K^-\pi^+$  e (2)  $B^+ \rightarrow \chi_c K^+$ ;  $\chi_c \rightarrow \pi^+\pi^-$ . As partículas  $K^*$  e  $\chi_c$  são exemplos de ressonâncias: elas decaem por interação forte, com tempo de vida  $\leq 10^{20}$  s – não podem ser observadas diretamente, somente por meio de seus produtos de decaimento. Para representar este tipo de comportamento, uma ferramenta bastante utilizada na Física de altas energias é a simulação de sinais de eventos. O propósito principal é reproduzir por meio de recursos computacionais a interação que produz novas partículas, como em dados de eventos reais. Em particular podemos gerar eventos específicos para cada decaimento e com um número de eventos que precisarmos. A simulação de eventos é criada pela geração de números aleatórios utilizando as propriedades de produção e decaimento de partículas. Esses eventos são chamados de eventos de Monte Carlo.

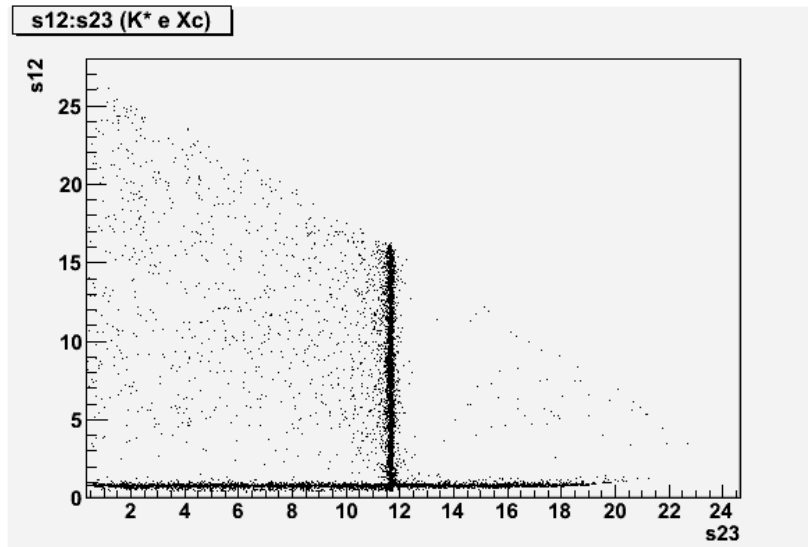
Com isso, primeiramente desenvolvemos programas que simulavam um processo de decaimento em três corpos aplicando apenas a cinemática envolvida no processo. Colocamos valores conhecidos da massa do méson B e de suas filhas e utilizando a técnica de Monte Carlo geramos 10000 eventos criando a princípio uma distribuição homogênea no Dalitz Plot. Observamos este comportamento por não restringirmos as condições de decaimento. Representamos abaixo a seguinte distribuição em que a forma “triangular” do espaço de fase é consequência da conservação de quadri-momento:



Em seguida aplicamos as condições dinâmicas em que definimos funções para cada canal de decaimento que procurávamos observar. Queremos considerar os diferentes estados intermediários ressoantes mencionados acima. As ressonâncias são usualmente bem representadas por funções Breit-Wigner (BW), que parametrizam a incerteza na medida de massa devido ao seu tempo de vida ser pequeno (isto vem do Princípio de Incerteza de Heisenberg). Assim, ao considerar diferentes estados ressonantes contribuindo para formação do estado final em 3 corpos, devemos considerar uma soma coerente de amplitudes quânticas:

$$\sum_i^{\text{canais}} a_i e^{i\delta_i} BW_i$$

Onde  $a_i$  e  $\delta_i$  são magnitudes e fases que medem a contribuição relativa e interferência entre os diferentes canais. Estes parâmetros a princípio foram escolhidos arbitrariamente. Mostramos abaixo um Dalitz Plot simulado dos canais  $B^+ \rightarrow K^*(\pi^+)$  e  $B^+ \rightarrow \chi_c K^+$  para o decaimento  $B^+ \rightarrow K^+\pi^-\pi^+$ .



Alem disso, podemos simular com esse programa diversos outros canais, mesmo para decaimentos não ressonantes.

### Conclusões

Por meio desse projeto fui capaz de me aproximar dos conceitos teóricos envolvendo as etapas anteriores à obtenção de dados experimentais e à técnica de obtenção de amostras propriamente dita. Além disso, foram feitos diversos avanços na familiarização dos recursos computacionais que possibilitaram a princípio uma análise qualitativa dos eventos de interferência na produção de seu produto final. Na continuação deste projeto nos encaminhamos para a incorporação de dinâmica nos processos de decaimento e estudos estatísticos de sensibilidade para parâmetros de violação de CP.

### Referências

- 1- EISBERG, Robert. RESNICK, Robert. **Física Quântica**.
- 2 – DAS, A. FERBEL, T. **Introduction to Nuclear and Particle Physics**. 2ed. University of Rochester, USA.
- 3 – CAPPER, D.M. **Introducing C++ for Scientists, Engineers and Mathematicians**. 3ed.1996, Springer-Verlag.
- 4 – <http://root.cern.ch>
- 5 - BYCKLING, E. KAJANTIE, K. **Particle Kinematics**. Wiley-Interscience, 1973.
- 6 – LYONS, Louis. **Statistics for nuclear and particle physicists**. Cambridge University Press.