

Masterclass do LHCb: Medir o tempo de vida do D^0 no LHC

1 Introdução

O Grande Colisor de Hádrons (*Large Hadron Collider*, ou LHC) não é apenas uma ferramenta de busca de novas partículas exóticas, mas também é uma fábrica de partículas, as quais sabemos existir, entretanto sem conhecer suficientemente suas propriedades. Um exemplo são as partículas charmosas, isto é, partículas que contêm um quark charme (também conhecido como quark c), que foram encontradas pela primeira vez há mais de 30 anos. Aproximadamente uma em cada dez interações do LHC produz uma partícula charmosa, e o experimento LHCb no LHC já registrou mais de um bilhão de eventos que contêm partículas desse tipo.

Além de grande número de partículas charmosas, as colisões do LHC produzem um número ainda maior de outras partículas que são detectadas e podem ser confundidas como sinal (“ruído”). A fim de extrair informações a partir das tais grandes amostras de sinal, é necessário alcançar um excelente controle sobre este ruído. Hoje você realizará exercícios usando colisões reais, registradas pelo experimento LHCb durante a tomada de dados de 2011 que contêm tanto partículas de sinal quanto ruído. Este conjunto de exercícios é projetado para ensiná-lo(a) a:

1. Usar uma visualização de eventos das colisões próton-próton dentro do detector LHCb para procurar partículas charmosas e separar estes sinais do ruído.
2. Fazer um ajuste aos dados através das funções que descrevem o sinal e ruído, para medir o número de eventos de sinal nos dados e seu grau de pureza (definido como a fração de eventos de sinal relativa ao total).
3. Obter a distribuição de eventos de sinal de uma dada variável, tomando a distribuição de eventos combinados na amostra de dados (que contém tanto o sinal quanto ruído) e subtraindo a distribuição de ruído. O resultado do ajuste na etapa anterior é utilizado para encontrar uma amostra de eventos de ruído pura, para subtração, e para calcular a partir do número de eventos e pureza do sinal, a quantidade apropriada de ruído que deve ser subtraído.
4. O sinal que você observará decai exponencialmente com o tempo, de forma análoga a um isótopo radioativo. Agora você pode usar a amostra de eventos passando a etapa anterior para medir o tempo de vida da partícula sinal. O tempo de vida é definido como o tempo necessário para que decaia uma fração $(e - 1)/e$ das partículas, onde $e \approx 2.718$ é a base do logaritmo natural. É análogo ao conceito de meia-vida no decaimento radioativo.

A amostra de dados utilizada para este exercício consiste de candidatos de um tipo de partícula charmosa conhecida como a partícula D^0 encontrada numa amostra de interações do LHC recolhidas aleatoriamente na tomada de dados em 2011. A partícula D^0 é composta por um quark charme e um antiquark up . As partículas são medidas decaindo da forma $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, onde o estado final das partículas são um káon (K^-) constituído por um quark estranho e um antiquark up , e um pión (π^+) que consiste num antiquark $down$ e um quark up . Essas partículas possuem um tempo de vida longo o suficiente e, para a proposta deste exercício, são estáveis dentro do detector LHCb. As partículas foram selecionadas com base em critérios frouxos de modo que você inicie o exercício com um sinal visível, mas o ruído também estará presente.

Antes de discutir ainda mais o exercício, vale a pena levar um tempo se familiarizando com o detector LHCb, mostrado na Fig. 1. Ele é um espectrômetro frontal que cobre a faixa angular entre 0.7° e 15° em relação à linha do feixe do LHC. A linha do feixe está localizada em $y = 0$ na figura e passa ao longo do eixo z . No que se segue “transverso” significa transverso à linha do feixe do LHC, à esquerda na figura é no sentido de menores valores de z e à direita na figura é no sentido de maiores valores de z . O detector inclui um sistema de alta precisão para rastrear partículas carregadas, sendo constituído por um detector de tiras de silício que circunda a região da interação próton-próton; um detector de tiras de silício que cobre uma grande área, localizado à esquerda de um dipolo magnético

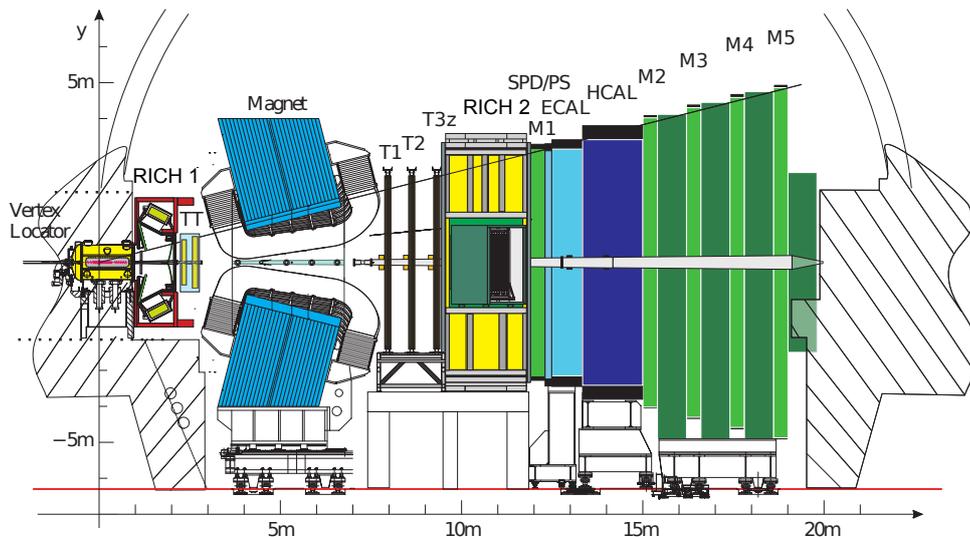


Figure 1: O detector LHCb. O eixo z é a direção da linha do feixe do LHC.

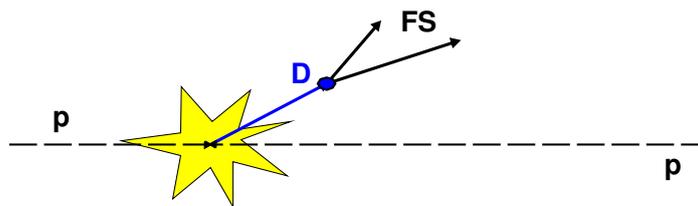


Figure 2: Vértice secundário (“D”) da partícula D^0 deslocado do ponto de interação pp (bolha amarela semelhante a uma estrela).

com um poder de deflexão de cerca de 4 Tm ; e três estações de detectores de tiras de silício e tubos de arrasto na região à direita. Partículas carregadas deixam trajetórias em linha reta no detector que circunda a região de interação, onde não há ação do campo magnético, e são subsequentemente defletidas pelo ímã antes de deixar trajetórias na estação de trajetórias à direita. Sua quantidade de movimento e sua carga podem ser deduzidas a partir da curvatura induzida por esse campo magnético. O sistema combinado de trajetórias tem uma resolução de quantidade de movimento (momento linear) $\Delta p/p$ que varia de 0.4% a $5\text{ GeV}/c$ a 0.6% a $100\text{ GeV}/c$, e uma resolução de parâmetro de impacto¹ de $20\ \mu\text{m}$ para trajetórias com elevada quantidade de movimento transversa, e uma resolução para o tempo de vida de 50 fs .

Uma característica que diferencia a partícula D^0 é seu longo tempo de vida que pode ser medido (o objetivo deste exercício). De um ponto de vista prático, significa que elas formam um “vértice secundário” que é deslocado a partir da interação próton-próton “vértice primário”. Isso está ilustrado na Fig. 2. Este fato, juntamente com sua taxa de produção abundante, permite que os sinais D^0 sejam bem separados do ruído do resto do evento, a maioria do qual consiste em combinações aleatórias de partículas produzidas durante a colisão próton-próton.

Os dados são fornecidos em conjunto com uma interface gráfica de usuário (GUI) que você pode usar para acessá-los – agora abra o programa. Você pode acessar as instruções on-line a partir da GUI usando o botão “Ajuda”. O exercício consiste em duas partes: a primeira é uma visualização de eventos que você pode usar para procurar os vértices deslocados de partículas D^0 no interior do detector LHCb, e a segunda parte é um ajuste que você pode utilizar para separar o sinal do ruído e medir o tempo de vida das partículas D^0 .

¹Parâmetro de impacto é a distância transversa de menor aproximação entre a trajetória de uma partícula e um vértice, no caso mais comum o vértice primário da interação próton-próton.

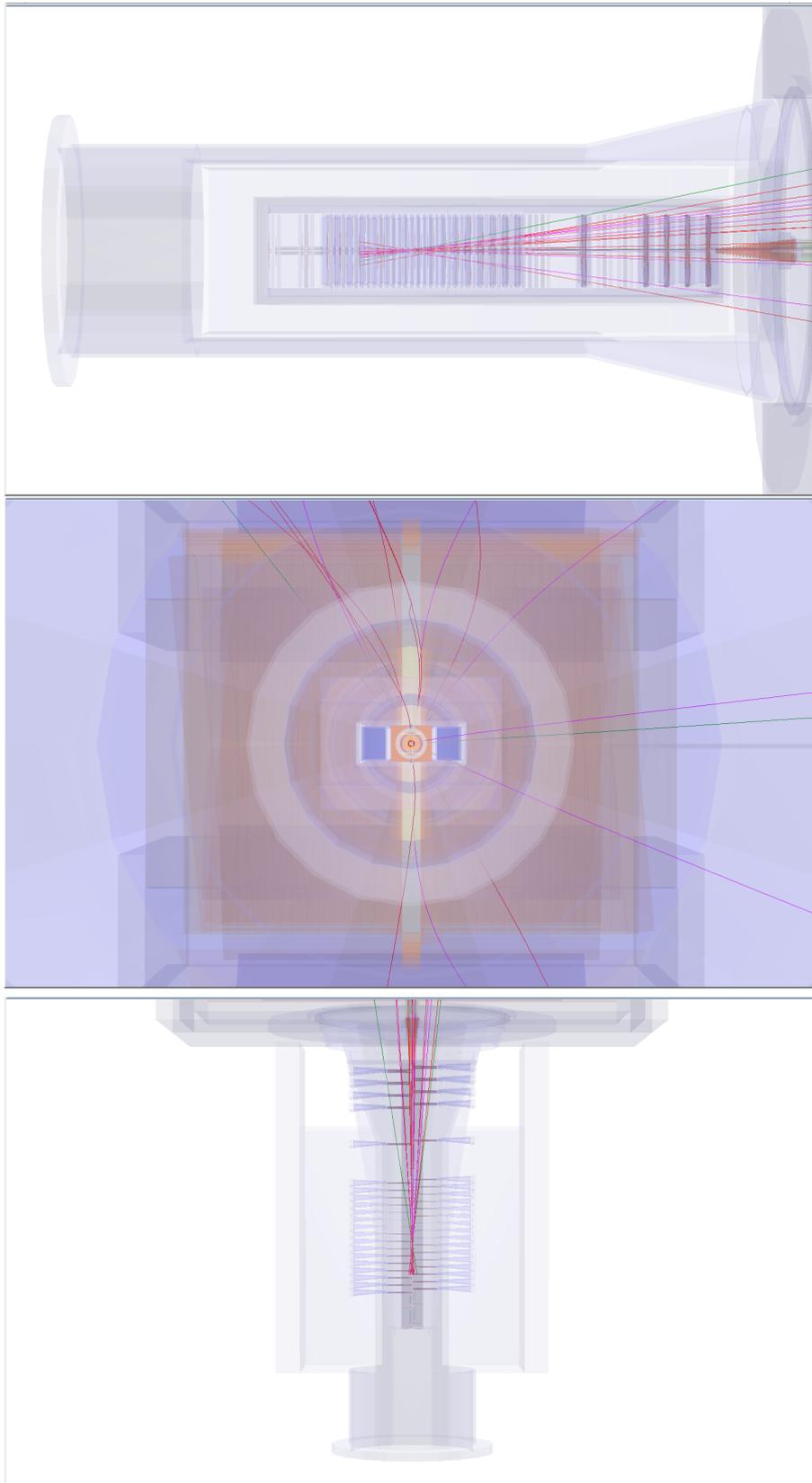


Figure 3: Três visualizações de um evento, de cima para baixo: $y-z$, $y-x$, e $x-z$.

2 Exercício de visualização de eventos

O objetivo do exercício de visualização é encontrar os vértices deslocados das partículas D^0 dentro do detector de vértice do experimento LHCb. Quando você iniciar o exercício e carregar um evento, você vai observar uma imagem do detector LHCb juntamente com trajetórias de partículas (“traços”) no seu interior. Essas trajetórias são diferenciadas com cores e uma legenda na parte inferior da GUI informa a cor correspondente a cada tipo de partícula.

A fim de tornar mais fácil a identificação de vértices, você pode ver um mesmo evento em três projeções bidimensionais diferentes: $y-z$, $y-x$, e $x-z$, como mostrado no evento da Fig. 3. Diferentes eventos podem ficar mais claros em projeções diferentes, então sinta-se à vontade para experimentar com todas as três opções! Vértices deslocados aparecem como um par de trajetórias que se cruzam, longe das outras trajetórias do evento. Quando você clicar sobre uma partícula, visualizará suas informações, tais como massa e quantidade de movimento, na caixa **Informação das Partículas**.

Uma partícula D^0 decai em um káon e um pión. Assim você terá que encontrar um vértice deslocado onde uma trajetória de káon cruza uma trajetória de pión. Uma vez encontrado uma trajetória que pareça parte do vértice deslocado, você pode salvá-la clicando no botão **Salvar Partícula**. Depois de salvar duas partículas, você pode calcular sua massa clicando no botão **Calcular**. Se você achar que esta combinação tem uma massa compatível com a da partícula D^0 , clique em **Adicionar** para salvá-la: salvando uma combinação para cada evento, você construirá um histograma das massas invariantes dos vértices deslocados nos diferentes eventos.

Lembre-se de que estará observando dados reais que contêm tanto o sinal quanto ruído e o detector tem uma resolução finita. Logo nem todos os vértices deslocados terão exatamente a massa invariante do D^0 (mesmo os que são sinais). Eles devem, no entanto, estar dentro da faixa entre 1816-1914 MeV (esta faixa é de cerca de 3% em torno da verdadeira massa do D^0). Se você tentar salvar uma combinação que é muito distante da massa real do D^0 , o exercício irá avisá-lo de que você não encontrou o par do vértice deslocado correto e não vai permitir você salvá-lo.

Se você não conseguir encontrar o vértice deslocado de um evento depois de alguns minutos, passe para o próximo, e então se sobrar tempo para terminar o exercício, retorne para o que estava te causando dificuldade. Uma vez observado todos os eventos, você pode examinar o seu histograma de massa clicando no botão **Desenhar**. Discuta a forma do histograma com um moderador.

No final, lembre-se de clicar em **Salvar Histograma**, a fim de salvar o seu histograma! Então, ele será combinado pelos moderadores com os histogramas dos outros alunos e vocês devem discutir seus resultados em grupo.

3 Exercício de ajuste

Antes de descrever o exercício de ajuste, será útil listar as variáveis envolvidas neste exercício:

- **DO mass** : é a massa invariante da partícula D^0 . O sinal pode ser visto como uma estrutura de pico acima do ruído plano. A faixa de massa relevante para a análise é 1816-1914 MeV. A forma do sinal é descrita por uma distribuição gaussiana (também conhecida como distribuição “normal”). O centro da distribuição (“média”) é a massa da partícula D^0 , enquanto a largura representa a resolução experimental do detector.
- **DO TAU** : é a distribuição do tempo de decaimento dos candidatos D^0 . O sinal é descrito por uma simples exponencial cuja a inclinação é o tempo de vida do D^0 (que é o objetivo do último exercício), enquanto o ruído concentra-se em curtos tempos de decaimento.
- **DO IP** : é a distância de menor aproximação em milímetros (“parâmetro de impacto”) do D^0 a respeito do evento de interação próton-próton (vértice primário). Quanto menor o parâmetro de impacto maior a probabilidade de que o D^0 tenha vindo realmente da interação primária. A fim de simplificar a figura, na verdade nós plotamos e cortamos o logaritmo (base 10) do parâmetro de impacto no exercício.
- **DO PT** : é a quantidade de movimento do D^0 transversa à linha do feixe do LHC.

Agora vamos prosseguir com o exercício em si.

3.1 Exercício 1: Ajustar a distribuição de massa e obter as distribuições de variáveis de sinal

O objetivo deste exercício é ajustar a distribuição da variável **D0 mass** e extrair o número e o grau de pureza do sinal.

1. Clique no botão **Plotar massa do D0** para traçar a distribuição total da massa. Você verá um pico (sinal) no topo de uma distribuição plana (ruído). O pico pode ser descrito por uma função gaussiana, cuja média corresponde à massa do D^0 e cuja largura (σ) é determinada pela resolução experimental do detector LHCb.
2. Clique em **Ajustar distribuição de massa** para ajustar a distribuição usando uma função gaussiana para o sinal e uma função linear para o ruído.
3. Olhe para a distribuição de massa ajustada. Você pode separá-la em três regiões: a região do sinal e duas faixas laterais que contêm somente ruído: uma acima do sinal (a faixa lateral superior) e outra abaixo do sinal (a faixa lateral inferior). A distribuição gaussiana contém 99.7% de seus eventos dentro de três desvios padrão da média, logo esta região de “três sigma” em torno da média é geralmente a definição da região de sinal.
4. Use o cursor chamado **Sig range** para definir o início e o fim da região do sinal. Todos os eventos que não caem na faixa de sinal, serão considerados na região de ruído.
5. Agora você pode usar as definições das regiões de sinal e de ruído na variável massa para determinar as distribuições de sinal e de ruído em outras variáveis. Clique no botão **Plotar distribuição**. Você verá as distribuições de sinal (azul) e de ruído (vermelho) para as outras três variáveis plotadas ao lado da distribuição de massa. Você deve discutir o exercício com um(a) instrutor(a) neste momento.

3.2 Exercício 2: Medir o tempo de vida do D^0

O objetivo deste exercício é usar a amostra de sinal que você obteve na etapa anterior para medir o tempo de vida da partícula D^0 . É a mesma quantidade que a meia-vida de uma partícula radioativa: o D^0 decai de acordo com uma distribuição exponencial, e se essa exponencial for ajustada à distribuição do tempo de decaimento do D^0 , a inclinação da exponencial será o inverso do tempo de vida do D^0 .

1. Faça o ajuste do tempo de vida do D^0 .
2. Compare a inclinação desta exponencial com o inverso do tempo de vida do D0 dado pelo *Particle Data Group*. Converse com um(a) instrutor(a) sobre quão bem os dois valores concordam.
3. Além das incertezas estatísticas, as medições podem sofrer de incertezas sistemáticas causadas por aparelhos descalibrados, ou por um modelo incorreto do ruído. Uma técnica básica para estimá-los é repetir a medição alterando os critérios utilizados para selecionar eventos de sinal. Se o resultado mudar significativamente ao se modificar os critérios, saberemos que há alguma coisa errada!
4. Repita seu ajuste para o tempo de vida do D^0 enquanto varia o máximo permitido do logaritmo do parâmetro de impacto do D^0 . Os valores permitidos variam de -4.0 a 1.5 no ajuste inicial. Mova o valor superior a partir de 1.5 até -1.9 em passos de 0.20 , e refaça o ajuste do tempo de vida do D0 em cada ponto, salvando os resultados à medida que avança.
5. Trace um histograma que mostra o valor do tempo de vida do D^0 como função do corte superior do logaritmo do parâmetro de impacto. Discuta a forma, e o que ela representa sobre o tempo de vida do D^0 , com um(a) instrutor(a).
6. Quais outras fontes de incertezas sistemáticas podem ser consideradas ao fazermos a medição do tempo de vida?