

DECAIMENTOS DE MÉSONS B E O FENÔMENO DE VIOLAÇÃO DE CARGA-PARIDADE

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

Introdução

Neste ano de 2008, entra em funcionamento o tão esperado Large Hadron Collider (LHC), no CERN, Suíça. Um dos quatro experimentos do LHC é o LHCb, que tem como objetivo estudar o fenômeno de violação de carga-paridade (CP) em decaimentos de mésons B. A violação de CP está diretamente relacionada à observada assimetria matéria-antimatéria no Universo. Temos trabalhado em busca de familiarizar-nos com os aspectos teóricos desse fenômeno como o conhecimento experimental de sua identificação.

Objetivos

O objetivo deste projeto foi dar prosseguimento aos estudos relacionados ao decaimento de partículas em altas energias tanto a nível teórico como a experimental. Para isso a abordagem baseou-se primeiramente na aprendizagem de conceitos físicos relacionados ao processo de colisão de partículas, como também a familiarização de recursos computacionais ligados à área. Além disso, foi possível participar diretamente do projeto LHCb de forma a adquirir conhecimento experimental do processo.

Metodologia

1. Simulação de Eventos $B^+ \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+$

No segundo ano do projeto da iniciação científica, havíamos adquirido conhecimento da teoria acerca de partículas e colisões de altas energias. Além disso, desenvolvemos programas em C++ [1] que simulavam o decaimento de partículas em três corpos. Para representar, por exemplo, o evento $p \rightarrow p_1 + p_2 + p_3$ precisamos de 2 variáveis para descrever o processo, que pode ser representado em um espaço de fase que chamamos de Dalitz Plot -- um espaço bidimensional descrito por duas combinações de massas invariantes quadradas definidas por [2]:

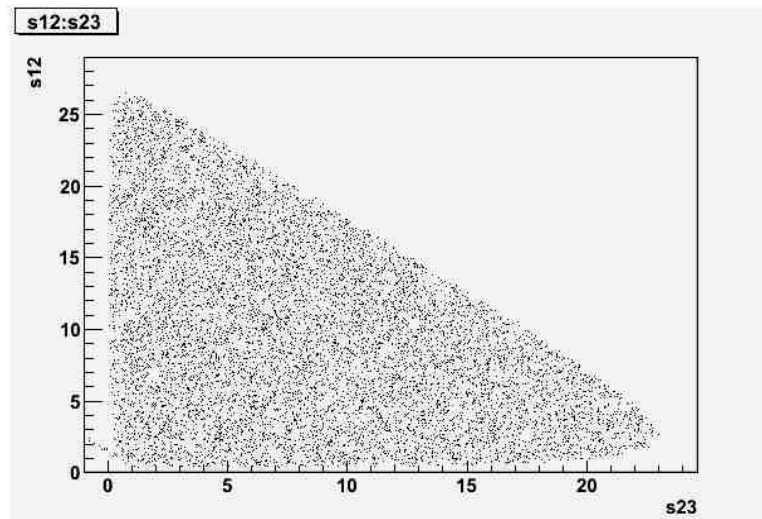
$$\begin{aligned} s_{12} &\equiv s_1 = (p_1 + p_2)^2 = (p - p_3)^2 \\ s_{23} &\equiv s_2 = (p_2 + p_3)^2 = (p - p_1)^2 \\ s_{31} &\equiv s_3 = (p_3 + p_1)^2 = (p - p_2)^2, \end{aligned}$$

e tal que estão vinculadas por:

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

Dessa maneira podemos escolher as duas variáveis como s_{12} e s_{23} , definindo nosso Dalitz Plot. Especificamente, vamos discutir aqui o decaimento $B^+ \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+$. Este processo possui diversos 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 χ_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.

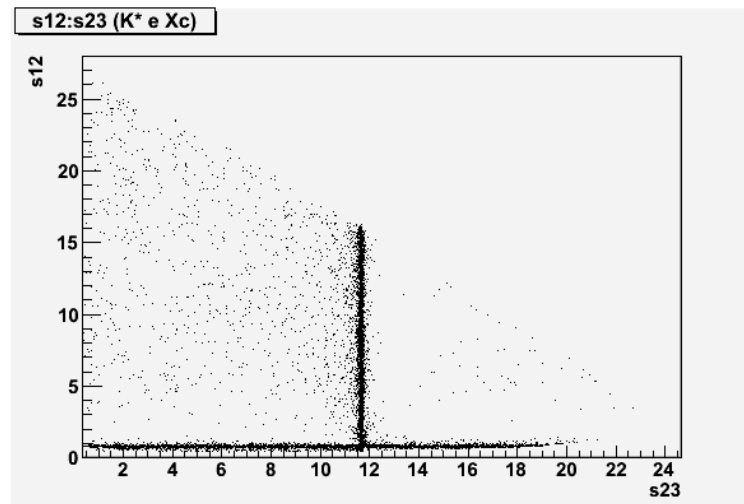
Primeiramente, nosso objetivo era simular os decaimentos acima através do método de Monte Carlo: gerando eventos, via números aleatórios, com as propriedades de produção e decaimento de partículas. Para isto, desenvolvemos programas que simulavam um processo de decaimento em três corpos aplicando apenas 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 10.000 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 seguida aplicamos as condições dinâmicas em que definimos funções para cada canal de decaimento que procurávamos observar. Queremos considerar os diferentes estados intermediários ressonantes 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 descrever a amplitude total como uma soma coerente de amplitudes quânticas individuais:

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

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

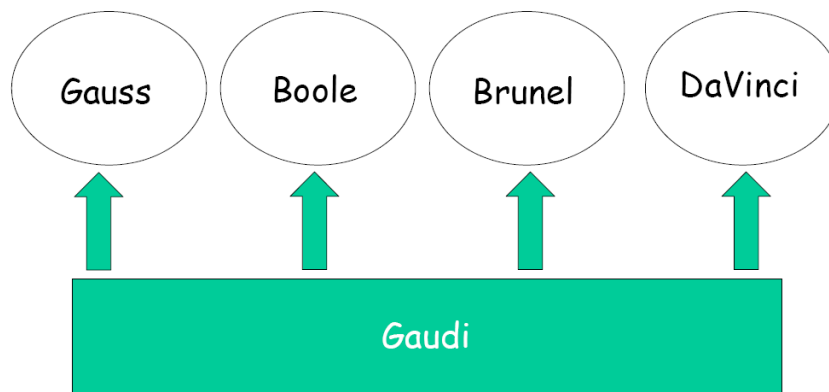


Observamos que diferentes fases relativas entre as ressonâncias resultavam em padrões diferentes no Dalitz Plot.

2. Análise de Eventos $B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$ no LHCb

Na segunda parte do projeto, começamos a nos familiarizar com outros recursos computacionais utilizados pelo CERN, tais como a arquitetura Gaudi e a linguagem de Python. Essas ferramentas são usadas correntemente pela colaboração do LHCb para tudo que se refere a análise de dados: simulação, reconstrução. A simulação do evento do LHCb baseia-se na colisão p-p com energia de centro de massa de 14 TeV. Toda descrição cinemática e dinâmica do processo (interações elementares e decaimentos) é feita através do pacote PYTHIA. Em seguida, a descrição da interação das partículas criadas com os detectores é feita pelo software GEANT, simulando a passagem pelo detector. A compilação dessas duas ferramentas é um pacote chamado GAUSS. Nesse ponto, a simulação possui a mesma informação de uma colisão real.

Além disso, a digitalização dos eventos é feita pelo BOOLE que tem como saída dados indistinguíveis de dados reais. A reconstrução dos eventos por sua vez é feita pelo pacote BRUNEL que, ao final do processamento, tem seus dados salvos no formato DST (Data Summary Tape). A partir dos dados reconstruídos, utilizamos o aplicativo DaVinci para análise de dados, que possui ferramentas que permite sua filtragem (seleção de cortes). Toda essa estrutura padrão é chamada Gaudi.



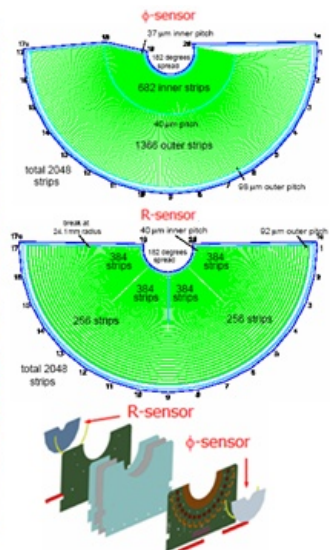
Na parte de análise de dados de MC do LHCb, começamos a trabalhar com o decaimento $B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$, que é muito similar ao que vínhamos trabalhar. Assim, iniciamos os estudos para analisarmos os dados deste decaimento por meio de seleção de cortes [3].

Esta parte do trabalho ainda está em estágio incipiente e constará da continuação deste projeto para os próximos meses.

3. Estágio no Detector VELO do LHCb, CERN

Com o intuito de adquirir um conhecimento da parte experimental da Física de Partículas, tive a oportunidade de passar quase três meses trabalhando no LHCb. Este experimento tem como objetivo estudar precisamente os decaimentos dos Mésons B possuindo assim uma larga produção de $B\bar{B}$ [4]. Especificamente participei de um dos detectores do LHCb, o Vertex Locator (VELO) [5]. Este detector é o local onde a partícula B é criada e onde ela decai. É de fundamental importância a informação precisa desses dois pontos (vértice primário e secundário).

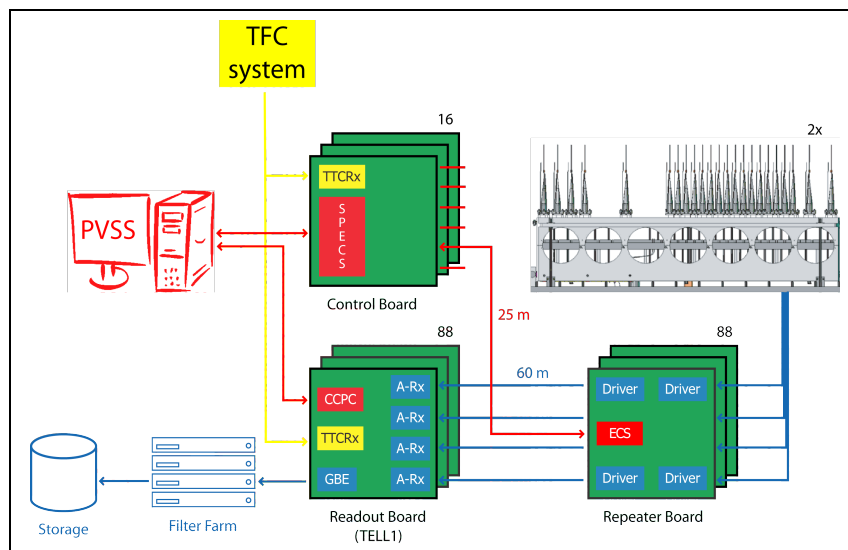
O VELO é um detector de silício constituído de dois lados idênticos com uma série de módulos de silício arranjados na direção do feixe. Cada lado é equipado com 21 módulos com sensores de R e ϕ . Os módulos possuem três funções básicas: manter os sensores em uma posição fixa; conectar as saídas elétricas com os sensores; além de ser responsável pelo controle térmico dos sensores no vácuo. Cada módulo do VELO foi projetado para fornecer as informações tridimensionais necessárias para reconstruir os traços e os vértices. O sensor ϕ fornece informações da coordenada azimutal na direção do feixe, enquanto o sensor R nos fornece na direção radial. A terceira coordenada ao longo do eixo z é fornecida pelo conhecimento da posição do plano de cada sensor em relação ao experimento. Temos 16 chips (Beetles) que são responsáveis pela saída de dados de um sensor. Além disso, cada Beetle lê as informações de 4 links com 32 canais, resultando 64 links por sensor (2048 canais).



O sistema de aquisição de dados e controle do sistema nos subdetectores no experimento do LHCb é feito praticamente online. Este se baseia em três componentes: sistema de aquisição de dados (DAQ), sistema de controle do experimento (ECS) e controle rápido de tempo (TFC). O propósito do DAQ é transportar os dados das entradas eletrônicas do detector até uma permanente estocagem. O sistema TFC participa de todos os estágios das saídas de dados dos detectores do LHCb incluindo a saída/entrada de dados nos eletrônicos, o processamento online e assegura o recebimento sincronizado de dados. Por fim o ECS controla e monitora todos os estágios operacionais do LHCb utilizando o pacote PVSS.

Os dados coletados nas entradas e saídas dos eletrônicos de quase todos os subdetectores do LHCb é feito por uma placa padrão (TELL1). No caso do VELO, o TELL1 possui 4 placas A-RX que convertem o sinal analógico do sensores em digitais com ajuda de 10 ADCs (conversores analógico-digital). Cada TELL1 lê os 64 links de cada sensor o que resulta em um total de 84 TELL1s para os 42 módulos do VELO.

As placas de controle (CBs) são o coração do sistema de controle. São responsáveis pelo suprimento de energia de baixa voltagem para as placas de repetição (Repeater Boards) e para os módulos, além de configurarem os Beetles. Cada CB possui 6 portas para 6 sensores do VELO. No ponto 8 (Área experimental do LHCb) temos 2 estruturas com 7 CBs, o que resulta em 84 portas. Podemos observar na figura abaixo um esquema de saída e aquisição de dados do VELO.

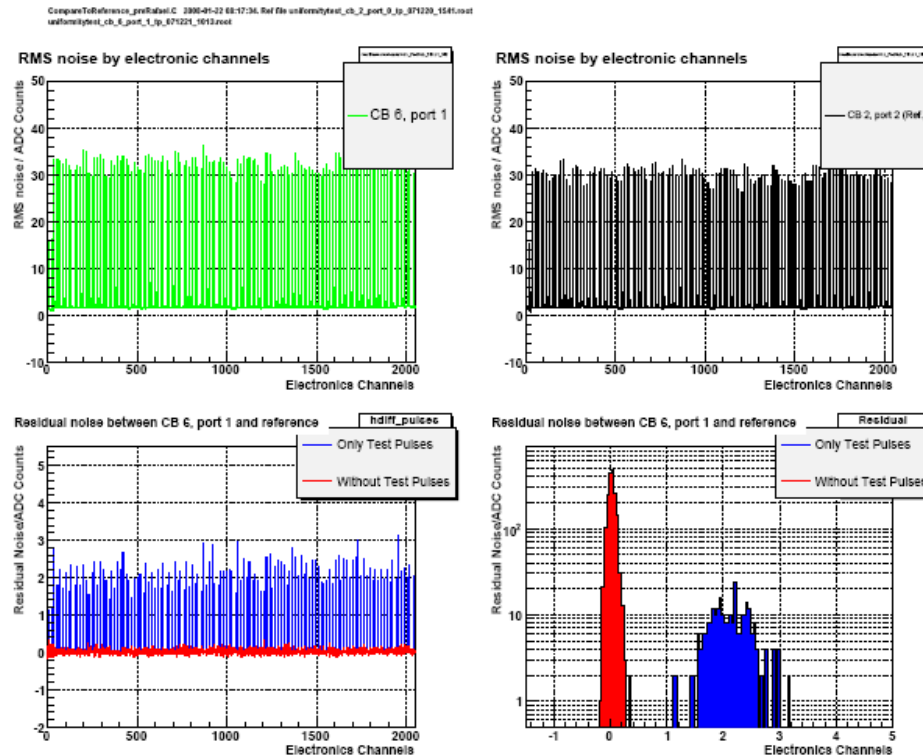


Fiz parte do Commissioning Group que é responsável pela verificação e instalação dos componentes do VELO. Participei de atividades para testar separadamente cada placa e cabo por meio de testes: simulação de aquisição de dados pelas placas de saída (TELL1), configuração do sistema pelas placas de controle (Control Board), sincronização dos tempos de chegada dos dados às placas devido a diferentes tamanhos de cabos e a checagem de cabos.

Para o Commissioning é necessário que todas as portas dos CBs sejam testadas para assegurar que funcionem corretamente durante o experimento. Assim checamos primeiramente a integridade dos CBs, se eles apresentam um comportamento uniforme e configuramos o sistema para todos os CBs.

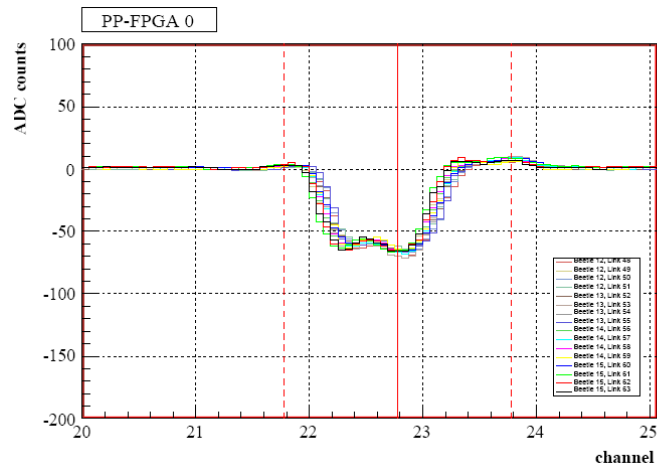
O teste foi feito de forma que utilizamos um módulo sem o sensor, um TELL1 e a mesma configuração de cabos. Com isso, asseguramos que fosse usado o mesmo sistema para as diferentes portas dos CBs e que os resultados para as diversas portas pudessem ser comparadas diretamente. O primeiro passo foi configurar os módulos para cada porta do CB. Injetamos nos canais 4 e 23 de cada link um pulso de teste para verificar se este aparecia corretamente. Com isso enviávamos sinais e coletávamos os dados para então serem analisados pelo ROOT (interface gráfica utilizada pelo CERN). Utilizando um script de análise, comparamos o ruído *rms* (*root mean-square*) pelos canais eletrônicos (Contagem de ADC versus canais eletrônicos) da porta que estamos testando com uma porta de referência. A primeira informação que procuramos é se os pulsos de testes estão presentes nos canais que

injetamos. Depois disso comparamos as portas com as referências analisando sua uniformidade dos pulsos. Na figura a seguir, mostramos o ruído *rms* para diversos canais para a porta teste e a de referência e a diferença entre elas.

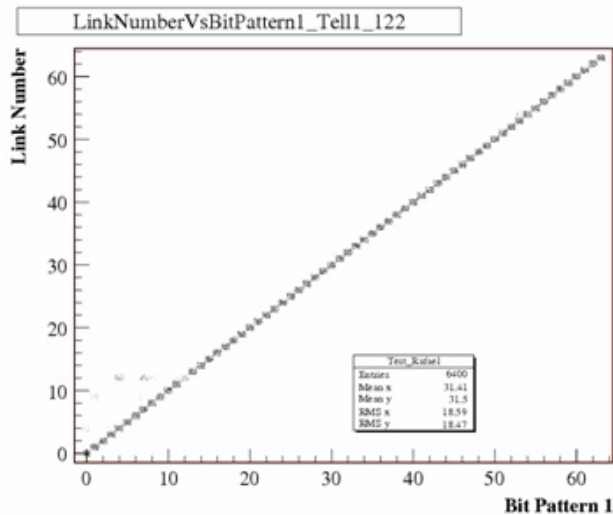


Observamos na parte superior à esquerda o ruído *rms* dos canais eletrônicos da porta que estamos testando. Os picos do espectro de ruídos correspondem os pulsos de teste. O histograma superior à direita apresenta a mesma distribuição para a porta de referência para possibilitar a comparação. Na parte inferior à esquerda temos a diferença de ruído da referência e a porta a ser testada por canais eletrônicos. O histograma na parte inferior à direita representa o mesmo resíduo, mas projetado unidimensionalmente.

Em seguida ajustamos nosso detector com todos esses componentes para fazermos testes de cada módulo (placas e cabos conectados) completo do VELO. O objetivo desse teste era checar sistematicamente cada posição do módulo identificando erros de cabo, operando a voltagem, testando o controle do software e ajuste de tempo. O procedimento se baseou em 4 passos: ajuste de tempo (delay scan), teste para verificar se havia cabos trocados ou fios quebrados (cable test) e dois testes de ruídos. A primeira parte do teste consistiu em encontrar o melhor ponto no tempo em que era lida a informação digital pela placa A-Rx visto que diferentes tamanhos de cabos significavam um atraso na chegada dos dados. Para isso injetamos um pulso no canal 23 e calculamos o ponto que maximiza o sinal como representamos abaixo.



Para o teste dos cabos configuramos os módulos para enviar teste de pulsos como representação do número do bit do link e do módulo. Assim pudemos fazer uma comparação entre o número do link com o padrão do bit como visto abaixo. Em caso de algum problema nos cabos era possível defeitos na curva.



Por meio desse trabalho verificamos os componentes separadamente, identificando problemas tanto de caráter de software como de hardware, o que nos assegura a confiabilidade dos futuros dados a serem tomados.

Conclusões

Neste ano, nosso projeto se baseou em duas grandes linhas. A primeira foi voltada a estudos que descrevem os processos intermediários do decaimento do méson B e observação dos efeitos de interferência através da mudança das fases relativas. A segunda parte teve como característica a familiarização com o caráter experimental da área, representado pela instalação e verificação dos componentes e cabos no experimento LHCb. Na continuação desse projeto nos encaminhamos para utilizar dados reais do LHCb no estudo do decaimento do méson B.

Referências

- 1 – CAPPER, D.M. **Introducing C++ for Scientists, Engineers and Mathematicians**. 3ed. 1996, Springer-Verlag.
- 2 - BYCKLING, E. KAJANTIE, K. **Particle Kinematics**. Wiley-Interscience, 1973.
- 3- GUERRER, G. **Extraíndo a fase γ de CKM nos decaimentos $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^-$ e $B^0, \bar{B}^0 \rightarrow K_s \pi^+ \pi^-$** . 2007.
- 4 – LHCb collaboration. **The LHCb Detector at LHC**. 2008.
- 5 – LHCb collaboration. **LHCb VELO Technical Design Report (TDR)**. CERN/LHCC, 2001.