

LHCb Masterclass :

Măsurarea timpului de viață al mezonului D^0 la LHC

1 Introducere

Large Hadron Collider (LHC) nu este doar un instrument pentru a căuta noi particule exotice ci și o fabrică de particule a căror existență este incontestabilă dar ale căror proprietăți nu sunt cunoscute îndeajuns de precis. Un astfel de exemplu îl constituie particulele "charm", adică particulele elementare ce conțin cel puțin un cuarc charm (sau c) și care au fost descoperite cu mai mult de 30 de ani în urmă. În aproximativ una din zece interacții de la LHC se produce o particulă charm, iar experimentul LHCb de la LHC a înregistrat peste un miliard de evenimente în care au apărut particule charm.

Chiar dacă acceleratorul LHC produce multe astfel de particule elementare, acestea sunt însoțite de un număr și mai mare de alte tipuri de particule ce pot fi confundate cu semnalul căutat (particule charm) și care alcătuiesc (zgomotul) evenimentele de fond. Pentru a extrage informația utilă din eșantioane atât de mari este necesar să cunoaștem și să avem un control excelent asupra efectelor diverselor surse de fond. Astăzi veți completa exerciții ce utilizează date măsurate provenind de la ciocniri reale, înregistrate de către experimentul LHCb în timpul funcționării LHC în anul 2011. Aceste date conțin evenimente identificabile atât cu semnalul cât și ca parte din fond. Setul de exerciții este creat cu scopul de a vă învăța următoarele:

1. Să utilizați un program de vizionare al ciocnirilor proton-proton din interiorul detectorului LHCb pentru a căuta particule charm și a separa semnalul de sursele de fond.
2. Să găsiți formele funcționale ce descriu (fitează) cel mai bine semnalul și fondul în date pentru a măsura numărul de evenimente cu semnal din eșantion și puritatea acestora (puritatea este definită ca fracțiunea de evenimente de semnal din numărul total de evenimente).
3. Să obțineți distribuția evenimentelor de semnal în raport cu o variabilă dată, pornind de la distribuția evenimentelor din eșantion (ce conține atât evenimente de semnal cât și de fond) și eliminând distribuția de fond. Rezultatul fitului de la pasul anterior este folosit pentru a găsi un subset de evenimente exclusiv de fond, și pentru a calcula, din semnalul estimat și puritatea acestuia, cantitatea adecvată de fond ce trebuie eliminată din zona de semnal.
4. Semnalul investigat scade exponențial cu timpul asemeni activității unui nucleu radioactiv. Astfel puteți utiliza setul de evenimente ce îndeplinește criteriile de la pasul anterior pentru a măsura "timpul de viață" al particulei semnal. Timpul de viață este definit ca intervalul de timp mediu necesar unei fracțiuni $(e - 1)/e$ dintr-o populație de particule de semnal ca să se dezintegreze, unde $e \approx 2.718$ este baza logaritmului natural. Altfel spus este analogul timpului de înjumătățire ce caracterizează dezintegrarea radioactivă.

Datele folosite în acest exercițiu conțin candidați pentru un tip de particulă charm numit D^0 ce se găsesc într-un eșantion de interacții de la LHC înregistrat aleator în timpul perioadei de achiziție de date din 2011. O particulă D^0 este alcătuită dintr-un cuarc charm și un anti-cuarc up. Particulele sunt măsurate în modul de dezintegrare $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$, în care particulele din starea finală (după dezintegrare) sunt un kaon (K^-) alcătuit dintr-un cuarc straniu și un anti-cuarc up, și un pion (π^+) ce conține un cuarc up și un anti-cuarc down. Aceste particule au un timp propriu de viață îndeajuns de lung pentru ca, având în vedere scopul acestui exercițiu, să fie considerate stabile cât timp parcurg detectorul LHCb. Particulele au fost preselecate utilizând niste criterii relaxate astfel încât începeți exercițiul cu un vârf de semnal vizibil dar care mai conține și evenimente de fond.

Înainte de a descrie pașii de urmat în cadrul exercițiului este util să vă familiarizați cu detectorul LHCb prezentat schematic în fig. ???. Acesta este un spectrometru cu un singur braț pe direcția înainte ce acoperă cu toate instrumentele sale un domeniu unghiular de măsură între $0,7^\circ$ și 15°

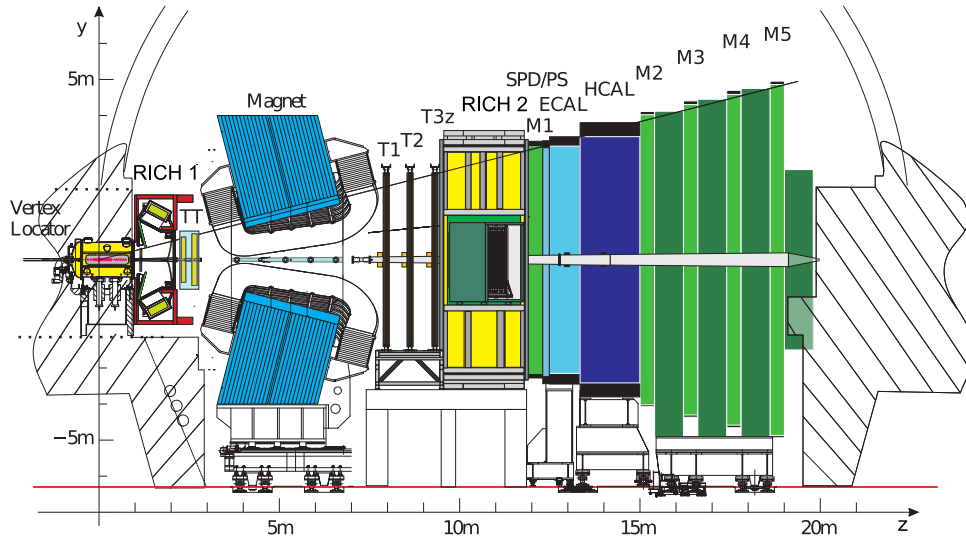


Figure 1: Detectorul LHCb. Axa Z este de-alungul direcției de propagare a fascicului prin LHC.

în jurul direcției fasciculelor din LHC. Direcția fasciculelor intersectează axa Y în punctul $y = 0$ în figură și coincide cu axa Z în sensul de creștere a acesteia de la stânga la dreapta. În cele ce urmează “transversal” se referă la direcția perpendiculară pe fasciculul LHC, în/din “amonte” sau în/dinspre “intrare” înseamnă valori mai mici ale coordonatei z iar în/din “aval” sau în/dinspre “ieșire” indică valori mai mari ale coordonatei z . Detectorul include un sistem de înaltă precizie de reconstrucție a traselor particulelor încărcate electric alcătuit dintr-un subdetector cu plăcuțe de siliciu ce înconjoară zona unde au loc ciocnirile între protoni (Vertex LOcator), un subdetector cu siliciu de suprafață mare (TT) situat în amonte de un dipol magnetic cu un cuplu de torsiune în jurul a 4 Tm , și trei stații de subdetectors cu plăci de siliciu și tuburi de drift (T1, T2, T3) amplasate în aval de acest dipol. Particulele încărcate electric lasă ca trase linii drepte în subdetectorul ce înconjoară zona de interacție, unde nu există câmp magnetic semnificativ, și ulterior traiectoriile sunt curbate în dipolul magnetic înainte de a lăsa trase în stațiile de identificare a traiectoriilor din aval de acesta. Impulsul și sarcina particulelor sunt deduse din curbura traiectoriilor indusă de câmpul magnetic. Întregul sistem de detecție a traselor are o rezoluție în impuls $\Delta p/p$ ce variază între 0,4 % la $5\text{ GeV}/c$ și 0,6 % la $100\text{ GeV}/c$, rezoluția pentru parametrul de impact ¹ de $20\text{ }\mu\text{m}$ pentru trase corespunzând particulelor cu impuls mare, și o rezoluție pentru timpul de viață de 50 fs.

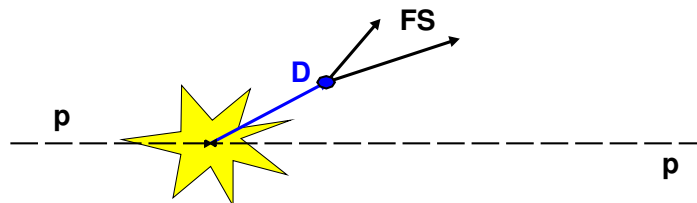


Figure 2: Punctul de interacție secundar al particulei D^0 (“D”), deplasat față de regiunea de interacție pp (zona galbenă în formă de stea).

O trăsătură caracteristică a particulelor D^0 este timpul lor de viață lung și ușor măsurabil (subiec-

¹Parametrul de impact este distanța de apropiere maximă între traiectoria particulei și un punct de interacție, adesea punctul de interacție primară proton-proton.

tul prezentului exercițiu). Practic acest lucru înseamnă că aceste particule formează un punct de interacție “secundar” care este deplasat față de punctul de interacție “primar” așa cum se poate vedea în fig. ???. Împreună cu rata abundentă de producere menționată anterior, acest fapt permite ca semnalul dat de particulele D^0 să fie bine separat (ușor de distins) din zgomotul de fond din evenimentul de bază, în principal datorat combinațiilor aleatoare ale particulelor produse în ciocnirea primară proton-proton.

Datele analizate în acest exercițiu sunt însoțite de o interfață grafică cu utilizatorul (IGU) ce este utilizată pentru a le accesa – vă rugăm să executați programul. Instrucțiunile de utilizare sunt disponibile în IGU folosind butonul “ajutor”. Exercițiul are două părți: prima constă în folosirea unui program ce afișează evenimente pentru a căuta punctele de interacție deplasate ale particulelor D^0 în interiorul detectorului LHCb, iar a doua este un program de fit pe care îl veți utiliza pentru a separa semnalul de fond și a măsura timpul de viață al particulelor D^0 .

2 Programul de afișare al evenimentelor

Scopul acestei părți a exercițiului este de a localiza punctele de interacție deplasate aparținând particulelor D^0 în detectorul de puncte interacție din cadrul ansamblului experimental LHCb. După ce lansați programul și încărcați un eveniment veți vedea imaginea schematică a detectorului LHCb și traiectoriile reconstruite (“trasele”) particulelor prin acesta. Aceste trase sunt colorate după un anumit cod, iar legenda din partea de jos a IGU explică asocierea dintre aceste culori și tipurile de particule ce au produs trasele.

Pentru a identifica mai ușor punctele de interacție, puteți vizualiza un eveniment în trei proiecții bidimensionale diferite, $y-z$, $y-x$, și $x-z$, așa cum este exemplificat în fig. ???. Evenimente diferite vor fi mai clare din diferite unghiuri de vedere, așa că experimentați cu toate cele trei proiecții disponibile! Punctele de interacție deplasate apar ca intersecția a două trase distanțată de celelalte trase din cadrul aceluiași eveniment. Când dați clic pe trasa unei particule informația despre particulă, incluzând și masa și impulsul acesteia, este afișată în căsuța **Informații particula**.

O particulă D^0 se dezintegrează într-un kaon și un pion astfel că va trebui să găsiți un punct de interacție (vertex) deplasat în care trasa unui kaon o intersectează pe cea a unui pion. Odată identificată o trasă ce considerați că face parte dintr-un vertex deplasat, puteți salva particula asociată din eveniment folosind butonul **Salveaza particula**. Când ați salvat două astfel de particule puteți calcula masa combinației lor (particulei mamă) apăsând butonul **Calculeaza**. În caz că masa combinației vi se pare compatibilă cu masa particulei D^0 , puteți salva această combinație cu butonul **Adauga**; salvând câte o astfel de combinație pentru fiecare eveniment veți putea construi o histogramă a masei asociate punctelor de interacție deplasate din diverse evenimente.

Tineți minte că analizați date reale ce conțin atât semnal cât și fond, iar detectorul are o rezoluție limitată, astfel că nu toate punctele de interacție deplasate vor avea asociată o masă exact egală cu cea a particulei D^0 (chiar și pentru semnal). Totuși masa ar trebui să se încadreze în intervalul 1816-1914 MeV (ce corespunde unui domeniu de 3% în jurul valorii adevărate a masei particulei D^0). Atunci când veți încerca să salvați o combinație cu masa prea departe de masa reală D^0 , programul vă va avertiza că nu ați identificat perechea potrivită de particule ce formează punctul de interacție deplasat și nu vă va permite să o salvați.

Dacă nu reușiți să găsiți un punct de interacție valid pentru un anumit eveniment timp de câteva minute, treceți la analizarea următorului eveniment și reveniți la evenimentele cu probleme dacă aveți timp către finalul exercițiului. După ce ați parcurs toate evenimentele puteți examina histograma de masă apăsând butonul **Deseneaza**. Discutați forma acestei histogramme cu un moderator.

La final nu uitați să apăsați butonul **Salveaza histograma** pentru a salva histograma creată pe disc! Histograma dvs. va fi apoi combinată cu histogrammele create de alți studenți și veți discuta rezultatele în grup.

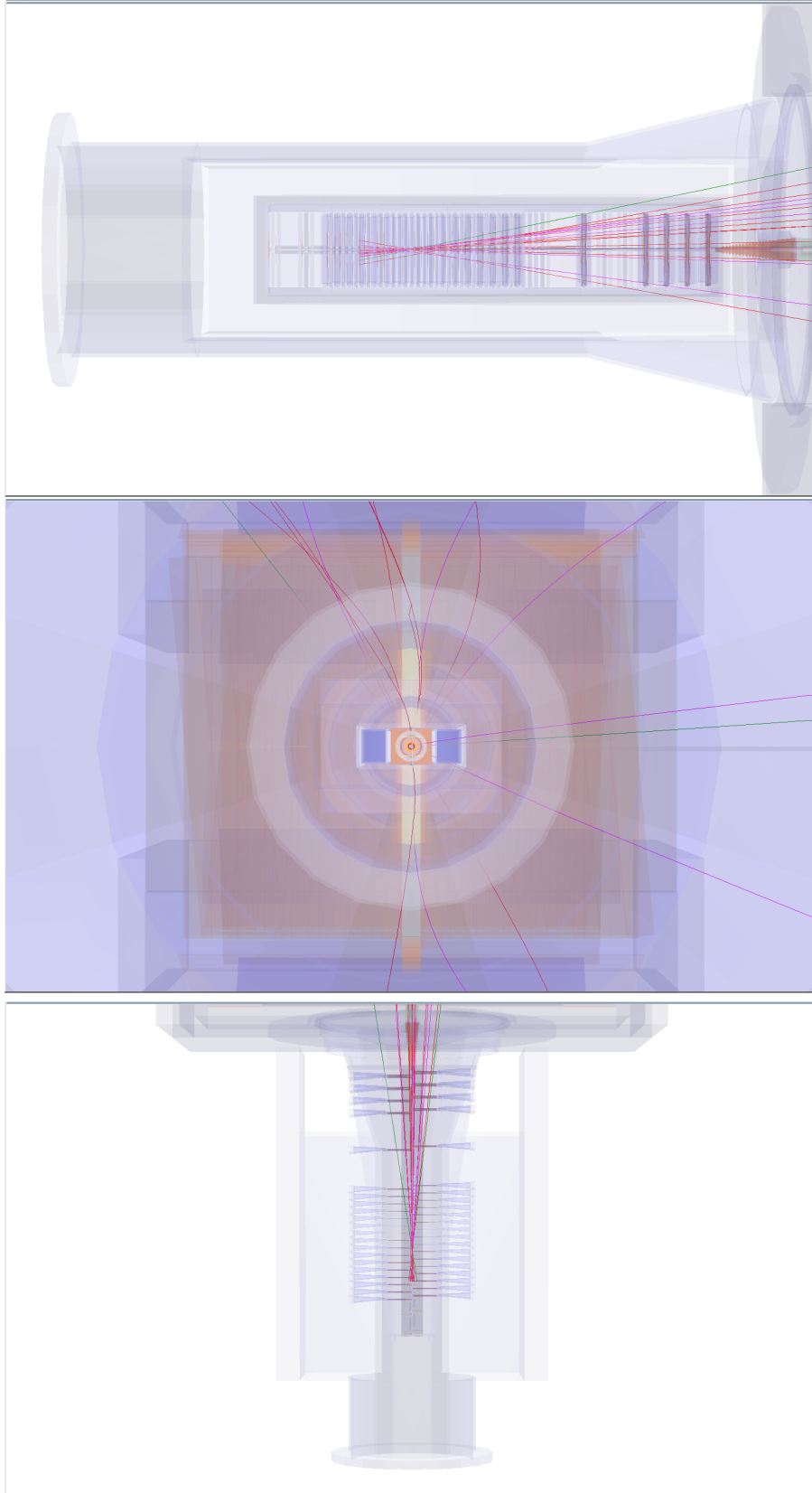


Figure 3: Proiecția unui eveniment în detectorul LHCb pe trei plane diferite, de sus în jos: y - z , y - x , și respectiv x - z .

3 Programul de fit

Înainte de a descrie partea din exercițiu în care se face fitarea și programul aferent, este folositor să enumerăm variabilele implicate în această procedură:

- **D0 mass** : aceasta este masa invariantă a particulei D^0 . Semnalul este identificabil ca o structură asemeni unei culmi ce se înalță peste (evenimentele) zgomotul de fond plat. Intervalul de masă relevant pentru acest studiu este 1816-1914 MeV. Forma semnalului este descrisă de o distribuție (funcție) Gaussiană (numită și “normală”). Centrul (“valoarea medie” a) acestei distribuții este masa particulei D^0 , în timp ce lărgimea reprezintă rezoluția experimentală a detectorului.
- **D0 TAU** : reprezintă distribuția timpilor de dezintegrare ai candidaților D^0 . Semnalul este descris de o singură funcție exponențială al cărei coeficient de la exponent (panta logaritmului) este invers proporțional cu timpul de viață al D^0 (subiectul exercițiului anterior), în timp ce punctele reprezentând fondul se concentrează la valori mici ale timpului de viață.
- **D0 IP** : este distanța de apropiere maximă al D^0 (“parametrul de impact”) relativă la punctul de interacție proton-proton din eveniment, măsurată în milimetri [mm]. Cu cât parametrul de impact este mai mic cu atât mai probabil este faptul că particula D^0 provine chiar din acea interacție primară. Pentru a simplifica graficele folosim de fapt logaritmul (în baza 10) al acestei mărimi în cadrul exercițiului.
- **D0 PT** : este impulsul transversal D^0 relativ la direcția fascicului de protoni în LHC.

Acum, haideți să continuăm exercițiul.

3.1 Exercițiul 1: Fitarea distribuției de masă și obținerea distribuțiilor variabilelor de semnal

Scopul acestui exercițiu este de a obține parametrii funcției de fit pentru distribuția variabilei **D0 mass**, și ulterior de a extrage eficiența de semnal și puritatea acestuia.

1. Apăsați butonul **Afiseaza masa D0** pentru a afișa graficul distribuției totale de masă. Veți vedea un vârf (semnalul) ce se înalță deasupra unei distribuții plate (fondul). Vârful ar trebui să se asemeze cu funcția Gaussiană, a cărei valoare medie corespunde masei particulei D^0 iar lărgimea (σ) este determinată de rezoluția experimentală a detectorului LHCb.
2. Apăsați butonul **Fit distributie masa** pentru a determina parametrii de fit ai distribuției folosind o funcție Gaussiană pentru semnal și o funcție liniară pentru fond.
3. Priviți distribuția de masă fitată. Graficul poate fi împărțit în trei regiuni: zona de semnal și două zone numai cu evenimente de fond “bande laterale”: una după regiunea de semnal (banda laterală superioară) și una înaintea zonei de semnal (banda laterală inferioară). Distribuția Gaussiană conține 99.7% din evenimentele ce o compun într-o regiune egală cu trei deviații standard în jurul valorii medii, deci această regiune de lărgime “trei sigma” în jurul valorii medii definește de obicei regiunea de semnal.
4. Folosiți cursorul etichetat **Sig range** pentru a marca valoarea de început și de sfârșit a domeniului de semnal. Toate evenimentele ce nu sunt cuprinse în regiunea de semnal se consideră ca făcând parte din zona de fond.
5. Acum puteți folosi definițiile regiunilor de semnal și fond pentru variabila de masă pentru a determina distribuțiile de semnal și fond și pentru alte variabile. Apăsați butonul **Plot distributions**. Lângă distribuția de masă vor fi afișate distribuțiile pentru celelalte trei variabile în care semnalul este marcat cu albastru iar fondul cu roșu. Odată ce ați ajuns la aceste rezultate ar trebui să le discutați cu un instructor înainte de a continua.

3.2 Exercițiul 2 : Măsurarea timpului de viață al particulei D^0

Subiectul acestui exercițiu este de a folosi eșantionul de semnal determinat în pasul anterior pentru a măsura timpul de viață al particulei D^0 . Această mărime este asemănătoare timpului de înjumătățire pentru un izotop radioactiv : particula D^0 se dezintegrează după o lege exponențială iar, dacă distribuția timpilor de viață ai D^0 este fitată cu o funcție exponențială, panta logaritmului corespunzător funcției de fit este inversul timpului de viață al D^0 .

1. Obțineți funcția exponențială de fit pentru inversul timpului de viață al D^0 .
2. Comparați inversul coeficientului exponentului obținut cu timpul de viață al D^0 publicat de Particle Data Group. Discutați cu un instructor despre gradul de compatibilitate între cele două valori.
3. Pe lângă incertitudinile statistice, o măsurătoare are și incertitudini sistematice cauzate de aparate necalibrate corespunzător sau modele neadecvate pentru distribuția de fond. O procedură de bază în estimarea incertitudinilor sistematice este de a repeta măsurătoarea modificând criteriile de selecție a evenimentelor de semnal. Dacă rezultatul se schimbă semnificativ la modificarea acestor criterii vom ști că avem ceva în neregulă în lanțul de măsurare!
4. Repetați operația de fitare a timpului de viață pentru particula D^0 variind valoarea maximă admisă pentru parametrul de impact al D^0 . Domeniul de valori admise pentru operațiunea de fit este setat inițial între -4.0 și 1.5 . Modificați maximul intervalului de la 1.5 la -2.0 în pași de 0.20 și refaceți fiturile timpului de viață al D^0 pentru fiecare nou maxim, salvând rezultatele pe măsură ce modificați valoarea.
5. Afișați histograma ce reprezintă valoarea fitată pentru timpul de viață al D^0 ca funcție de limita superioară a intervalului de valori acceptate pentru parametrul de impact. Discutați cu un instructor forma acestei distribuții și ce anume indică aceasta despre timpul de viață al particulei D^0 .
6. Ce alte surse de incertitudine sistematică am mai putea lua în considerare când facem o măsurătoare de timp de viață?