

Real time trackless beamline position reconstruction at the LHCb experiment

Tesi Ma Non Troppo

Giulio Cordova

<https://github.com/zenith378/TesiMaNonTroppo>

Dipartimento di Fisica E. Fermi
Università di Pisa

March 21, 2024



Outline

1. Il percorso fino alla tesi

- 1.1. Triennale
- 1.2. Magistrale
- 1.3. Come ho scelto la tesi

2. Il lavoro di tesi

- 2.1. Il CERN e LHC
- 2.2. L'esperimento LHCb
- 2.3. I miei due centesimi

3. A contorno della tesi

- 3.1. Il gruppo di Pisa
- 3.2. Le cose belle
- 3.3. Le cose meno belle

A che punto stiamo

1. Il percorso fino alla tesi

- 1.1. Triennale
- 1.2. Magistrale
- 1.3. Come ho scelto la tesi

2. Il lavoro di tesi

- 2.1. Il CERN e LHC
- 2.2. L'esperimento LHCb
- 2.3. I miei due centesimi

3. A contorno della tesi

- 3.1. Il gruppo di Pisa
- 3.2. Le cose belle
- 3.3. Le cose meno belle

Laurea Triennale in Fisica a Pisa

Esami a scelta:

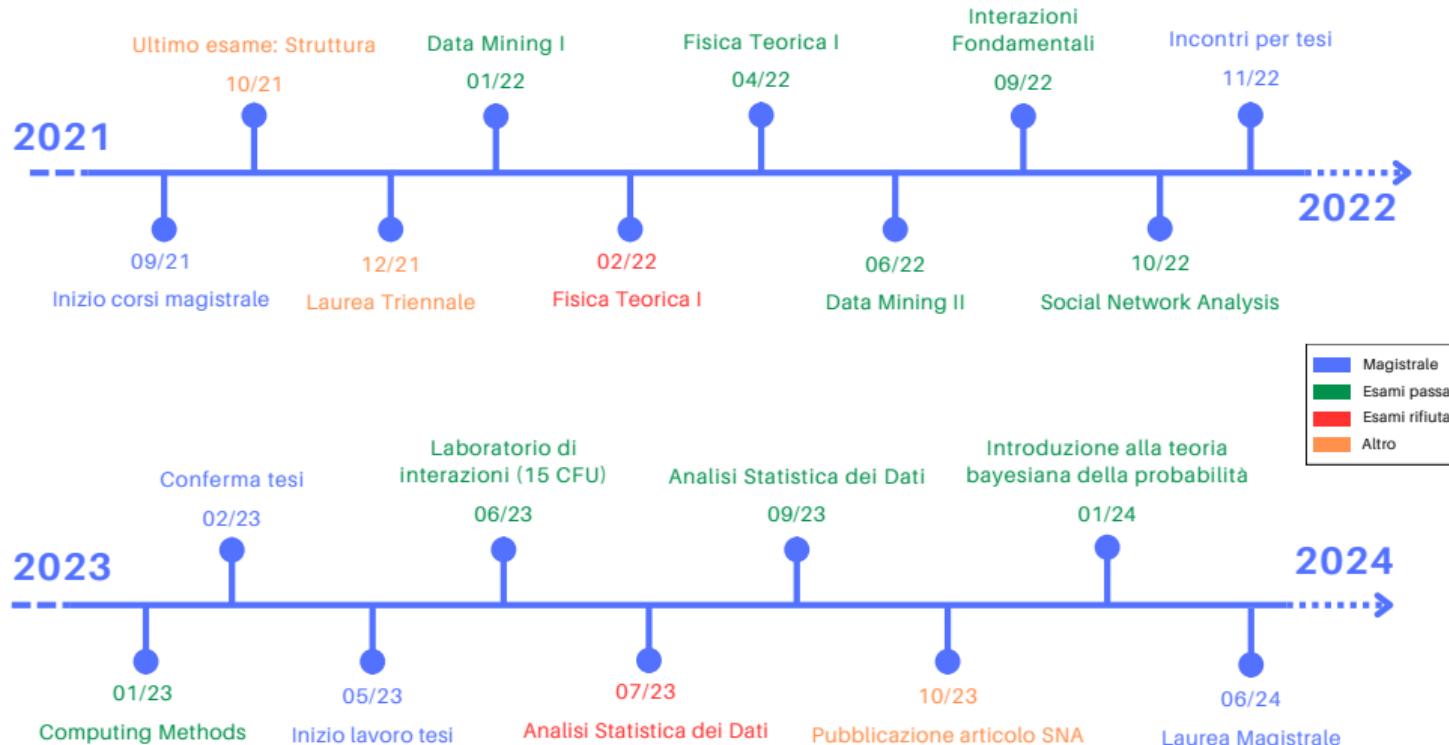
- Astrofisica
- Introduzione alla fisica subnucleare
- Mi è servito a capire che non mi piaceva
- Tonelli mi ha ipnotizzato

Tesi triennale: Misure di precisione del bosone W con l'esperimento CMS

Relatore: Paolo Azzurri

La tesi l'ho scelta insieme a Guido Tonelli alla fine del corso di fisica subnucleare. Tornassi indietro forse farei qualcosa di meno avanzato.

Curriculum: Data Analysis for Experimental Physics



Magistrale (fatta meglio)

Se postessi ricominciare domani la magistrale la rifarei così:

Primo Anno:

- Fisica Teorica 1 (gennaio)
- Interazioni Fondamentali (febbraio)
- Analisi Statistica dei Dati (aprile)
- Laboratorio di Interazioni Fondamentali (giugno)
- Data Mining (luglio)
- Computing Methods (fra settembre e dicembre)

Secondo Anno:

- Introduzione alla teoria bayesiana della probabilità (gennaio)
- Social Network Analysis (febbraio)

Meglio fare i corsi di indirizzo subito: io ho scoperto che mi piaceva stare in laboratorio e aggeggiare dopo aver già confermato la tesi...

In più meglio togliersi gli esami più difficili prima e tenersi quelli più facili in fondo!

Come ho scelto la tesi

Ho parlato con un po' di persone.

- Prof. Forti per un'idea sui vari esperimenti dell'area Interazioni Fondamentali
- Prof. Roda per l'esperimento ATLAS
- Prof. Donati per gli esperimenti a Fermilab
- **Prof. Punzi per l'esperimento LHCb**
- Prof. Casarosa per l'esperimento Belle II
- Prof. Azzurri per l'esperimento CMS

Fun Fact: all'inizio Punzi mi aveva proposto un altro lavoro e lo stavo scartando, mi ha ricontattato successivamente perché gli era venuta un'altra idea più in linea con il mio percorso di studi.

A che punto stiamo

1. Il percorso fino alla tesi

- 1.1. Triennale
- 1.2. Magistrale
- 1.3. Come ho scelto la tesi

2. Il lavoro di tesi

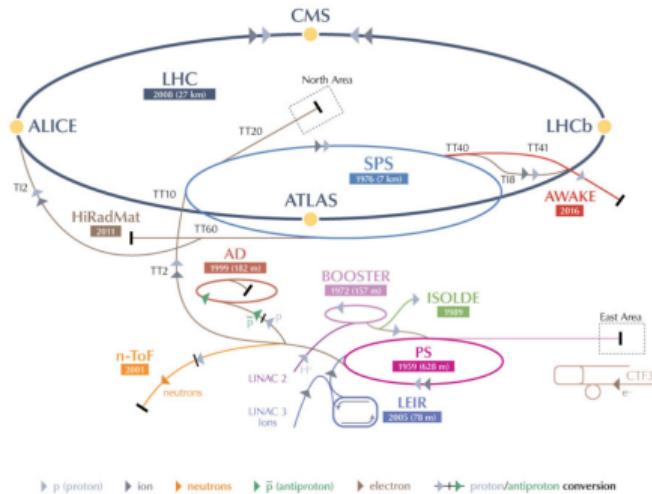
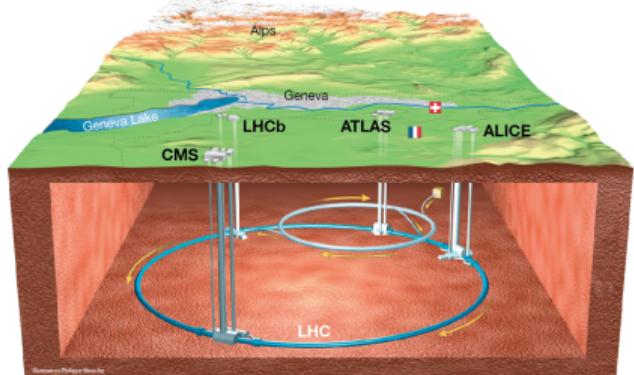
- 2.1. Il CERN e LHC
- 2.2. L'esperimento LHCb
- 2.3. I miei due centesimi

3. A contorno della tesi

- 3.1. Il gruppo di Pisa
- 3.2. Le cose belle
- 3.3. Le cose meno belle

Il CERN e il Large Hadron Collider

Il CERN è una collaborazione internazionale e ha diversi esperimenti nella sua facility. I più famosi sono i quattro posti lungo il Large Hadron Collider (LHC), ma ne esistono molti altri!



LHC è un tunnel di 27 km dove vengono scontrati protoni a 14 TeV, al suo interno ha quattro caverne, per quattro esperimenti con scopi diversi: ATLAS, CMS, LHCb e ALICE

L'esperimento LHCb

LHCb è un esperimento che studia quella che si chiama fisica di sapore (flavour).

Il flavour delle particelle è un insieme di numeri quantici con cui si distinguono quark e leptoni.

LHCb ha lo scopo di misurare i parametri della violazione della simmetria CP (parità e coniugazione di carica) e i decadimenti e fenomeni rari relativi agli adroni in cui è presente il quark beauty (quark b), da cui il nome dell'esperimento.

Alcuni dei risultati più importanti di LHCb:

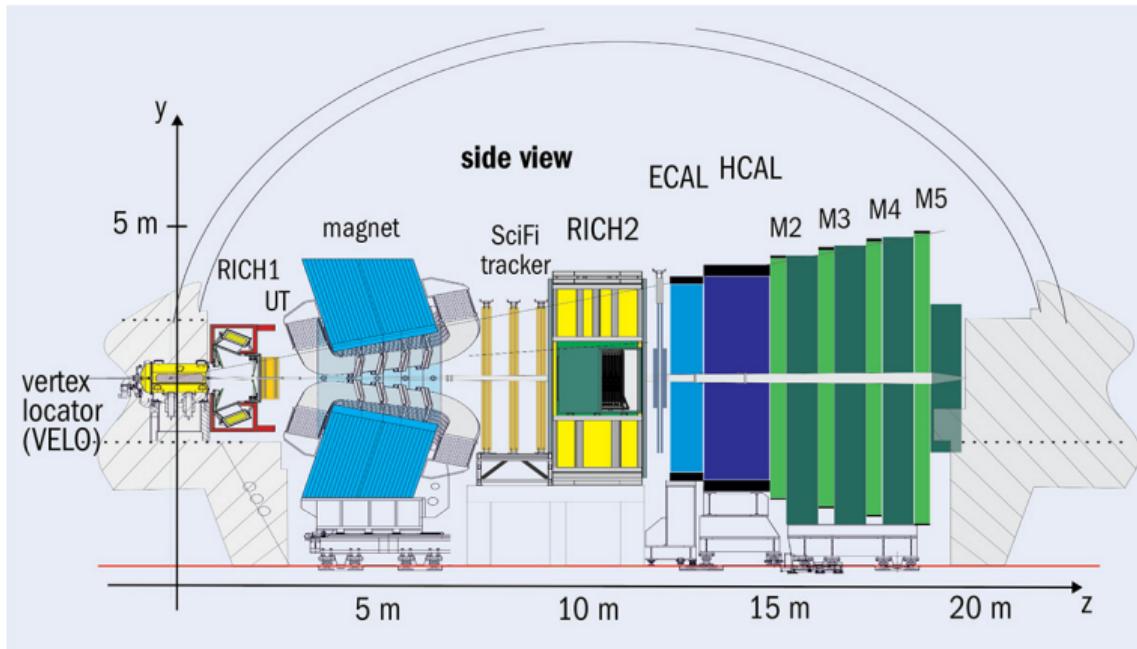
- scoperta del decadimento $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- scoperta del pentaquark (fun fact: non era nemmeno in programma per LHCb di scoprirlo)
- violazione della simmetria di Carica-Parità nei mesoni D



Ti interessa sapere di più sul flavour delle particelle? Segui Interazioni Fondamentali e Fisica delle Particelle (e Cromodinamica Quantistica se proprio ti vuoi male)

Il rivelatore di LHCb

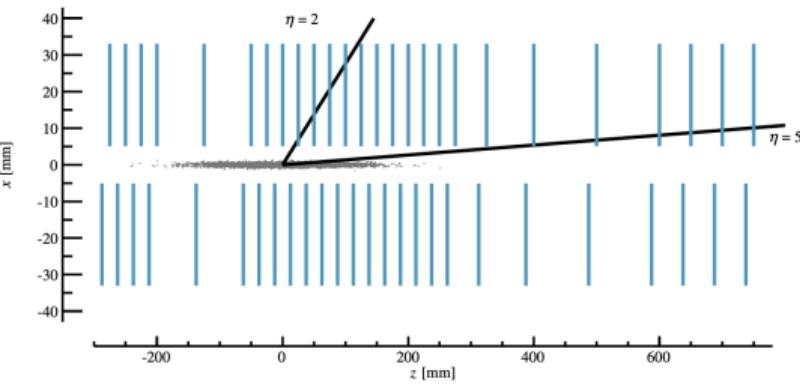
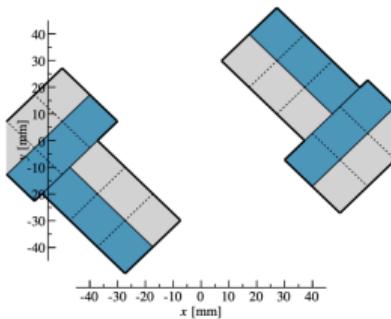
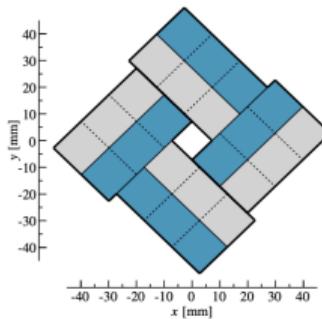
A differenza di tutti gli altri esperimenti al CERN, LHCb non è un rivelatore "a cipolla".



Se ti interessano i rivelatori segui il corso di Instrumentation for Fundamental Physics di Forti.

Dove lavoro io: il VELO

Rivelatore a pixel: sappiamo dove passa la particella in due coordinate x e y
 Composto da 26 stazioni (52 moduli, 26 sul lato A e 26 sul lato C)

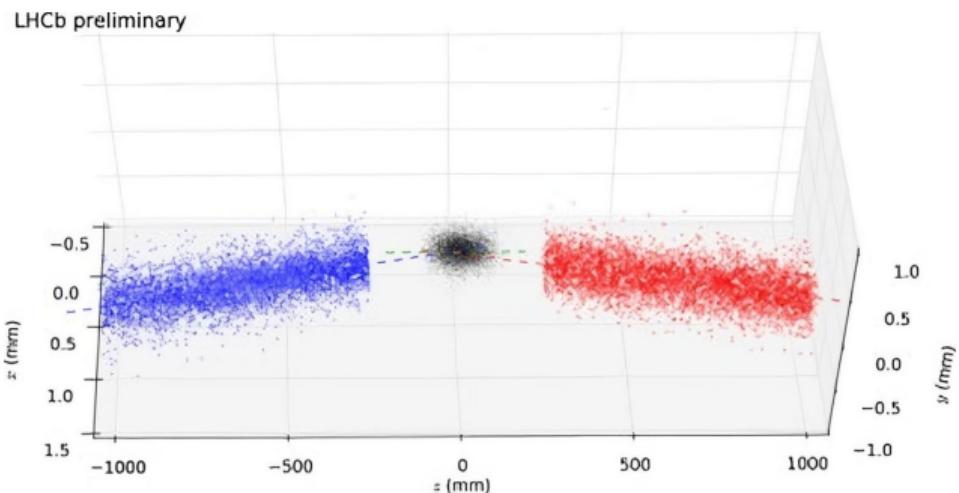


Cos'è un rivelatore a pixel, perché si usa il silicio sono tutte domande a cui troverete risposta nei corsi di "Introduzione alla Fisica Subnucleare", "Laboratorio di Interazioni Fondamentali" o "Instrumentation for Fundamental Physics"

Che cosa si intende con beamline

A LHC si scontrano due fasci di particelle (blu e rosso), e interagiscono in una certa zona nello spazio.

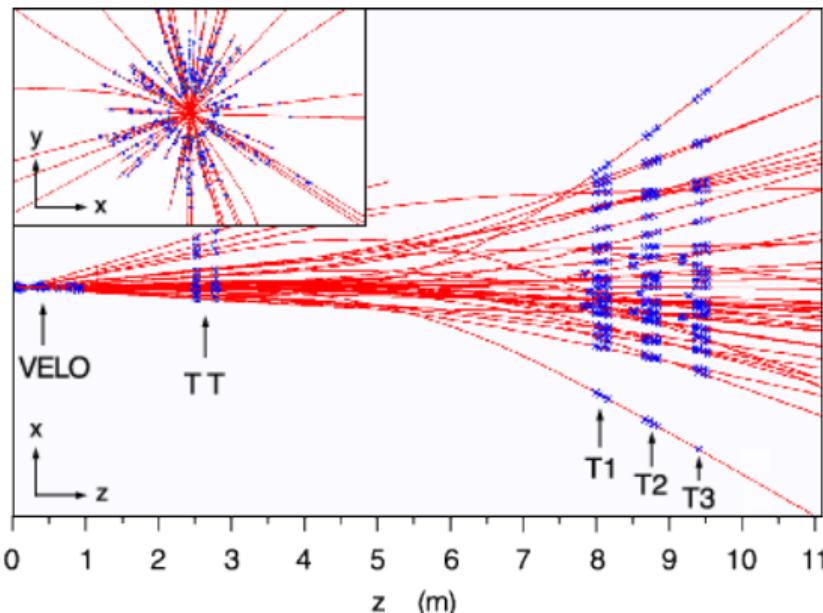
Questa zona si chiama regione di luminosità (luminosity region) e corrisponde alla zona nera nella figura a destra. Da questa regione "escono" le particelle che noi analizziamo.



Ricostruzione offline della beamline

Offline riusciamo a ricostruire questa regione con ottima precisione.

- Prima guardiamo le **hit** delle particelle "figlie"
- Unendo i puntini delle **hit** e altre informazioni del detector ricostruiamo le **tracce**
- Guardando il punto di origine delle varie **tracce** capiamo dove stava la beamline

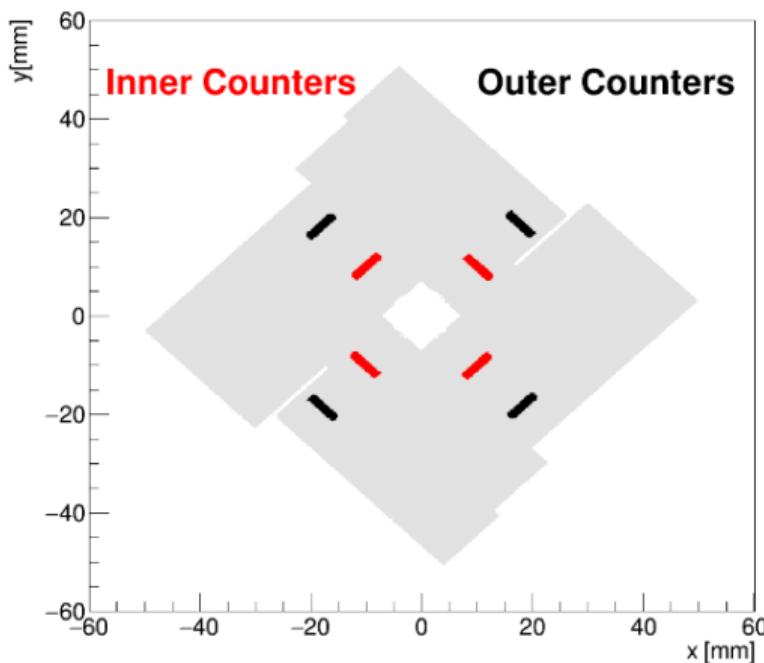


Gli algoritmi di ricostruzione delle tracce però hanno bisogno come input la posizione della beamline! È un processo iterativo molto lungo e complicato...

Contatori sul VELO

Idea: anziché usare le tracce partiamo direttamente dai cluster di hit sul VELO.

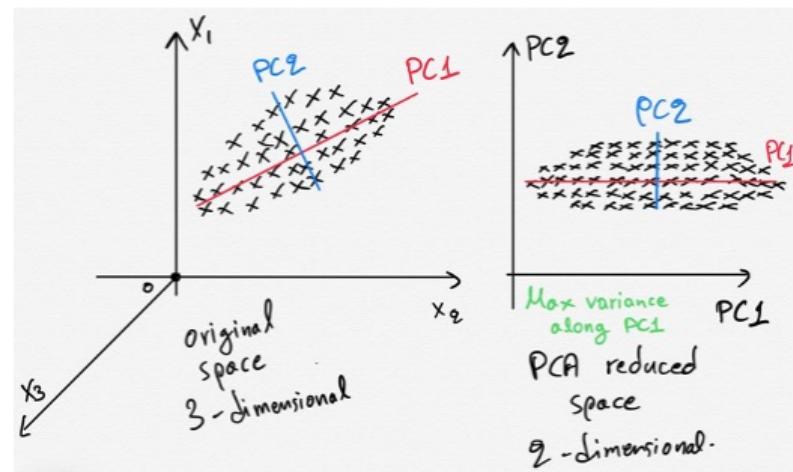
- Definiamo delle regioni di selezione in zone specifiche del VELO
- Se mettiamo 8 regioni in ogni stazione abbiamo 208 contatori (ho 26 stazioni)
- Contiamo quanti cluster di hit cadono in ognuna di queste regioni di selezione
- Posso combinare l'informazione di questi 208 contatori per ottenere una stima della posizione della beamline?



Principal Component Analysis (PCA)

La PCA è una trasformazione ortogonale lineare per un nuovo set di coordinate tale per cui

- La proiezione dei dati sulla prima componente trasformata ha la varianza più grande rispetto a tutte le altre proiezioni
- La proiezione dei dati sulla seconda componente trasformata ha la seconda varianza più grande ed è perpendicolare alla prima componente
- e così via



Rimemebranze di geometria? Per proiettare i dati lungo una componente basta fare un prodotto scalare, che è un operazione semplice e veloce da eseguire!

La componente k -esima sarà quindi data da $f_k = \vec{x} \cdot \vec{w}_k$, dove \vec{x} sono i dati e \vec{w}_k un vettore di pesi da determinare con la PCA.

Come determinare questo vettore

I 208 contatori a disposizione formano una base per uno spazio 208-dimensionale.

Se avessimo un dataset in cui l'unico parametro che cambia nei dati fosse proprio la posizione della beamline lungo una direzione, possiamo calcolare le componenti principali.

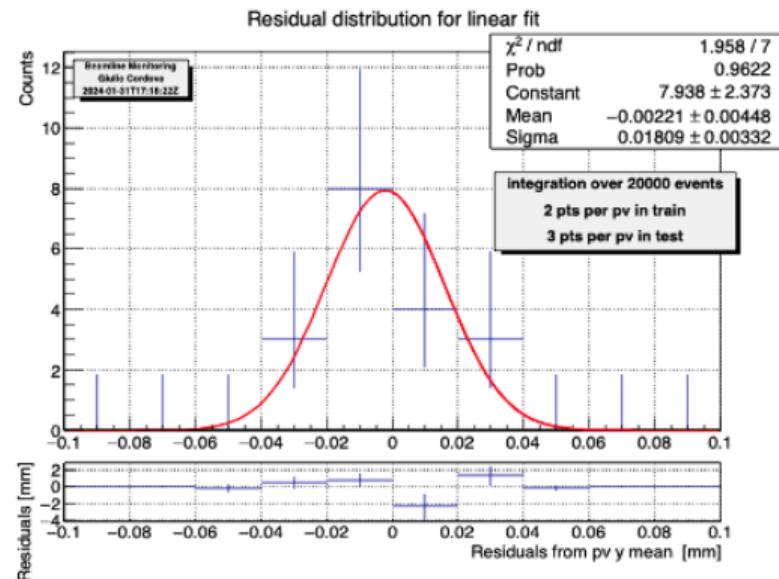
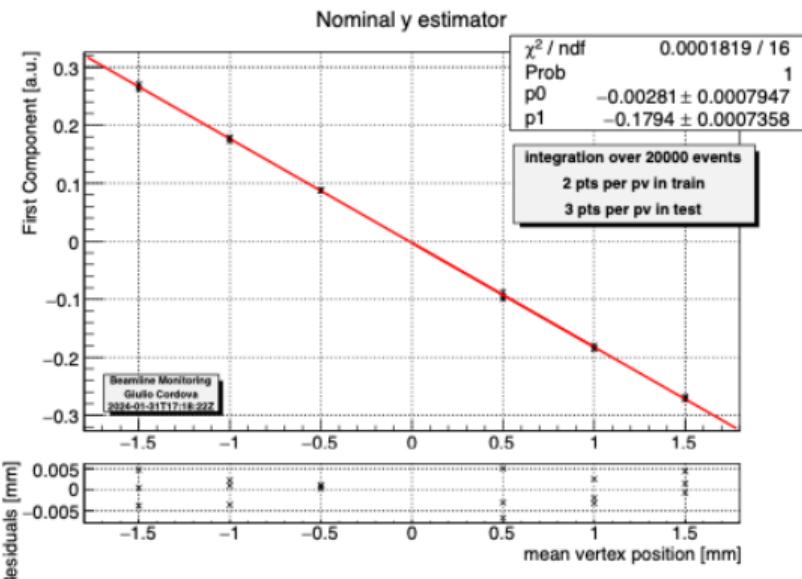
Questa è cosa che si fa facilmente con un Monte Carlo!

Una volta che abbiamo il Monte Carlo applichiamo l'algoritmo che prevede banalmente la diagonilizzazione della matrice di covarianza

- Gli autovettori trovati sono le componenti principali (la nuova base)
- Queste componenti principali sono ordinate in base agli autovalori
- Il k-esimo autovalore normalizzato corrisponde alla percentuale di varianza spiegata da quella componente

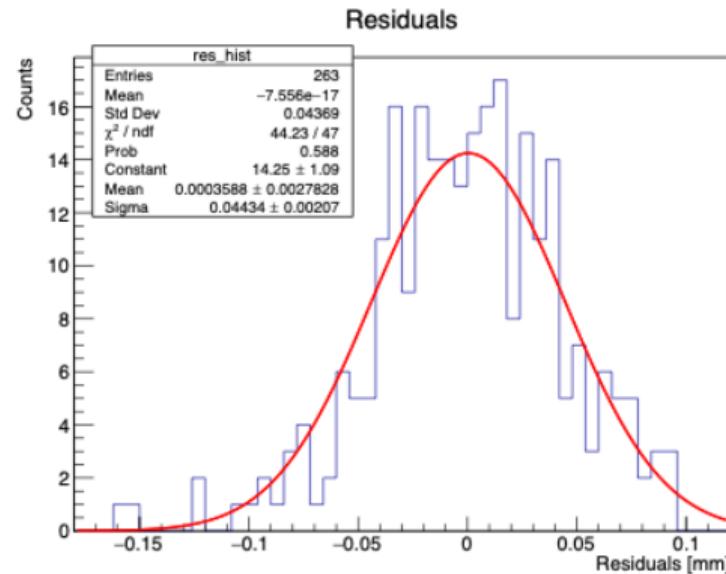
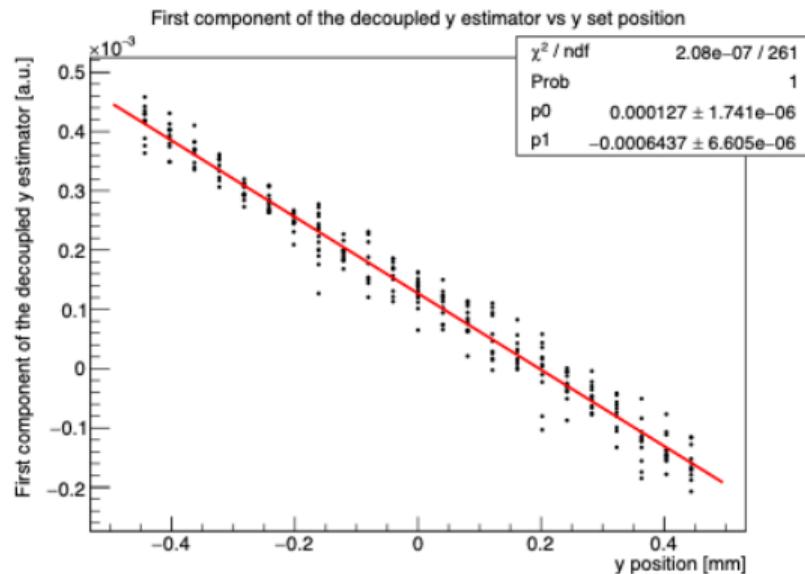
Risultati su Monte Carlo

Molto meglio delle aspettative, c'è una dipendenza lineare perfetta fra la prima componente stimata con la PCA e la posizione della beamline.
 E si ha una risoluzione di 18 micrometri!



Dati reali

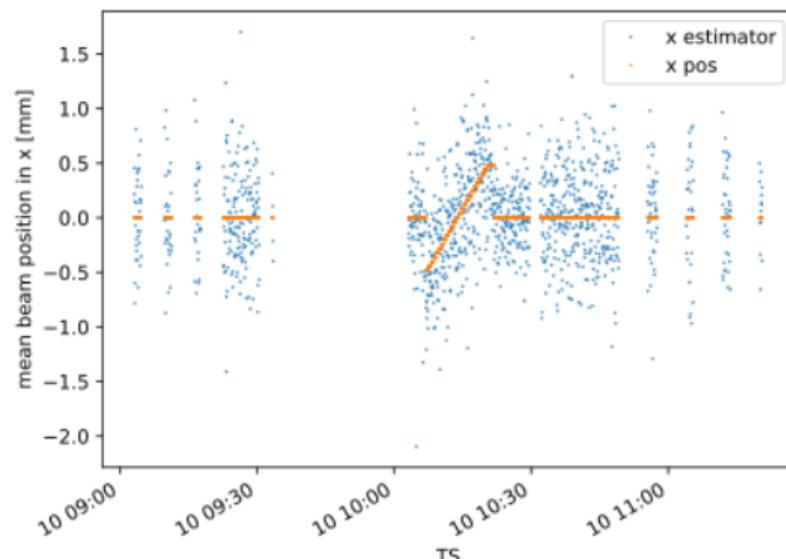
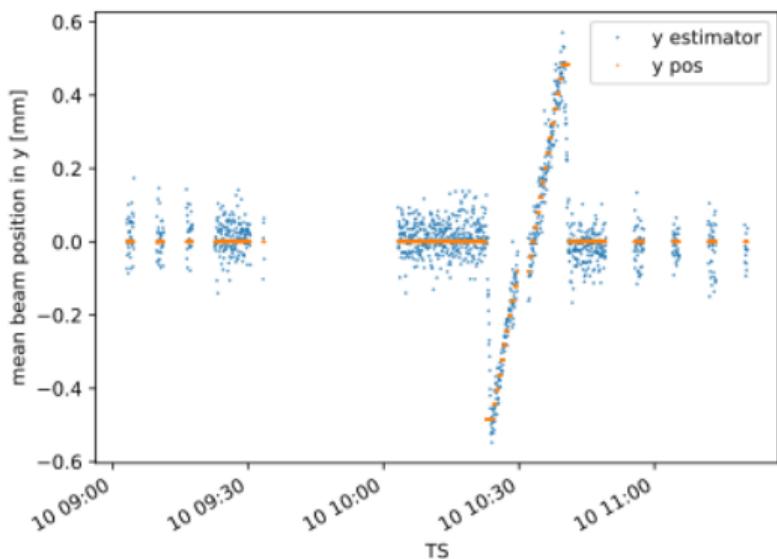
E anche sui dati veri funziona! Ovviamente con una risoluzione leggermente peggiore, ma comunque nell'ordine di decine di micrometri.



Tutto questo è possibile perché le operazioni di clustering, conteggi, somme e prodotti si possono implementare su FPGA che vengono lette a 40 MHz, cioè veramente in tempo reale

La bellezza di un lavoro sperimentale...

Al momento sto investigando perché il mio stimatore funziona molto in una componente (y) e molto male nell'altra (x).



Ma è proprio questo il bello di un lavoro sperimentale, che bisogna fronteggiare difficoltà che sulla carta non esistono, come contatori che non funzionano, link che si rompono, eccetera...

A che punto stiamo

1. Il percorso fino alla tesi

- 1.1. Triennale
- 1.2. Magistrale
- 1.3. Come ho scelto la tesi

2. Il lavoro di tesi

- 2.1. Il CERN e LHC
- 2.2. L'esperimento LHCb
- 2.3. I miei due centesimi

3. A contorno della tesi

- 3.1. Il gruppo di Pisa
- 3.2. Le cose belle
- 3.3. Le cose meno belle

Il gruppo di Pisa

Al momento siamo il gruppo di LHCb più grande in Italia! Abbiamo:

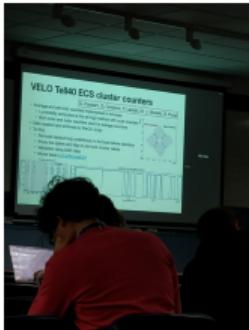
- 3 professori
 - Prof. Giovanni Punzi
 - Prof. Michael Joseph Morello
 - Prof.ssa Elena Graverini
- 6 ricercatori:
 - John Walsh
 - Matteo Rama
 - Riccardo Fantechi
 - Federico Lazzari
 - Sergei Kholodenko
 - Ao Xu
- 6 dottorandi
 - Lorenzo Pica
 - Francesco Terzuoli
 - Nico Klejne
 - Francesco Paciolla
 - Domenico Riccardi
 - Daniele Passaro
- 2 studenti magistrali
 - Irene Celestino
 - Giulio Cordova

LHCb non è un'esperimento grandissimo come potrebbe essere ATLAS o CMS.

Ma siamo comunque una collaborazione internazionale composta da 1692 persone provenienti da 22 paesi diversi!

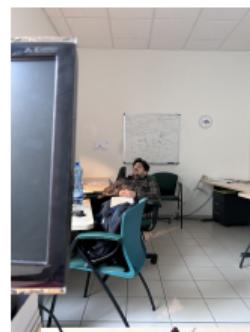
Le cose belle:

- Ho un ufficio all'INFN
- Sono tutti iperdisponibili
- Mi mandano in missione al CERN (già una volta e ci dovrei tornare a breve)
- Partecipo attivamente alla collaborazione
- LHCb è il gruppo con più vita sociale del CERN (barbecue, collaboration drinks, etc.)



Le cose meno belle:

- Il lavoro richiesto è molto (ma anche appagante)
- L'esperimento si trova in una fase critica
- Il relatore è molto impegnato e spesso non raggiungibile
- Il lavoro di tesi è un po' lungo (>9 mesi)



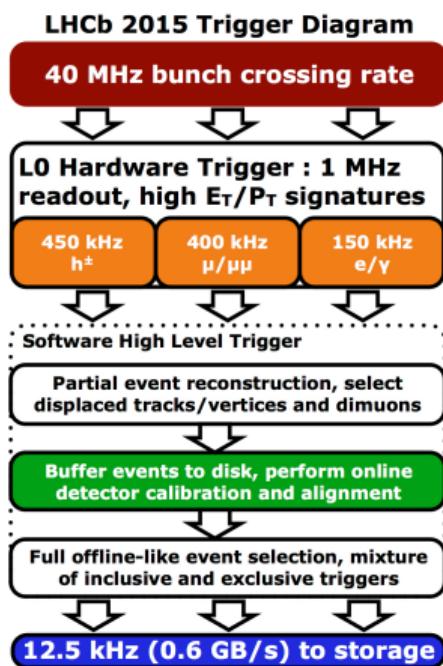
Sum up

- Lavorare a una tesi al CERN è molto bello!
- Dal mio punto di vista, LHCb è un buon equilibrio fra collaborazione internazionale e dimensione del gruppo
- Nella mia magistrale cambierei un po' di cose, ma gli esami fatti mi hanno fornito una base solida
- Il relatore riesce a trasmettere passione e a stimolarti per dare sempre di più
- Il gruppo è molto gentile e ognuno è sempre disponibile a darti una mano
- Il lavoro che ho fatto è stato soddisfacente, ma di fisica ho visto poco
- Ho portato a casa dei risultati importanti per la collaborazione e spero che possano aiutarla in questa fase critica

Grazie per l'attenzione!

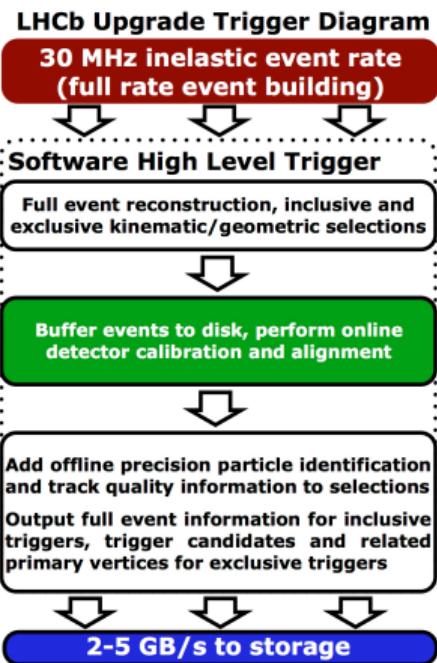
Il nuovo sistema di trigger di LHCb

A LHC si ha una collisione ogni 25 nanosecondi (o 40 milioni di collisioni al secondo). Non tutte sono utili alle analisi che vogliamo fare. Vanno selezionate con un sistema trigger.



Fino al Run II, il sistema di trigger era un mix fra hardware e software. Prima si fanno dei tagli con l'accetta guardando le informazioni dei rivelatori.

Dal Run III, LHCb ha detto fuck this, noi siamo superfighi e prima di buttare via eventi che ci potrebbero servire vogliamo esserne certi e hanno sviluppato un trigger software based in cui si ricostruisce l'intero evento in tempo reale.



La Real Time Analysis (RTA)

La ricostruzione in tempo reale non è supportata dalle classiche CPU, ma bisogna dotarsi di sistemi di calcolo eterogeneo che permettono anche calcolo parallelo (GPU e FPGA).

