

LHCb Masterclass : Messung der D^0 -Lebenszeit am LHC

1 Einleitung

Der Large Hadron Collider (LHC) wird nicht nur zur Suche nach exotischen neuen Elementarteilchen, sondern auch zur Produktion von bekannten Teilchen verwendet, deren präzise Eigenschaften aber noch nicht gut genug verstanden sind. Zu diesen bereits bekannten Teilchen gehören z.B. Charm-Teilchen, d.h. Teilchen die ein Charm-Quark (c) enthalten. Teilchen dieser Art wurden vor 30 Jahren zum ersten Mal entdeckt und werden am LHC nun in etwa jedem zehnten Ereignis produziert. Insgesamt wurden am LHCb-Experiment am LHC schon mehr als eine Milliarde Ereignisse aufgenommen in denen ein Charm-Teilchen enthalten ist.

Obwohl am LHC sehr viele Charm-Teilchen produziert werden, entstehen noch viel mehr Teilchen die nur irrtümlich für das gesuchte Signal gehalten werden. Diese nennt man „Untergründe“. Um nun Informationen aus den großen Datensätzen gewinnen zu können, ist es notwendig die vorhandenen Untergründe exzellent zu verstehen. In den Aufgaben heute wird es darum gehen echte Kollisionen, die während der Datennahme im Jahr 2011 am LHCb-Experiment aufgenommen wurden, auszuwerten. Der Datensatz besteht sowohl aus Signal- als auch aus Untergrundereignissen. Wir widmen uns heute verschiedenen Dingen:

1. Wir benutzen die Ereignis-Darstellung der Proton-Proton-Kollision im Inneren des LHCb-Detektors, um nach Charm-Teilchen zu suchen und diese vom Untergrund zu trennen.
2. Wir fitten analytische Funktionen für Signal und Untergrund an die Daten, um die Anzahl an Signal-Ereignissen im Datensatz und seine Reinheit¹ zu bestimmen.
3. Wir bestimmen die Verteilung der Signal-Ereignisse in einer gegebenen Variablen, indem wir die Verteilung des Untergrunds von der kombinierten Verteilung von Signal- und Untergrund-Ereignissen abziehen. Hierzu benutzen wir das Ergebnis des vorhergehenden Fits, um ein reinen Untergrund-Datensatz zu erhalten.
4. Das untersuchte Signal zerfällt exponentiell mit der Zeit, wie man es auch von radioaktiven Isotopen kennt. Wir können die Ereignisse, die den vorherigen Schritt überleben, jetzt nutzen um die Lebenszeit der Signal- Teilchen zu messen. Sie ist definiert als die Zeit die es braucht bis ein Anteil von $(e - 1)/e$ der Signal-Ereignisse zerfällt. Hierbei ist $e \approx 2.718$ die Basis des natürlichen Logarithmus. Das Konzept dürftest du schon von der Halbwertszeit radioaktiver Zerfälle kennen.

Der Datensatz den wir für diese Aufgabe benutzen, besteht aus Kandidaten für ein bestimmtes Charm-Teilchen, das unter dem Namen D^0 bekannt ist. Das D^0 besteht aus einem Charm-Quark und einem Up-Anti-Quark. Für diese Messung untersuchen wir den Zerfallskanal $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, in dem die Endprodukte ein Kaon (K^- ; bestehend aus einem Strange-Quark und einem Up-Anti-Quark) und ein Pion (π^+ ; bestehend aus einem Down-Anti-Quark und einem Up-Quark) sind. Diese Teilchen haben so große Lebenszeiten, dass sie für unsere Zwecke als stabil angesehen werden können. Die Teilchenkandidaten wurden anhand einiger schwacher Kriterien vorselektiert, so dass wir bereits ein klares Signal erkennen können, aber weiterhin zahlreiche Untergrundereignisse sehen.

Bevor wir nun zu den Aufgaben kommen, wollen wir uns die Zeit nehmen um den LHCb-Detektor (s. Abb. ??) besser kennen zu lernen. Dieser ist ein sogenanntes Vorwärtsspektrometer, das einen Winkelbereich von 0.7° und 15° relativ zum Strahlrohr abdeckt. Das Strahlrohr enthält den Strahl der Protonen, befindet sich im Bild bei $y = 0$ und verläuft in z -Richtung. Im folgenden bezeichnet „transversal“ die Richtung senkrecht zum Strahlrohr, „upstream“ weist zu kleineren und „downstream“ zu größeren z -Werten.

Der Detektor beinhaltet ein hoch-präzises Spurfindungssystem. Es besteht aus Siliziumstreifendetektoren in direkter Umgebung des Wechselwirkungspunktes, wo die Protonpakete aufeinander

¹Als Reinheit bezeichnet man den Anteil der Signal-Ereignisse im gesamten Datensatz.

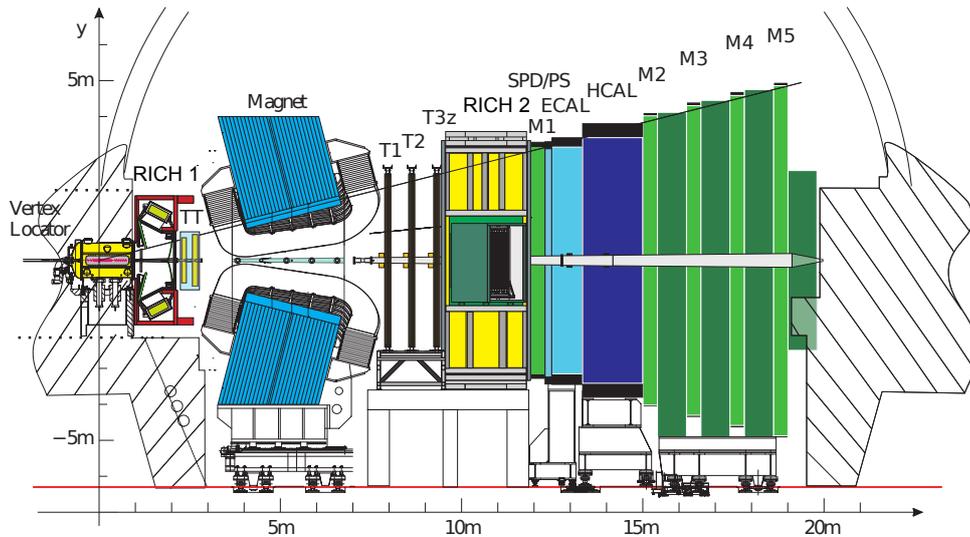


Abbildung 1: Der LHCb Detektor. Die z -Achse liegt in Richtung des LHC-Strahls.

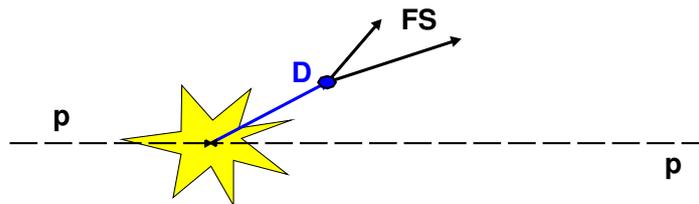


Abbildung 2: Der D^0 -Sekundär-Vertex („D“) liegt versetzt zur pp -Interaktion (gelber Stern-förmiger Bereich). FS bezeichnet die Zerfallsteilchen des D^0 .

treffen. Ein großer Siliziumstreifendetektor befindet sich auf der upstream-Seite des Magneten und drei Stationen von Siliziumstreifendetektoren und Driftröhren auf der downstream-Seite. Der Magnet ist ein normalleitender Dipolmagnet mit einem integrierten Magnetfeld von 4 Tm. Geladene Teilchen hinterlassen in den Bereichen um den Interaktionspunkt gerade Spuren, dort ist das Magnetfeld nicht spürbar. Im Magnetfeld erfahren sie dann eine Ablenkung und treffen anschließend auf die downstream-Systeme. Anhand der Krümmung ihrer Bahn lassen sich Rückschlüsse auf Impuls und Ladung ziehen. Das gesamte Spurfindungssystem hat eine relative Impulsauflösung $\Delta p/p$ zwischen 0.4% bei 5 GeV/c bis 0.6% bei 100 GeV/c, eine Stoßparameterauflösung² von 20 μm für Spuren mit hohem Transversalimpuls und eine Lebenszeitauflösung von 50 fs.

Eine besondere Eigenschaft der D^0 -Teilchen ist ihre lange Lebenszeit – welche wir in dieser Übung messen wollen. Praktisch bedeutet das, dass sie einen zweiten, „sekundären“ Vertex bilden, der vom „primären“ Vertex der Proton-Proton-Wechselwirkung klar räumlich getrennt ist. Abb. ?? zeigt den Primär- und Sekundärvertex. Diese Eigenschaft der D^0 , zusammen mit ihrer hohen Produktionsrate, erlaubt uns eine gute Unterscheidung des Signal vom meist aus zufälligen Teilchenkombinationen bestehenden Untergrund.

²Der Stoßparameter ist der minimale Abstand zwischen einer Teilchenspur und einem Vertex, hier meist der primäre Proton-Proton-Interaktionsvertex.

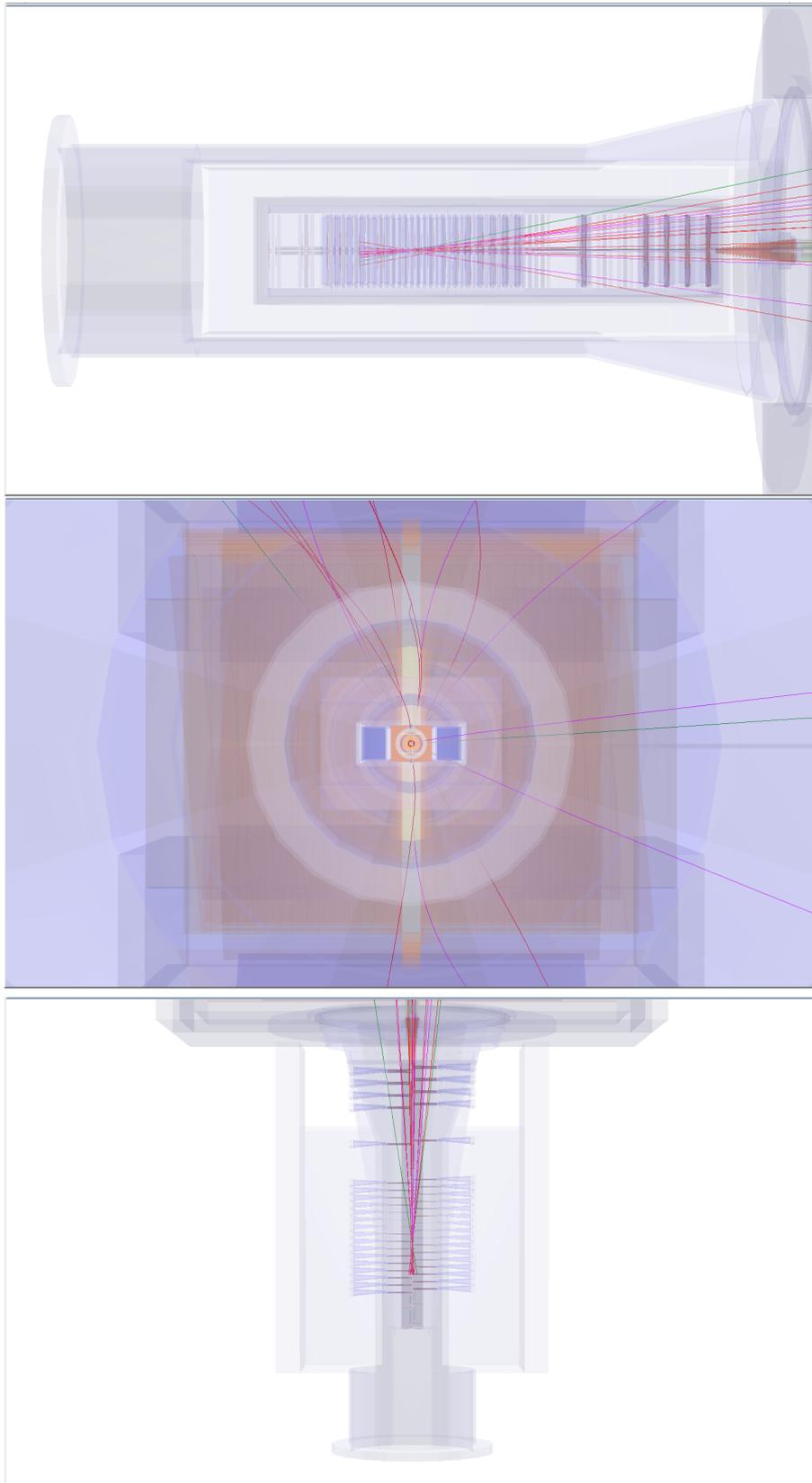


Abbildung 3: Drei Ansichten eines Ereignisses, von oben nach unten in der y - z -, x - y - und x - z -Ebene.

Der zur Verfügung gestellte Datensatz kann mit einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) betrachtet werden. Starte und probiere diese einfach mal aus! Über die „Hilfe“-Schaltfläche kannst du jederzeit Hinweise bekommen oder dir noch einmal die Aufgaben und Erklärungen durchlesen. Fangen wir nun also mit der Aufgabe an. Sie besteht aus zwei Teilen: der erste Teil ist das Ereignis-Display welches du benutzen kannst um sekundäre D^0 -Zerfallsvertices zu suchen, der zweite Teil ist ein Fitter mit welchem du Signal von Untergrund trennen kannst und die Lebenszeit des D^0 bestimmst.

2 Das Ereignis-Display

Ziel dieser Teilaufgabe ist es, Zerfallsvertices der D^0 -Teilchen im Vertex- Detektor des LHCb-Experiments zu finden. Wenn du die Aufgabe startest und das erste Ereignis lädst, siehst du eine Ansicht des LHCb-Detektors und Teilchenspuren in seinem Inneren. Die Spuren sind farbkodiert. Die Legende unten verrät dir, welche Farbe zu welchem Teilchentyp gehört.

Um es dir zu vereinfachen, kannst du das Ereignis in drei verschiedenen Projektionen betrachten: $y-z$, $y-x$ und $x-z$, gezeigt ist das an einem Beispiel in Abb. ???. Die verschiedenen Ereignisse werden sich unterschiedlich gut in den drei verschiedenen Projektionen darstellen lassen, probiere einfach aus welche Ansicht am besten ist. Sekundärvertices sind als zwei sich kreuzende Spuren identifizierbar, die weit weg von anderen Spuren in dem Ereignis liegen. Wenn du auf eine Teilchenspur klickst, werden dir Informationen zum zugehörigen Teilchen (wie dessen Masse und Impuls) in der **Teilcheninformations**-Box angezeigt.

Ein D^0 -Teilchen zerfällt in ein Kaon und ein Pion, du musst also nach einem Vertex suchen an dem sich eine Kaon- und eine Pion-Spur kreuzen. Wenn du eine Spur gefunden hast, von der du meinst, sie gehöre zu solch einem Sekundärvertex, kannst du sie mit Hilfe der **Teilchen speichern**-Schaltfläche speichern. Sobald du zwei Teilchen gespeichert hast, kannst du mit der **Berechnen**-Schaltfläche ihre Masse berechnen. Denkst du diese Masse ist mit der gesuchten D^0 -Masse kompatibel? Dann speicher diese Kombination mit der **Hinzufügen**-Schaltfläche. Indem du nun für jedes Ereignis eine Kombination speicherst, erstellst du ein Histogramm aller berechneten Massen aus den verschiedenen Ereignissen.

Bedenke dabei immer, dass du dir echte Daten anschaust, die natürlich sowohl Signal als auch Untergrund enthalten. Außerdem hat der Detektor eine endliche Auflösung und nicht einmal alle wahren Signalkombinationen werden exakt der D^0 -Masse entsprechen. Sie sollten aber in etwa im Bereich zwischen 1816-1914 MeV liegen (das sind ca. $\pm 3\%$ um die wahre D^0 -Masse). Wenn du versuchst eine Kombination zu speichern, deren Masse zu weit entfernt liegt, wird dich die Benutzeroberfläche warnen, dass du nicht das richtige Paar gefunden hast. Du kannst diese Kombinationen dann nicht speichern.

Wenn du für ein Ereignis auch nach ein paar Minuten noch keinen guten Sekundärvertex gefunden hast, dann probiere das nächste aus. Du kannst immer noch zu einem späteren Zeitpunkt zurückkehren und versuchen einen Vertex zu finden. Sobald du alle Ereignisse bearbeitet hast, kannst du mit Hilfe der **Zeichnen**-Schaltfläche das Massenhistogramm erstellen. Du solltest die Form deiner Verteilung jetzt mit einem der Betreuer diskutieren.

Zum Schluss vergiss bitte nicht das Histogramm mit der **Histogramm speichern**-Schaltfläche zu sichern. Die gespeicherten Histogramme aller Teilnehmer können nun kombiniert werden. Diskutiert das Ergebnis in eurer Gruppe.

3 Der Fit

Bevor wir mit der eigentlichen Aufgabe anfangen, ist es nützlich erst einmal alle verwendeten Variablen kennen zu lernen:

D0 mass: Dies ist die invariante Masse des D^0 -Teilchens. Das Signal kann als peakende Struktur über einem flachen Untergrund gesehen werden. Das für unsere Analyse relevante Massenfenster liegt bei 1816-1914 MeV. Die Signalform wird durch eine Gauß-Verteilung (auch als Normalverteilung bekannt) beschrieben. Der „Mittelwert“ der Verteilung ist die Masse des D^0 , während die „Breite“ die experimentelle Auflösung des Detektors beschreibt.

D0 TAU: Die ist die Verteilung der Zerfallszeiten der D^0 -Kandidaten. Das Signal wird hierbei durch eine einzelne Exponentialfunktion beschrieben. Der Koeffizient im Exponenten entspricht dem Inversen der D^0 -Lebenszeit ($1/\tau_{D^0}$). Der Untergrund konzentriert sich bei kurzen Zerfallszeiten.

D0 IP: Dies ist der D^0 -Stoßparameter (engl. „impact parameter“), er bezeichnet die minimale Entfernung zwischen der D^0 -Spur und der primären Proton-Proton-Interaktion in einem Ereignis. Je kleiner der Stoßparameter, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass das D^0 tatsächlich aus der primären Interaktion stammt. Um die Handhabung zu vereinfachen, plotten und schneiden wir diese Größe logarithmiert (zur Basis 10: $\log_{10}(\text{IP}/1 \text{ mm})$).

D0 PT: Die ist der Transversalimpuls des D^0 . Transversal bedeutet hier, dass nur der Anteil des Impulses senkrecht zur Strahlrichtung betrachtet wird.

Lasst uns jetzt mit der Aufgabe beginnen.

3.1 Fit der Massenverteilung und Bestimmung der Signal-Verteilung für die Kontrollvariablen

Das Ziel dieser Aufgabe ist ein Fit der Verteilung der **D0-Massenvariable** und die Bestimmung des Signalanteils und der Signalreinheit.

1. Klicke auf die Schaltfläche **D0 -Masse plotten** um die Massenverteilung des D^0 -Teilchens zu plotten. Du siehst einen Signal-Peak auf einer flachen Untergrundverteilung. Der Peak wird durch eine Gauß-Funktion beschreiben, deren Mittelwert der D^0 -Masse entspricht und deren Breite (σ) ein Maß für die Detektorauflösung ist.
2. Mit einem Klick auf die Schaltfläche **Massen-Verteilung fitten** fittest du die Verteilung mit einer Gauß-Funktion für den Signal- und einer linearen Funktion für den Untergrundanteil.
3. Wirf einen Blick auf die gefittete Massenverteilung. Du kannst sie in drei Regionen unterteilen: die Signal-Region und zwei „Seitenbänder“ die nur Untergrund enthalten. Wir sprechen hier von dem „unteren“ und „oberen“ Seitenband. Eine Gaußverteilung enthält 99.7% ihrer Ereignisse innerhalb von drei Standardabweichungen um den Mittelwert. Einigen wir uns also darauf, dass wir dieses „drei Sigma“-Intervall Signalbereich nennen.
4. Benutze den Regler mit der Bezeichnung **Sig range** um den Anfang und das Ende des Signalbereichs zu definieren. Alle Ereignisse die nicht in diesen Bereich fallen, können von uns nun als Untergrund angesehen werden.
5. Du kannst nun diese Definitionen der Signal- und Untergrundintervalle in der Massenvariable nutzen um die Signal- und Untergrundverteilungen anderer Variablen zu bestimmen. Benutze die Schaltfläche **Verteilungen plotten**. Du siehst jetzt die Signal- (blau) und Untergrundverteilungen (rot) für die anderen drei Variablen. Diskutiere deine Ergebnisse jetzt mit einem der Betreuer.

3.2 Messung der D^0 -Lebenszeit

Ziel dieser Aufgabe ist es den Signaldatensatz aus dem vorherigen Schritt zur Bestimmung der D^0 -Lebenszeit zu nutzen. Die Lebenszeit ist eine analoge Größe zur Halbwertszeit in radioaktiven Zerfällen: die D^0 -Teilchen zerfallen entsprechend einer exponentiellen Verteilung. Wenn wir nun diese exponentielle Verteilung an unsere Verteilung der D^0 -Zerfallszeiten fitten, ergibt der Koeffizient im Exponenten die gesuchte Lebenszeit.

1. Fitte die Lebenszeit des D^0 .
2. Vergleiche den Koeffizienten der Exponentialfunktion mit der D^0 -Lebenszeit, die die Particle Data Group zur Verfügung stellt. Besprich mit einem der Betreuer, wie gut diese Werte übereinstimmen.

3. Zusätzlich zu statistischen Unsicherheiten kann die Messung unter systematischen Unsicherheiten leiden. Diese können verschiedene Quellen haben, zB. falsch kalibrierte Messgeräte oder ein falsches Modell für den Untergrund. Eine einfache Möglichkeit diese Effekte abzuschätzen ist es die Messung mit geändert Selektionskriterien zu wiederholen. Wenn sich das Ergebnis mit verschiedenen Auswahlkriterien signifikant ändert, wissen wir, dass etwas falsch gelaufen ist.
4. Wiederhole den Fit für die Lebenszeit, während du das erlaubte Maximum des D^0 -Stoßparameters änderst. Der erlaubte Bereich geht im ursprünglichen Fit von -4.0 bis 1.5 . Ändere die obere Grenze von 1.5 nach -1.9 in Schritten von 0.2 und fitte jedes Mal die D^0 -Lebenszeit neu. Speicher alle deine Ergebnisse.
5. Plote das Histogramm der D^0 -Lebenszeiten in Abhängigkeit des Schnitts auf den Stoßparameter. Diskutiere die Form und was dies über die D^0 -Lebenszeit aussagt mit einem Betreuer.
6. Welche anderen Quellen systematischer Unsicherheiten sollten wir beachten wenn wir eine Lebenszeit-Messung durchführen?