

LHCb Masterclass : Mesurer le temps de vie de la particule charmée D^0 au LHC

1 Introduction

Le grand collisionneur de hadrons (LHC pour Large Hadron Collider) permet aux physiciens des particules élémentaires d'étudier l'Univers à la plus haute énergie atteinte par un accélérateur de particules à ce jour (de l'ordre d'une dizaine de TeV). Cette énergie inédite a permis de produire et d'observer la seule particule prédite par le Modèle Standard de la Physique des Particules (MS) dont la détection avait échappé aux précédentes générations d'expériences. Le LHC est également un outil incomparable pour produire en grande quantité des particules dont l'existence est établie depuis longtemps. Les grandes statistiques enregistrées par les expériences du LHC permettent toutefois d'étudier finement leurs propriétés et de les comparer aux prédictions du MS pour mettre en évidence des déviations qui pourraient signaler l'existence d'une Physique inconnue.

Les particules charmées (qui contiennent un quark charmé), identifiées pour la première fois au milieu des années 1970) font partie de cette classe de particules dont l'étude précise des propriétés pourrait révéler des surprises. Une collision de protons au LHC sur dix produit une particule charmée. L'expérience LHCb a déjà enregistré plus d'un milliard d'événements contenant la désintégration de telle particules.

La production abondante des particules charmées s'accompagne d'une production non moins abondante de bruits de fond. Une des missions du physicien est de distinguer les particules charmées authentiques dans le détecteur (le signal) des combinaisons qui leur ressemblent (le bruit de fond). Nous vous proposons dans cet exercice de suivre nos traces en explorant le résultat d'une sélection de collisions de protons enregistrées en 2011 par l'expérience LHCb, dans laquelle signal et bruit de fond d'une particule charmée sont présents. Les grandes étapes de l'exercice sont les suivantes :

1. Utiliser le visualisateur d'événements du spectromètre LHCb pour rechercher des particules charmées en séparant le signal des bruits de fond.
2. Reconstruire la masse de la particule charmée à partir des informations enregistrées par le détecteur sur ses produits de désintégration.
3. Ajuster aux données un modèle qui décrit la distribution de masse du signal et du bruit de fond afin de déterminer leurs nombres et proportions relatives.
4. Nous nous intéresserons en premier lieu au temps de vie d'une particule charmée. Tout comme les décroissances radioactives, la désintégration d'une particule est un phénomène aléatoire qui répond à une loi exponentielle, dont vous allez mesurer les paramètres.

Dans le modèle des quarks, la particule D^0 est un édifice composé d'un quark charme (noté c) et d'un antiquark haut (up, noté \bar{u}). La désintégration reconstruite dans le spectromètre LHCb est $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, avec K^- ($\bar{u}s$) un kaon de charge électrique élémentaire négative et π^+ ($u\bar{d}$) un pion de charge élémentaire positive. Ces deux particules sont mesurées par le système de trajectographie du spectromètre LHCb. L'exercice débute avec une sélection initiale qui permet d'observer le signal.

Faisons d'abord un tour d'horizon du détecteur LHCb, représenté sur la Figure 1. LHCb est un spectromètre qui couvre la région angulaire comprise entre 0.7° et 15° par rapport à la ligne des faisceaux, portée par l'axe z .

Le détecteur comprend un système de trajectographie dont l'objectif est de reconstruire la trajectoire des particules chargées qui le traversent et de mesurer leur énergie de vitesse (impulsion, notée pc où c est la célérité de la lumière dans le vide). En partant du point de collision des faisceaux vers l'extérieur du détecteur, ce système se compose d'un détecteur Silicium à haute résolution (VELO, pour VErteX LOcator) chargé de reconstruire le lieu des collisions proton-proton ainsi que ceux des désintégrations de particules similaires à celles que vous allez étudier, puis d'un ensemble de quatre

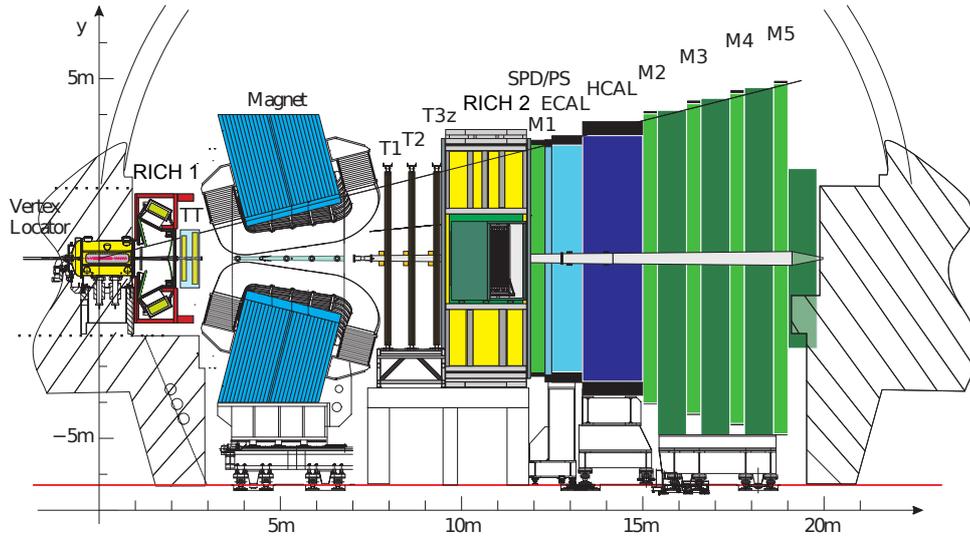


Figure 1: Le détecteur LHCb. L'axe des abscisses que nous noterons z indique la direction des faisceaux de protons du LHC.

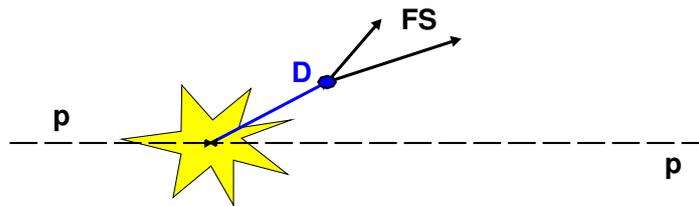


Figure 2: Le vertex de désintégration d'une particule D^0 ("D") décalé du point de collision des protons (indiqué par l'étoile).

chambres de trajectographie. La première chambre (TT) est séparée des trois suivantes (T1, T2 et T3) par un aimant dipolaire (≈ 1 Tesla), dont la fonction est de courber les particules. La mesure de la courbure de la trajectoire dans l'aimant permet de déterminer leur impulsion et leur charge électrique. Quelques performances en passant : la précision de la mesure de l'impulsion varie de 0.4% à 0.6% lorsque l'impulsion des particules chargées varie de 5 GeV/c à 100 GeV/c. La distance de plus petite approche d'une trajectoire par rapport à un point de collision ou de désintégration (on appellera ce point vertex et la distance paramètre d'impact) peut être mesurée avec une incertitude typique de 20 μm . La résolution sur les paramètres d'impact se reflète directement sur la précision de la mesure du temps de vol du D^0 , dont l'incertitude typique est de l'ordre de 50×10^{-15} s.

La Figure 2 montre les positions des vertex de production d'un candidat D^0 (dit primaire, la collision proton-proton) et de sa désintégration (dit secondaire) en K^- et π^+ . La distance qui les sépare est un bon moyen pour sélectionner le signal par rapport au bruit de fond, qui provient majoritairement de la combinaison de deux particules dont l'une au moins a été produite au vertex primaire.

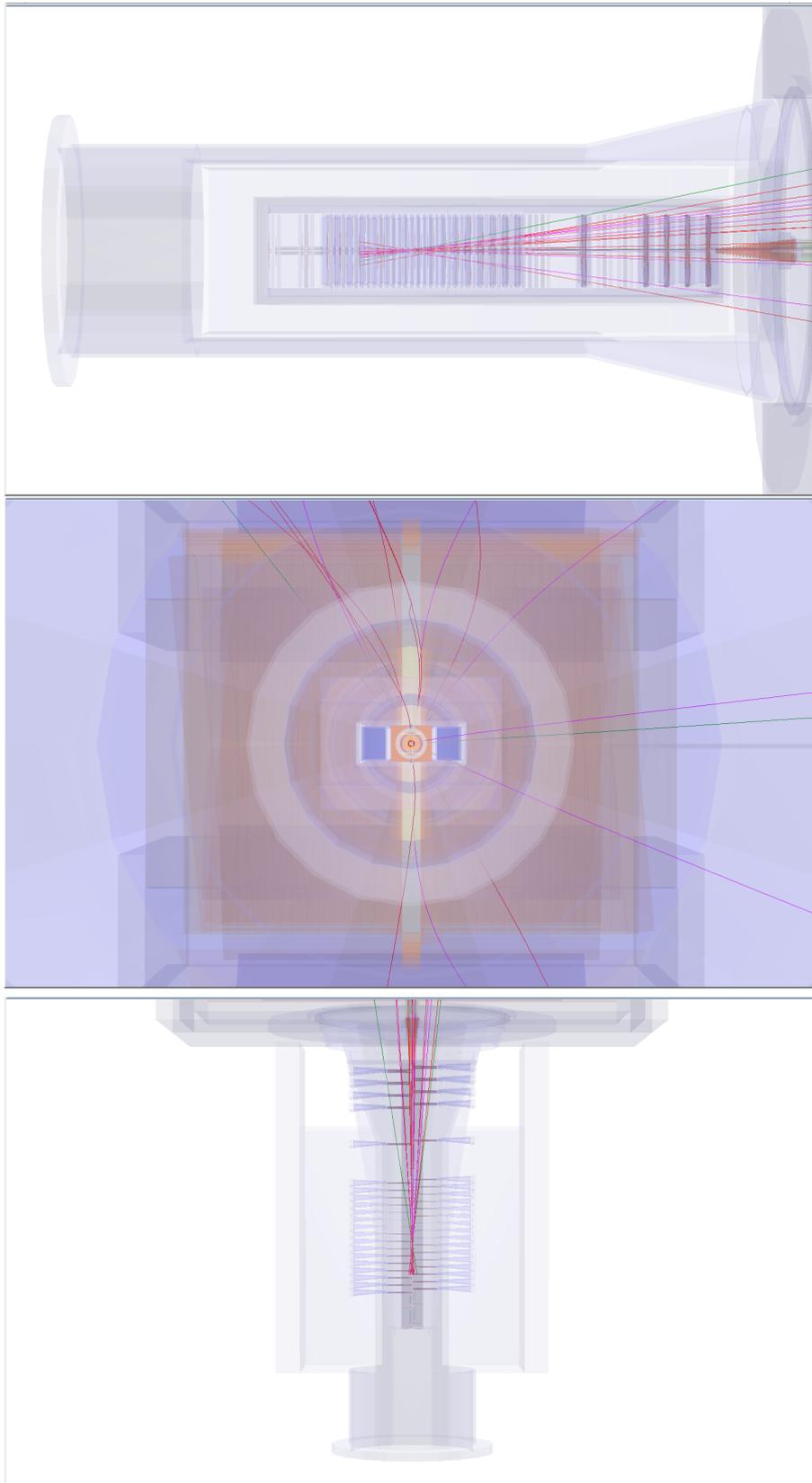


Figure 3: Trois vues d'un même événement. De haut en bas : $y-z$, $y-x$, and $x-z$.

Les données de LHCb sont accessibles au moyen d'une interface graphique utilisateur (GUI) – Lancez l'interface en cliquant sur le bouton correspondant.

Le bouton “help” donne accès aux instructions en ligne du GUI.

L'exercice se décompose en deux parties :

- Recherche au moyen du visualisateur d'événements des vertex de désintégrations déplacés par rapport au point d'interaction.
- Analyse d'événements sélectionnés, séparation du signal et du bruit de fond, mesure du temps de vie de la particule D^0 .

2 Exercice 1 : regarder des événements

Après avoir lancé l'exercice (*Event Display*) et chargé un événement, vous obtenez une image du détecteur LHCb et des trajectoires des particules (*traces*) que nous avons reconstruites. Un code couleur accompagne la visualisation des traces, dont la légende est indiquée au bas du GUI.

La figure 3 montre les différentes vues en deux dimensions de l'événement dans l'espace . Il est souvent nécessaire de regarder les trois projections pour identifier les vertex déplacés. Ces derniers apparaissent comme une paire de traces qui s'interceptent loin des autres traces de l'événement. Un clic sur une particule vous fournit les informations mesurées (qui incluent la masse et l'impulsion de la particule) dans la boîte **Particle Info**.

Nous avons mentionné plus haut dans ces lignes la désintégration recherchée : $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$. Lorsque que vous avez identifié un candidat possible, utilisez le bouton **Save Particle** pour chacune des deux traces : vous avez un candidat D^0 !

Il est possible avec un peu de relativité restreinte de calculer la masse du candidat à partir de la connaissance des impulsions et de la nature des produits de désintégration. Le bouton **Calculate** fait ça pour vous. Si vous pensez que la masse calculée est compatible avec celle d'un D^0 , cliquez **Add** pour sauver votre sélection. En sauvant une combinaison pour chaque événement présenté, vous construisez l'histogramme des masses des vertex déplacés.

Attention, le détecteur ne résout pas parfaitement cette masse; il y a des incertitudes de mesure. Un authentique D^0 ne sera pas mesuré à sa masse nominale. Comme il s'agit de vraies données, signal et bruit de fond sont présents dans l'échantillon et il y a peu d'intérêt à conserver tous les bruits de fond. Il convient donc de ne sélectionner que les événements ayant une masse comprise dans l'intervalle $[1816 - 1914]$ MeV, ce qui correspond à $\pm 3\%$ autour de la masse nominale. L'exercice vous alertera si vous quittez cet intervalle. Certains vertex déplacés sont difficiles à identifier. Mettez l'événement de côté et revenez-y si vous avez le temps à la fin de l'exercice.

Lorsque vous avez scruté tous les événements, vous pouvez étudier l'histogramme des masses des candidats D^0 en cliquant le bouton **Draw**.

N'oubliez pas de sauver votre histogramme (**Save Histogram**). L'ensemble des histogrammes de votre classe seront additionnés et le résultat final sera discuté avec les chercheurs présents. Il nourrira une partie de la restitution avec vos collègues européens.

3 Exercice 2 : mesurer

Armons-nous d'abord de quelques définitions utiles :

- **D0 mass** : est la masse invariante de la particule candidate D^0 . Le signal dans la distribution de cette variable est une structure résonante assise sur un bruit de fond plat. L'intervalle de masses pour votre exercice est défini comme $[1816 - 1914]$ MeV. La forme du signal répond à une distribution statistique gaussienne (on parle également d'une distribution normale). La moyenne de cette distribution est la masse de la particule D^0 et la dispersion autour de cette valeur est due à la résolution expérimentale du détecteur.
- **D0 TAU** : est la distribution des temps de désintégrations des candidats D^0 . Elle est décrite pour les événements de signal par une loi exponentielle (traduisant le caractère aléatoire du

hénomène) dont l'argument est le temps de vie de la particule D^0 . Le bruit de fond peuple les temps de désintégration autour de zéro.

- **D0 IP** : est le paramètre d'impact du D^0 (la distance de plus petite approche de la trajectoire du candidat par rapport à la position du vertex primaire, le lieu de l'interaction proton-proton. Il s'exprime en millimètres. Un paramètre d'impact petit (compatible avec zéro) indique que le candidat provient en effet directement du vertex primaire. Pour faciliter la représentation de cette variable, elle est exprimée en logarithme de base 10.
- **D0 PT** : est l'impulsion du candidat D^0 dans le plan perpendiculaire à la droite qui supporte la ligne des faisceaux. On parlera d'impulsion transverse.

Au travail !

3.1 Première partie : ajuster la distribution de masse des candidats D^0

L'objectif de cette partie est de compter le nombre d'événements de signal et de bruit de fond.

1. Cliquez sur le bouton **Plot D0 mass** pour afficher sur un graphique la distribution des événements sélectionnés dans l'exercice 1. Qu'observez-vous? Où se trouve le signal? Y-a-t'il des bruits de fond? Quelles fonctions mathématiques pourraient décrire ces événements?
2. Cliquez sur le bouton **Fit mass distribution** pour ajuster un modèle prédéfini (une fonction gaussienne additionnée à une fonction affine) à ces données. Une distribution gaussienne contient 99.7% des événements qu'elle décrit à l'intérieur de trois écarts-types. C'est un intervalle généralement admis pour définir la région du signal. Commentez la qualité de l'accord entre le modèle ajusté et les données.
3. Utilisez la règle glissante **Sig range** pour définir le début et la fin de la région du signal. Les événements en dehors de l'intervalle défini appartiendront à la région de bruits de fond.
4. Cette sélection des régions signal et bruit de fond vous permet de regarder d'autres variables que la masse. Cliquez sur le bouton **Plot distributions** pour observer les distributions des variables **D0 TAU**, **D0 IP** et **D0 PT** figurées en rouge pour le bruit de fond et en bleu pour le signal.

3.2 Seconde partie : mesurer le temps de vie du D^0

Vous allez utiliser l'échantillon de signal D^0 que vous avez sélectionné dans la première partie de cet exercice pour étudier la distribution de leurs temps de désintégration. Vous réaliserez à nouveau l'ajustement d'un modèle à ces données. Le modèle prédéfini est une loi exponentielle $\frac{1}{\tau} \exp \frac{-t}{\tau}$ où t est la variable **D0 TAU** et τ est le temps de vie du D^0 .

1. Cliquez sur le bouton **Fit decay time distribution** pour ajuster le temps de vie du D^0 . Commentez la qualité de l'accord entre le modèle ajusté et les données. Vous pouvez comparer également votre résultat avec la moyenne mondiale des mesures du temps de vie du D^0 déterminée par le Particle Data Group. Notez que les incertitudes sur votre mesure sont d'ordre statistique (la connaissance de la valeur du temps de vie est limitée par le nombre d'événements dans votre échantillon). La précision de l'instrument est une source d'erreur mais nous pouvons avantageusement négliger les incertitudes associées dans notre cas.
2. Répétez l'ajustement du temps de vie du D^0 en faisant varier le paramètre d'impact **D0 IP** de 1.5 à -1.9 par pas de 0.20 et sauvez les résultats à chaque étape. Plus le paramètre d'impact est petit, plus la production du candidat D^0 au vertex primaire est probable.
3. Affichez l'histogramme de l'évolution de la mesure du temps de vie du D^0 en fonction du paramètre d'impact maximum. Que concluez-vous?