

**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

---

## Praca magisterska

Adam Dendek

kierunek studiów: fizyka techniczna

# Statystyczna analiza jakości dopasowania śladów cząstek naładowanych w eksperymencie LHCb

Opiekun: dr hab. inż. Tomasz Szumalk

Kraków, czerwiec 2014

Oświadczam, świadomy(-a) odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

.....

(czytelny podpis)

Kraków, ?? czerwca 20??

**Tematyka pracy magisterskiej i praktyki dyplomowej Adama Dendka, studenta V  
roku studiów kierunku fizyka techniczna**

Temat pracy magisterskiej: **Statystyczna analiza jakości dopasowania śladów cząstek naładowanych w eksperymencie LHCb**

Opiekun pracy: dr hab. inż. Tomasz Szumlak

Recenzenci pracy: ...

Miejsce praktyki dyplomowej: CERN, Genewa

**Program pracy magisterskiej i praktyki dyplomowej**

1. Omówienie realizacji pracy magisterskiej z opiekunem.
2. Zebranie i opracowanie literatury dotyczącej tematu pracy.
3. Praktyka dyplomowa:
  - zapoznanie się z ideą rekonstrukcji śladów w eksperymencie LHCb,
  - uczestnictwo w eksperymentach/przygotowanie oprogramowania...,
  - dyskusja i analiza wyników
  - sporządzenie sprawozdania z praktyki.
4. Kontynuacja obliczeń związanych z tematem pracy magisterskiej.
5. Zebranie i opracowanie wyników obliczeń.
6. Analiza wyników obliczeń numerycznych, ich omówienie i zatwierdzenie przez opiekuna.
7. Opracowanie redakcyjne pracy.

Termin oddania w dziekanacie: ?? czerwca 20??

.....  
(podpis kierownika katedry)

.....  
(podpis opiekuna)

Na kolejnych dwóch stronach proszę dołączyć kolejno recenzje pracy popołnione przez Opiekuna oraz Recenzenta (wydrukowane z systemu MISIO i podpisane przez odpowiednio Opiekuna i Recenzenta pracy). Papierową wersję pracy (zawierającą podpisane recenzje) proszę złożyć w dziekanacie celem rejestracji co najmniej na tydzień przed planowaną obroną.

Ocena pracy promotora

Ocena pracy recenzenta

Chciałbym w tym miejscu podziękować:

# Spis treści

<b>Wstęp</b>	<b>12</b>
<b>1. Eksperyment LHCb</b>	<b>13</b>
1.1. Symetrie w fizyce	13
1.2. Symetrie a początek Wszechświata	14
1.3. Symetria kombinowana CP	14
1.3.1. Teoretyczny opis łamania symetrii CP	15
1.3.2. Trójkąty unitarności	17
1.3.3. Typy łamania symetrii CP	19
<b>2. Eksperyment LHCb</b>	<b>21</b>
2.1. Akcelerator LHC	21
2.2. Detektor LHCb	23
2.2.1. Magnes zakrzywiający	27
2.2.2. VELO	27
2.2.2.1. Sensory krzemowe	28
2.2.2.2. Elektronika odczytu	29
2.2.3. Detektory Czerenkowa	30
2.2.4. Detektory śladowe	31
2.2.5. Kalorymetry	32
2.2.6. Komory mionowe	32
2.2.7. System wyzwalań	34



<b>3. Rekonstrukcja śladów</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Oddziaływanie cząstek z materią</b>	<b>35</b>
3.1.1. Oddziaływania elektromagnetyczne	35
3.1.2. Oddziaływania hadronowe	36
<b>3.2. Algorytm rekonstrukcji śladów</b>	<b>36</b>
3.2.1. Parametryzacja śladów	36
3.2.2. Typy śladów	37
3.2.3. Rozpoznawanie wzorców	38
<b>3.3. Filtr Kalmana</b>	<b>39</b>
<b>4. Oprogramowanie</b>	<b>41</b>
<b>4.1. Root</b>	<b>41</b>
<b>4.2. Gaudi</b>	<b>42</b>
4.2.1. Oprogramowanie LHCb	42
<b>4.3. Przetwarzanie sieciowe</b>	<b>44</b>
<b>5. <math>\chi^2</math> - Badanie jakości dopasowania śladów</b>	<b>45</b>
<b>5.1. Definicja <math>\chi^2</math></b>	<b>45</b>
<b>5.2. Rozkład <math>\chi^2</math></b>	<b>46</b>
<b>5.3. Sposób wykorzystania testu <math>\chi^2</math> do badania jakości dopasowania</b>	<b>47</b>
<b>Podsumowanie</b>	<b>48</b>
<b>Literatura</b>	<b>49</b>

## Spis rysunków

1.3.1.Działanie operatorów C, P i CP na neutrino . . . . .	15
1.3.2.Trójkąt unitarności, kąty $\phi_{1,2,3}$ . . . . .	17
1.3.3.Przedziały dostępności kątów trójkąta unitarności (db) otrzymane w wyniku zebrania danych ze wszystkich eksperymentów.[1] . . . . .	18
1.3.4.Diagramy Feynmana opisujące procesy mieszania neutralnych mezonów B. . . .	20
2.1.1.Schemat kompleksu przyspieszającego akceleratora LHC. [2] . . . . .	22
2.2.1.Przykładowe diagramy Feynmana obrazujące produkcję mezonów B. Diagramy pierwszego rzędu odpowiadają kreacji par przez fuzję gluonową (a) oraz anihilację kwark-antykwar (b). Przykładowe schematy wyższych rzędów to wzbudzenia zapachowe (c) oraz rozszczepianie gluonu(d) . . . . .	23
2.2.2.Wykres korelacji pomiędzy kątem polarnym a ilością produkowanych kwarków b w zderzeniu proton-proton. Symulacja została wykonana przy użyciu programu Pythia [3] . . . . .	24
2.2.3.Detektor LHCb w całej okazałości [2] . . . . .	25
2.2.4.Wizualizacja parametru zderzenia, będącego najmniejszą odległością od wierzchołka pierwotnego do śladu. Parametr zderzenia (IP) został oznaczony czerwoną linią. . . . .	26
2.2.5.Schemat magnesu zakrzywiającego wchodzącego w skład systemu detekcyjnego LHCb(a) oraz wielkość składowej y-owej indukcji pola magnetycznego jako funkcja współrzędnej z-owej. . . . .	27
2.2.6.Schemat detektora VELO[4] . . . . .	28
2.2.7.Geometria sensorów [4] . . . . .	28
2.2.8.Schemat blokowy czipu Beetle[5] . . . . .	29
2.2.9.Ścieżka odczytowa pomiędzy kanałami VELO a płytą TELL1[6] . . . . .	30
2.2.10Schemat detektora RICH1 z zaznaczonymi ścieżkami dla światła pojawiającego się w aerożelu oraz $C_4F_{10}$ (a). Rozkład kątów Czerenkowa w zależności od pędu cząstek emitujących. Rysunki pochodzą z [2] . . . . .	31

2.2.1	Schemat detektora TT [2] . . . . .	32
2.2.1	Schemat detektorów T1-T3[2]. Region oznaczony na czerwono przedstawia IT natomiast na żółto zaznaczono OT. . . . .	33
2.2.1	Zdjęcie detektora ECAL po zamontowaniu go w detektorze LHCb. . . . .	33
2.2.1	Schematyczne przedstawienie (widok z boku) stacji mionowych oraz żelaznych absorberów umieszczonych pomiędzy stacjami. . . . .	33
2.2.1	Wizualizacja przypadku zdarzenia w detektorze LHCb[7] . . . . .	34
3.2.1	Poglądowym rysunek śladów w LHCb [8] . . . . .	37
4.2.1	Schemat blokowy architektury GAUDI[9] . . . . .	43
5.2.1	Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa $\chi^2$ dla $\nu = 2, 4, 10$ . . . . .	46

Wstęp

# Rozdział 1

## Eksperyment LHCb

Ten rozdział opisuje pokrótce eksperyment LHCb. Na samym początku omówione zostanie fundamentalne prawo fizyki łączące zasady zachowania z symetriami. Następnie opisane zostaną dyskretne symetrie w kontekście najnowszych badań doświadczalnych.

### 1.1. Symetrie w fizyce

Jeżeli chce się mówić na temat fizyki zawsze powinno się zacząć od tematu symetrii. Jedną z najbardziej fundamentalnych zasad w fizyce jest ta, łącząca prawa zachowania z symetriami natury. Twierdzenie Noether [10] pokazuje, że jeśli układ fizyczny jest niezmienniczy<sup>1</sup> względem pewnej ciągłej transformacji, to istnieje prawo zachowania wielkości stowarzyszonej z tą transformacją. Niezmienniczość praw fizycznych względem translacji czasowej jest odpowiedzialna za istnienie fizycznej zasady zachowania energii. Zasada zachowania pędu jest konsekwencją niezmienniczości względem przesunięć w przestrzeni. Natomiast zasada zachowania momentu pędu jest spełniona gdy prawa fizyki są identyczne po uwzględnieniu obrotów w przestrzeni.

Poza wyżej wymienionymi symetriami ciągłymi istnieją jeszcze symetrie dyskretne tzw. punktowe. Z punktu widzenia fizyki cząstek elementarnych istotnymi symetriami są:

- $\hat{C}$ - sprzężenie ładunkowe (ang. charge conjugation) zmienia znak wszystkich addytywnych liczb kwantowych danej cząstki. W specyficznym odniesieniu do rozpadów subatomowych cząstek, sprzężenie ładunkowe oznacza zamianę każdej cząstki na sprzężoną z nią antycząstkę.[11].

---

<sup>1</sup>rozumiemy tu Lagranżjan opisujący ten układ

- $\hat{P}$ - parzystość (ang. parity) jest to operacja zamiany wszystkich współrzędnych przestrzennych na przeciwne. [11]
- $\hat{T}$  odwrócenie czasu (ang. time reversal) zmienia kierunek przepływu czasu na przeciwny [11].

Według obecnej wiedzy, każda z tych symetrii jest zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych. Natomiast, co bardziej interesujące, słabe oddziaływania łamią symetrie  $\hat{C}$  oraz  $\hat{P}$ . Jednakże, kombinacja tych symetrii **CPT** jest dokładną symetrią w każdej lokalnej Lorentz’ko niezmienniczej teorii pola [11].

## 1.2. Symetrie a początek Wszechświata

W przybliżeniu po okresie  $10^{-6}s$  do Wielkiego Wybuchu została uformowana plazma kwarkowo-gluonowa w której to wolne kwarki oraz gluony podróżowały z relatywistycznymi prędkościami. Pary cząstka-antycząstka były stale tworzone oraz anihilowane, tworząc fotony, równomiernie poruszające się przez kosmos. Po tym procesie, do dzisiaj pozostało tzw. Mikrofalowe Promieniowanie Tła (ang. **Cosmic Microwave Background**). Na podstawie badań tego promieniowania oszacowano wiek Wszechświata na  $13.75 \pm 0.11$  miliarda lat [12].

Niedługo, po tym jak CMB zostało wytworzone jedna z liczb kwantowych *liczba barionowa* została złamana, w wyniku czego ilość produkowanych cząstek była większa niż ilość wytwarzanych antycząstek. Ten proces nazywany *bariogenezą* tłumaczy niewystępowanie antymaterii w obecnym wszechświecie. Co, oczywiście prowadzi do prostego wniosku - dzisiejszy wszechświat zbudowany jest z materii.

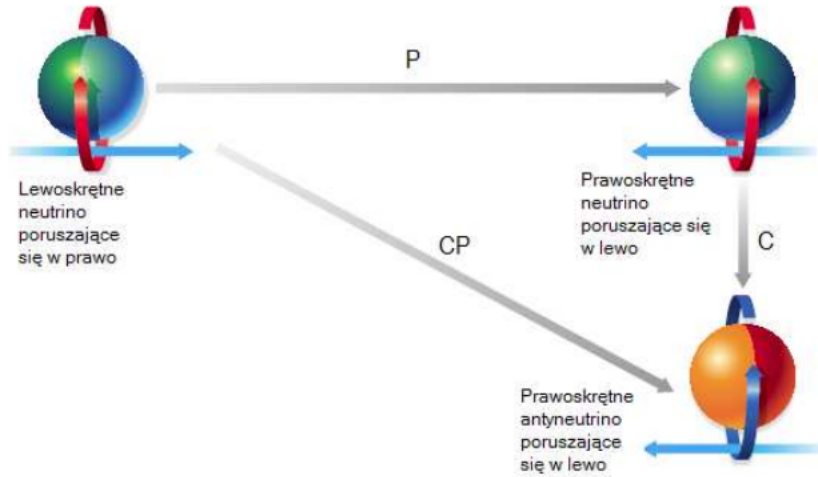
W 1967 Sacharow wyjaśnił [13], istnienie Wszechświata w obecnej formie wymaga spełnienia trzech warunków.

1. Niezachowania liczby barionowej.
2. Ochładzanie Wszechświata zachodziło w warunkach niebędących w równowadze termodynamicznej.
3. Zachodzenie procesu łamania symetrii kombinowanej **CP**

## 1.3. Symetria kombinowana CP

Symetria kombinowana **CP**, będąca jak uprzednio wspomniano jednym z warunków Sacharowa do tego, aby istniał wszechświat, była poddana obserwacji już wcześniej. Powodem tego

było odkryciem istnienia tylko lewoskrętnych<sup>2</sup> neutrino i prawoskrętnych antyneutrino. Wynikiem zastosowania operatora  $CP$ <sup>3</sup> na neutrino lewoskrętne jest antyneutrino prawoskrętne. Stąd sądzono, że ta symetria jest zachowana przez oddziaływania słabe. Obrazowo działania tych operatorów zostały zaprezentowane na rysunku 1.3.1.



Rys. 1.3.1. Działanie operatorów C, P i CP na neutrino

Tak było do roku 1964, kiedy to rozpad neutralnych kaonów pokazał, że ta symetria jednak jest łamana. Pierwszym dowodem na łamanie  $CP$  poza układem kaonów, został zaobserwowany w 2001 roku przez eksperyment Belle. Obiektami ich badań były układy neutralnych mezonów  $B$ <sup>4</sup>. Odkrycie zapoczątkowało nową erę badań procesów łamiących symetrię  $CP$ . Lekkie mezony  $B$  (neutralne  $B_u$  oraz naładowane  $B_d$  były poddawane precyzyjnym pomiarom przez fabryki- $B$ : Belle oraz BaBar. LHCb jest eksperymentem drugiej generacji. Jego krótki opis umieszczono w rozdziale 2.

### 1.3.1. Teoretyczny opis łamania symetrii $CP$

Stany własne oddziaływań słabych nie są tożsame ze stanami własnymi oddziaływań silnych<sup>5</sup>. Przejście z jednej bazy do drugiej możliwe jest dzięki macierzy Cabbibo-Kobayashi-Maskawy (CKM).

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (1.3.1)$$

<sup>2</sup>Skrętność oznacza rzut wektora spinu na kierunek ruchu cząstki

<sup>3</sup>Operatory  $C$  oraz  $P$  komutują ze sobą nawzajem

<sup>4</sup>Mezon  $B$  to hadron składający się z kwarka  $b$  oraz lżejszego antykwarka

<sup>5</sup>zwane również stanami własnymi masy

Macierz CKM jest macierzą unitarną trzeciego rzędu. Rozmiar macierzy odpowiada ilość rodzin kwarkowych. Zostało udowodnione<sup>6</sup>, że istnieją tylko 3 rodziny. Elementy macierzy określają stałe sprzężenie pomiędzy odpowiednimi kwarkami. Warto zwrócić uwagę, że Model Standardowy w żaden sposób nie przewiduje wartości elementów macierzy CKM. Wartości te należy wyznaczyć doświadczalnie.

W ciągu wielu lat teoretycznych studiów nad macierzą CKM teoretycy zaproponowali kilka sposobów jej parametryzacji. Do najbardziej uznanych należy parametryzacja Keung-Chau, zwana również standardowa.

$$\begin{aligned}
 V_{CKM} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{13}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 V_{CKM} &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.3.2)
 \end{aligned}$$

gdzie:

$c_{ij} = \cos\theta_{ij}$  oraz  $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ . Warto wyjaśnienie jest znaczenie kąta  $\theta_{ij}$  oraz  $\delta$ .  $\theta_{ij}$  są to tzw. kąty Eulera<sup>7</sup> mówiące o stopniu mieszania pomiędzy trzema zapachami kwarków ( $i,j=1,2,3$ ) oraz  $\delta$  jest fazą odpowiedzialną za łamanie symetrii **CP**.

Ważną, z punktu widzenia hierarchizacji wielkości mieszanie pomiędzy rodzinami kwarkowymi jest tak zwana parametryzacja Wolfensteina [15]. Każdy z elementów macierzy CKM jest wyrażany przez szereg potęgowy parametru  $\lambda = \sin\theta_{12} \approx 0.22$ . Kąt  $\theta_{12}$  zwany jest kątem Cabibbo [16].

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(\rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \quad (1.3.3)$$

Pozostałe parametry występujące w równaniu 1.3.3 określone są zależnościami:

$$A \equiv \frac{s_{23}}{s_{12}}, \quad \rho \equiv \frac{s_{13}\cos\delta}{s_{12}s_{23}}, \quad \eta \equiv \frac{s_{13}\sin\delta}{s_{12}s_{23}}$$

Ponieważ parametr  $\lambda$  jest mniejszy od jedności to można, analizując wykładnik napisać względne relacje między poszczególnymi elementami macierzy CKM. Łatwo zauważyć, iż najbardziej prawdopodobne są przejścia między kwarkami tej samej rodziny.

<sup>6</sup>na podstawie pomiarów astronomicznych oraz niezależnie eksperymentu DELPHI[14]

<sup>7</sup>Układ trzech kątów, za pomocą których można jednoznacznie określić wzajemną orientację dwóch układów współrzędnych.



### 1.3.2. Trójkąty unitarności

Wymogiem Modelu Standardowego jest unitarność macierzy CKM oznacza to, że musi zachodzić zależność

$$V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = \mathbf{1} \quad (1.3.4)$$

Z powyższego faktu wynika sześć warunków ortogonalności.

$$db : V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \quad (1.3.5)$$

$$sb : V_{us}V_{ud}^* + V_{cs}V_{cd}^* + V_{ts}V_{td}^* = 0 \quad (1.3.6)$$

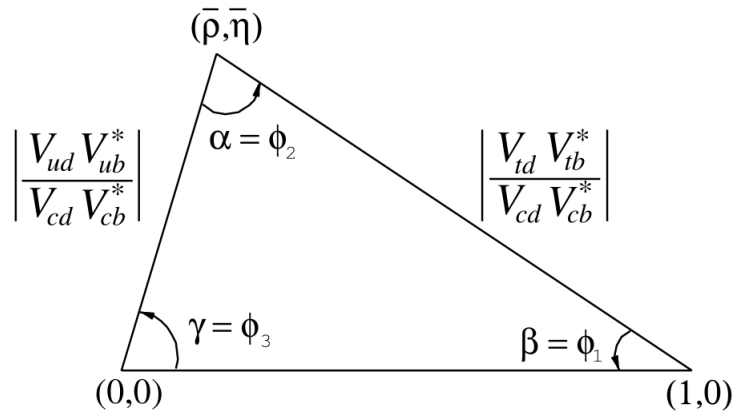
$$ds : V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* = 0 \quad (1.3.7)$$

$$ut : V_{du}V_{dc}^* + V_{su}V_{sc}^* + V_{bu}V_{bc}^* = 0 \quad (1.3.8)$$

$$ct : V_{dc}V_{dt}^* + V_{sc}V_{st}^* + V_{bc}V_{bt}^* = 0 \quad (1.3.9)$$

$$uc : V_{dt}V_{du}^* + V_{st}V_{su}^* + V_{bt}V_{bu}^* = 0 \quad (1.3.10)$$

Łatwo się przekonać, że każdy z powyższych warunków prowadzi do zanikania sumy trzech zespolonych liczb. Warunki unitarności mogą być przedstawione w postaci trójkątów w przestrzeni zespolonej (diagram Arganda) i nazywane są trójkątami unitarności. Każdy, z tych trójkątów posiada jednakowe pole, które można wyrazić, w notacji parametryzacji Wolfenstein,  $P = \lambda^6 A^2 \eta$ . Trójkąty te wyróżnia długości ich boków. Zaletą korzystania z formalizmu trójkątów unitarności jest fakt, że przy jakiegokolwiek zmianie parametryzacji macierzy CKM trójkąty zostają tylko obrócone w przestrzeni zespolonej natomiast długości boków oraz kąty pozostają bez zmian.



**Rys. 1.3.2.** Trójkąt unitarności, kąty  $\phi_{1,2,3}$

odpowiadają kątom  $\alpha, \beta, \gamma$  w notacji używanej przez eksperyment BELLE. Dolny bok trójkąta posiada jednostkową długość jest to zgodne z przyjętą konwencją. [17]

Z eksperymentalnego punktu widzenia, najciekawszym trójkątem jest 1.3.5, ponieważ jego boki są porównywalnych rozmiarów co oznacza, że wszystkie kąty (bądź odpowiadające im fazy)

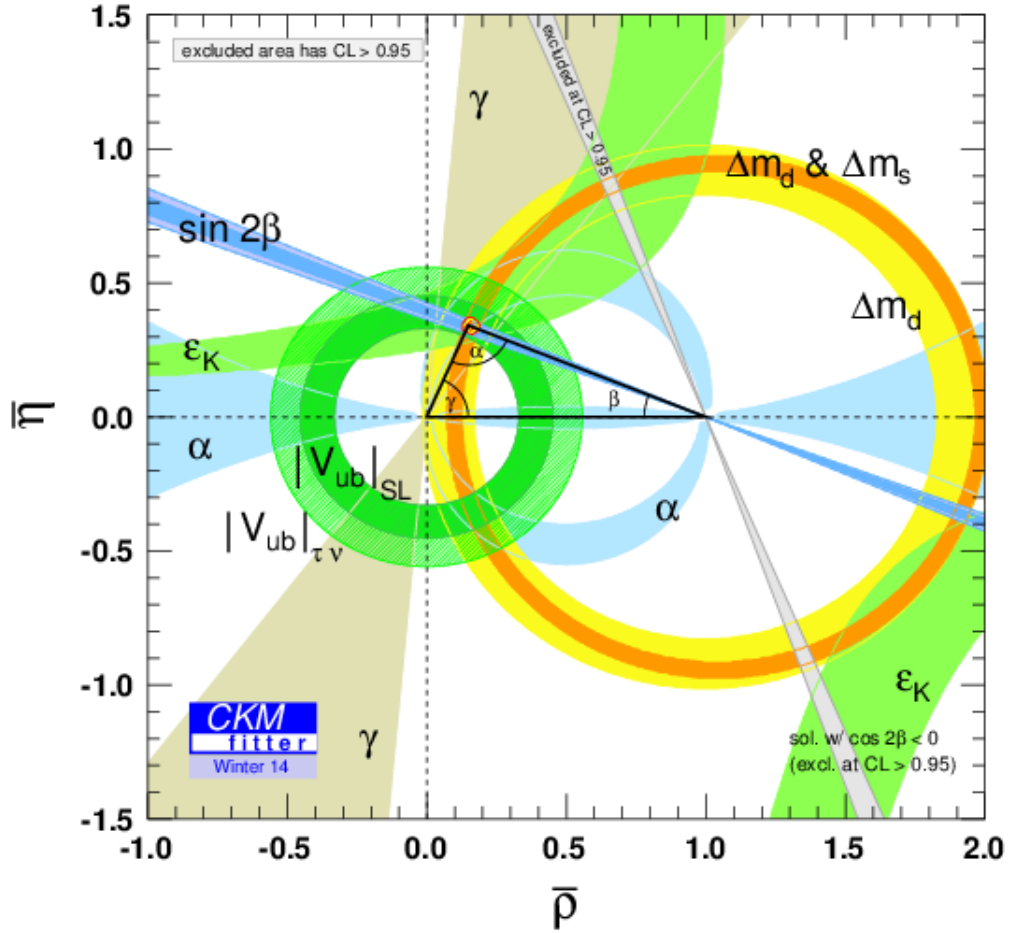
są duże. Trójkąt przedstawiony jest na rysunku 1.3.2. Użyto standardowego oznaczenia kątów  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , te trzy kąty odnoszą się do zespolonych komponentów macierzy CKM przez związki:

$$\alpha = \arg\left(-\frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*}\right) = \arg\left(\frac{(1 - \frac{1}{2}\lambda^2)(i\eta - \rho)}{1 - \rho - i\eta}\right) \quad (1.3.11)$$

$$\beta = \arg\left(-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right) = \arg\left(\frac{1}{1 - \rho - i\eta}\right) \quad (1.3.12)$$

$$\gamma = \arg\left(-\frac{V_{ud}V_{cb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*}\right) = \arg\left(1 - \frac{1}{2}\lambda^2\right)(\rho - i\eta) \quad (1.3.13)$$

W celu wyznaczenia kątów trójkąta opisanego równaniem 1.3.5 wykonano serie pomiarów eksperymentalnych. Dokładniejsze opisy rozpadów dzięki którym udało się ograniczyć przedziały dostępności tych kątów można znaleźć w [17]. Rysunek 1.3.3 przedstawia zebrane wyniki ze wszystkich pomiarów jakie do tej pory były przeprowadzone w różnych eksperymentach.



**Rys. 1.3.3.** Przedziały dostępności kątów trójkąta unitarności (db) otrzymane w wyniku zebrania danych ze wszystkich eksperymentów.[1]

### 1.3.3. Typy łamania symetrii CP

Łamanie symetrii kombinowanej CP w ramach Modelu Standardowego, może zachodzić w trzech typach procesów.

- **Bezpośrednie łamanie symetrii CP** zwane również łamaniem w rozpadzie, zachodzi gdy występuje różnica pomiędzy częstościami rozpadów wzajemnie do siebie sprzężonych procesów. Zjawisko, to może się pojawiać zarówno dla naładowanych jak i neutralnych mezonów.
- **Łamanie symetrii CP w mieszaniu** występuje tylko dla neutralnych mezonów, dla których to możliwa jest sytuacja gdzie stany własne masy nie są stanami własnymi oddziaływań słabych. W związku z powyższym faktem można zapisać posługując się notacją Dirca biorąc jak przykładowy mezon B:

$$\begin{aligned} |B_H\rangle &= p|B^0\rangle + q|\overline{B}^0\rangle \\ |B_L\rangle &= p|B^0\rangle - q|\overline{B}^0\rangle \end{aligned} \quad (1.3.14)$$

gdzie: stany po prawej stronie są stanami własnymi zapachu. natomiast te po lewej są stanami własnymi masy odpowiednio ciężkim  $|B_H\rangle$  oraz lekkim  $|B_L\rangle$ . Warunek normalizacji wymaga aby w każdym momencie była spełniona zależność:

$$|q|^2 + |p|^2 = 1 \quad (1.3.15)$$

Ewolucja czasowa układu opisanego równaniem 1.3.15 reprezentowana jest zależnym od czasu równaniem Schrödingera.

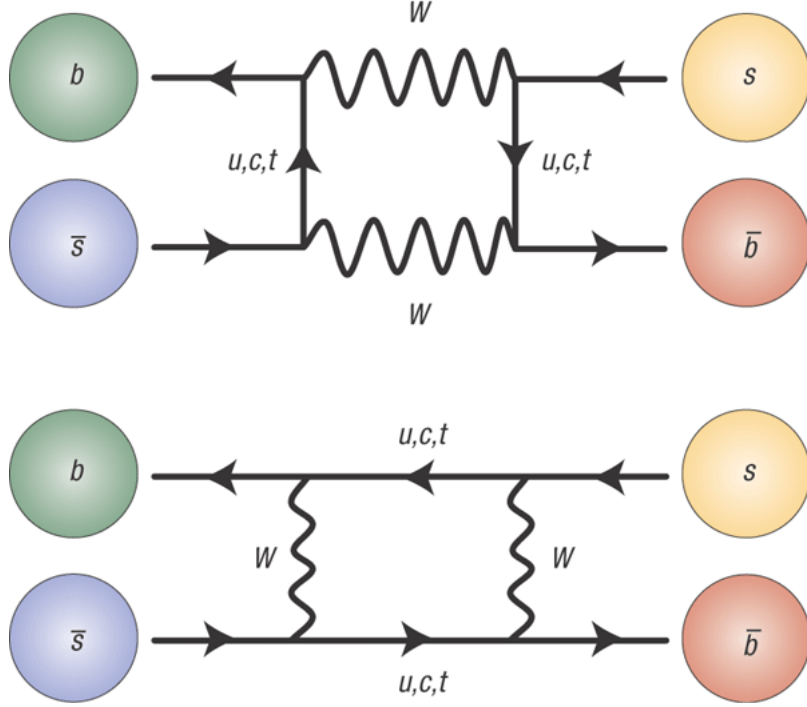
$$i\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} p(t) \\ q(t) \end{pmatrix} = \hat{\mathcal{H}} \begin{pmatrix} p(t) \\ q(t) \end{pmatrix} = (\mathbf{M} - \frac{i}{2}\Gamma) \begin{pmatrix} p(t) \\ q(t) \end{pmatrix} \quad (1.3.16)$$

gdzie  $\hat{\mathcal{H}}$ - hamiltonian,  $\mathbf{M}$  oraz  $\gamma$  są macierzami o rozmiarach 2x2. Pozadiagonalne elementy tych macierzy są odpowiedzialne za procesy mieszania. Zjawiska te można przedstawić w formie diagramów Feynmana, co zostało zrobione na rysunku 1.3.4. W literaturze diagramy tego typu nazywane są diagramami pudełkowymi.

Rozwiązanie krok po kroku równania 1.3.16 można znaleźć w [18]. W niniejszej pracy przytoczone zostanie tylko ostateczny wynik.

$$\frac{p}{q} \propto \Delta M - \frac{i}{2}\Delta\Gamma \quad (1.3.17)$$

Łamanie symetrii CP zachodzi gdy  $|\frac{p}{q}| \neq 1$ . Analizując równanie 1.3.17 można wywnioskować, że aby znaleźć wielkość łamania symetrii kombinowanej CP należy bardzo dokładnie znać różnice w czasach życia oraz masach pomiędzy stanem ciężkim  $|B_H\rangle$  oraz lekkim  $|B_L\rangle$ .



**Rys. 1.3.4.** Diagramy Feynmana opisujące procesy mieszania neutralnych mezonów B.

- **Łamanie symetrii CP w interferencji pomiędzy rozpadem z mieszaniem i bez mieszania**

Zjawisko to jest związane z asymetrią pomiędzy rozpadami mezonów neutralnych zachodzącymi bezpośrednio  $X^0 \rightarrow f$  lub w wyniku mieszania  $X^0 \rightarrow \bar{X}^0 \rightarrow f$ . W takim wypadku stopień łamania symetrii jest proporcjonalny do części urojonej współczynnika  $\eta_f$  opisanego zależnością 1.3.18.

$$\eta_f = \frac{q}{p} \cdot \frac{A(\bar{X}^0 \rightarrow f)}{A(X^0 \rightarrow f)} \quad (1.3.18)$$

# Rozdział 2

## Eksperyment LHCb

Niniejszy rozdział stanowi krótkie wprowadzenie do eksperymentu LHCb (ang. Large Hadron Collider beauty experiment).

### 2.1. Akcelerator LHC

LHC jest największym, działającym akceleratorem cząstek na świecie zaprojektowanym do zderzania protonów przy energii środka masy  $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ . Poza samą energią wiązki ważnym parametrem związanym z pracą akceleratora jest świetlność ( $L$ ). Wielkość ta, mówi jak wiele zaszło zderzeń na sekundę oraz jest związana z przekrojem czynnym:

$$\frac{dN}{dt} = L\sigma \quad (2.1.1)$$

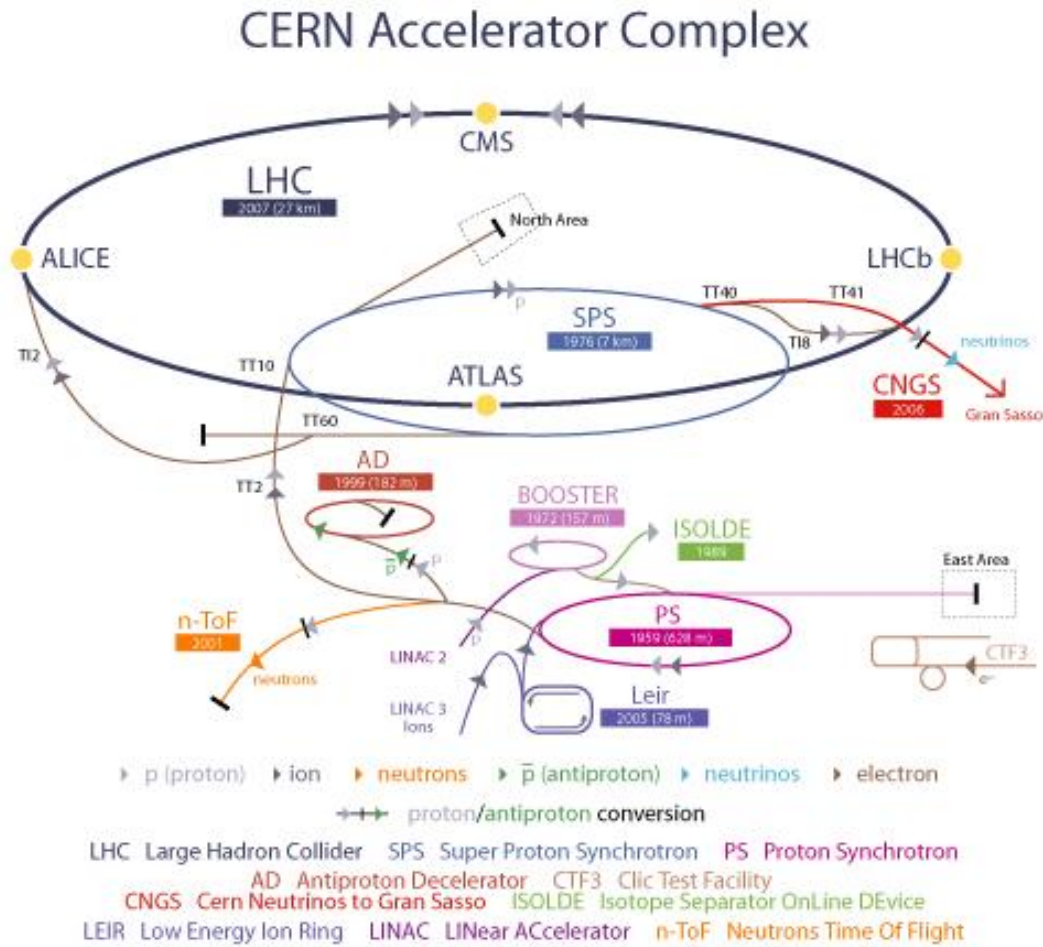
Łączny rozmiar zebranych danych można otrzymać całkując chwilową świetlność:

$$\mathcal{L} = \int L dt \quad (2.1.2)$$

Otrzymana wielkość posiada jednostkę odwrotności pola powierzchni, zwaną również barnem. Eksperymenty ATLAS oraz CMS (opisane poniżej) mogą pracować z maksymalną osiągalną świetlnością przez LHC- $\mathcal{L} = 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , natomiast LHCb redukuje ją dla swoich potrzeb w celu zmniejszenia wielokrotnych zderzeń dla pojedynczego zderzenia.

LHC został umiejscowiony w 26,7 km tunelu skonstruowanym pierwotnie dla poprzedniego akceleratora elektronowego LEP (ang. Large Electron-Positron Collider).

Na rysunku 2.1.1 pokazany jest schemat kompleksu przyspieszającego oraz detektorów pracujących przy eksperymencie LHC. Sam proces przyspieszania jest wielostopniowy[19]. Na początku protony otrzymywane są w wyniku jonizacji atomów wodoru po czym wstępnie przyspieszane w akceleratorze liniowym (LINIAC2) do energii 500MeV. Następnie dwa kołowe akceleratory zwiększają energie cząstek do 1GeV (BOOSTER) oraz 26 GeV (PS), kontynuując podróż



Rys. 2.1.1. Schemat kompleksu przyspieszającego akceleratora LHC. [2]

przez system akceleratorów przechodzą przez SPS rozpędzający je do energii 450 GeV. Na sam koniec są umieszczane w docelowym pierścieniu LHC, w którym to przebywają 20 minut zanim nabiorą maksymalną energię. Do utrzymania dwóch przeciwbieżnych wiązek protonowych na ich orbitach potrzebne są 1232 nadprzewodzące magnesy, generujące pole o indukcji 8.33T. Aby magnesy pozostawały w stanie nadprzewodzenia muszą być schłodzone do temperatury 1.9 K. Tak niską temperaturę uzyskuje się przy użyciu nadciekłego helu.

Wiązki są zderzane w 4 punktach oznaczonych na rysunku 2.1.1 żółtymi kropkami. W każdym z tych punktów umiejscowiony jest jeden z detektorów oraz powiązanych z nimi eksperyment. Noszą one odpowiednio nazwy ATLAS, CMS, ALICE oraz LHCb.

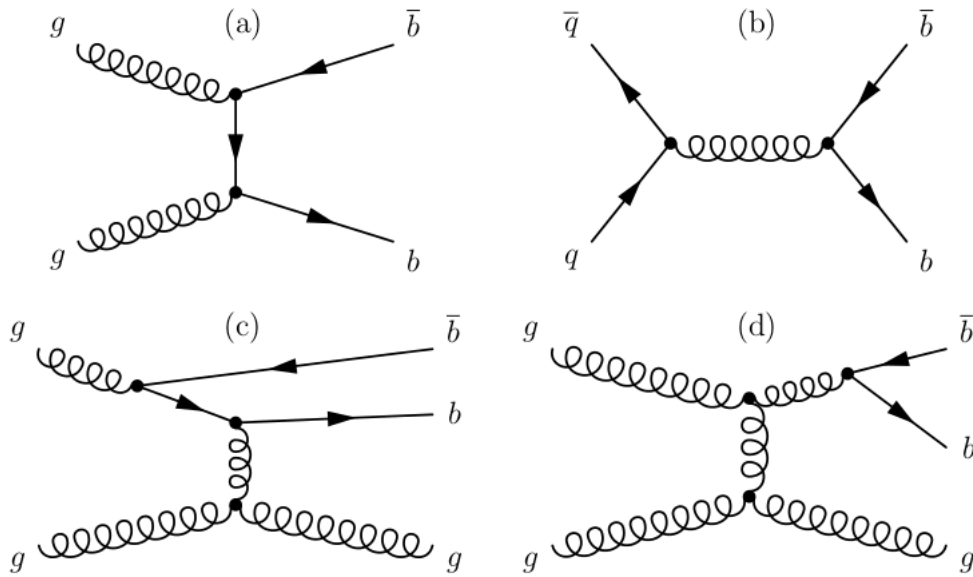
Głównymi celami eksperymentów ATLAS (ang. A Toroidal Lhc ApparatuS)[20] oraz CMS (ang. Compact Muon Solenoid) [21] jest poszukiwanie bozonu Higgsa, cząstki która wg Modelu Standardowego odpowiada za nadawanie masy, oraz sprawdzenie teorii supersymetrii (SUSY). ALICE (ang. A Large Ion Collider Experiment)[22] został zoptymalizowany do badania plazmy gluonowo-kwarkowej powstającej w wyniku zderzeń ciężkich jonów.

## 2.2. Detektor LHCb

Eksperyment LHCb został zaprojektowany do badania łamania symetrii kombinowanej **CP** oraz rzadkich procesów w sektorze ciężkich kwarków  $b$  i  $c$ . Jako przykład można podać mezon B. Produkcja pary  $b\bar{b}$  będąca wynikiem zderzenia proton-proton jest zdominowana przez fuzję gluonową gluonów i partonów, diagram Feynmana opisujący takie procesy został umieszczony na rysunku 2.2.1. Amplituda takiego procesu jest proporcjonalna do kwadratu stałej oddziaływań silnych. Warto zwrócić uwagę, że w przeciwieństwie do oddziaływań elektromagnetycznych, dla których stała sprzężenia zbliża się asymptotycznie do wartości:

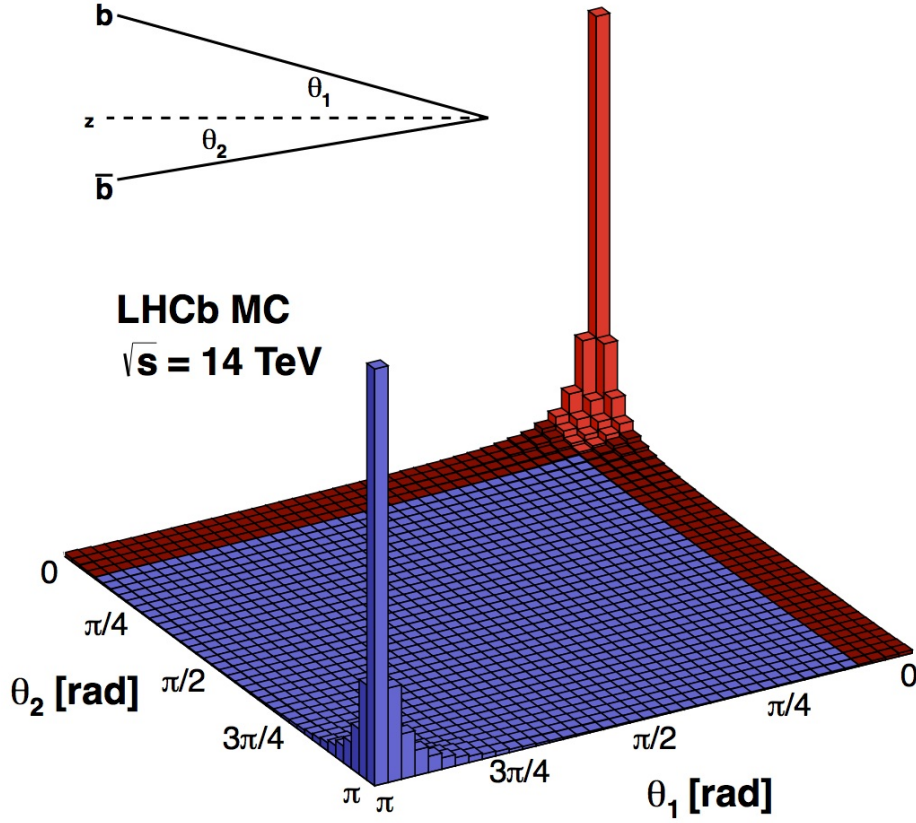
$$\alpha_{QED} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (2.2.1)$$

Stałe sprzężenia oddziaływań silnych zmieniają się z odległościami pomiędzy kwarkami [16]. Symulacje takich procesów pokazały, że przy energiach osiągniętych dzięki LHC, zarazem kwarki  $b$  jak i  $\bar{b}$  przeważnie produkowane są w kierunku do przodu lub tyłu, co przedstawiono na rysunku 2.2.2.



**Rys. 2.2.1.** Przykładowe diagramy Feynmana obrazujące produkcję mezonów B. Diagramy pierwszego rzędu odpowiadają kreacji par przez fuzję gluonową (a) oraz anihilację kwark-antykwar (b). Przykładowe schematy wyższych rzędów to wzbudzenia zapachowe (c) oraz rozszczepianie gluonu (d)

Detektor LHCb jest spektrometrem o akceptancji kątowej wynoszącej od 10 do 300 mrad. Jest to geometria typu "do przodu", której konsekwencją jest efektywny przedział pseudorapidity



**Rys. 2.2.2.** Wykres korelacji pomiędzy kątem polarnym a ilością produkowanych kwarków  $b$  w zderzeniu proton-proton. Symulacja została wykonana przy użyciu programu Pythia [3]

obserwowanych cząstek  $1.7 < \eta < 5.3$ . Przy czym pseudorapidity,  $\eta$  jest zdefiniowana jako

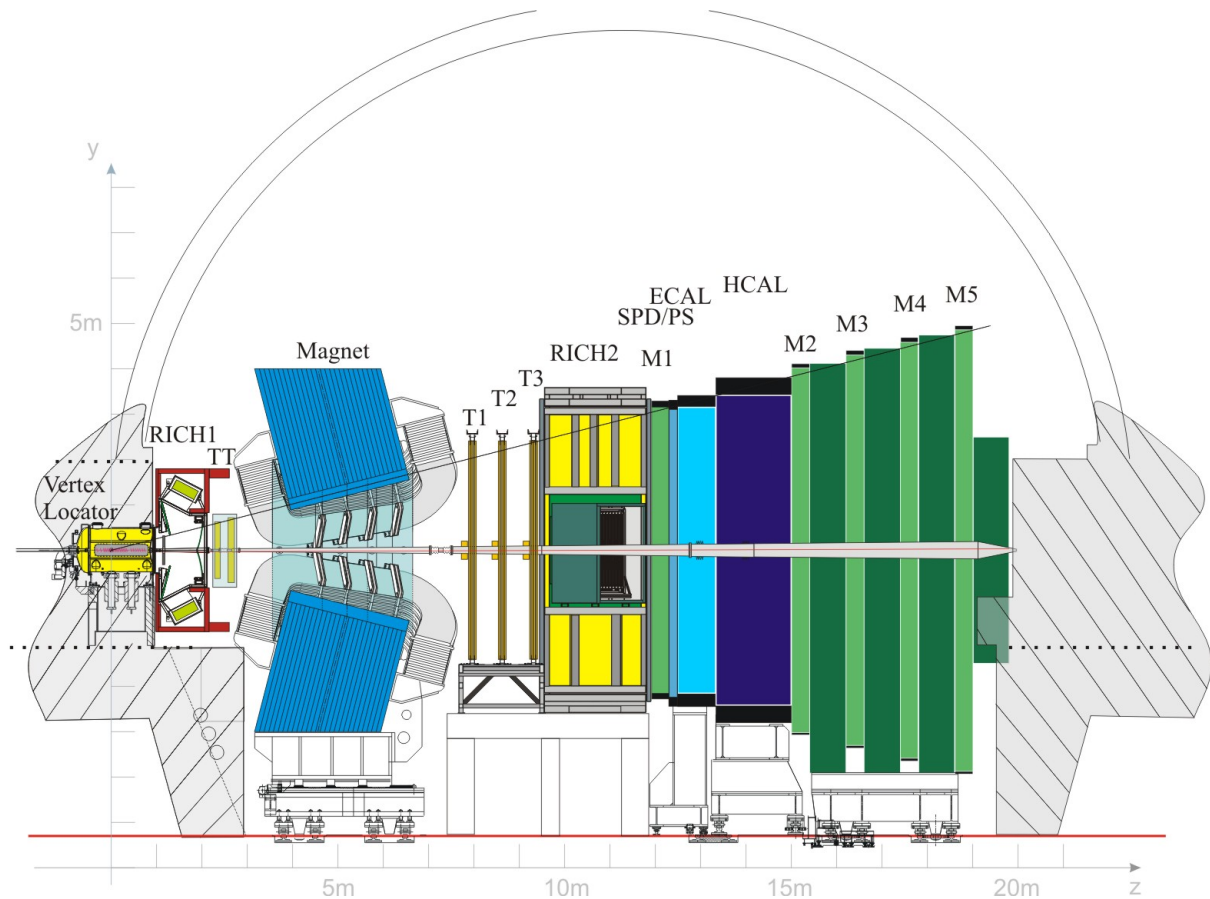
$$\eta = -\ln \left( \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.2.2)$$

gdzie  $\theta$  kąt między kierunkiem pędu cząstki oraz osią wiązki.

Zamieszczony na rysunku 2.2.3 spektrometr LHCb składa się z szeregu systemów detekcyjnych. Systemy te są podzielone na trzy główne grupy. Pierwsza z nich służy do rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych. Informacja o śladach niezbędna jest do wyznaczania trzech komponentów pędu i położenia cząstek. Następna grupa detektorów odpowiedzialna jest za identyfikację cząstek. Te dwie informacje w pełni opisują każdą indywidualną cząstkę, a co za tym idzie całe zdarzenie. Ostatecznie układ wyzwalania (ang. trigger) dokonuje selekcji przypadków na te, ciekawe z punktu widzenia analizy fizycznej.

- **Rekonstrukcja śladów:** System rekonstrukcji śladów składa się z położonego najbliżej punktu zderzeń, mikropaskowego, krzemowego detektora zwanego VELO (ang. VErteX



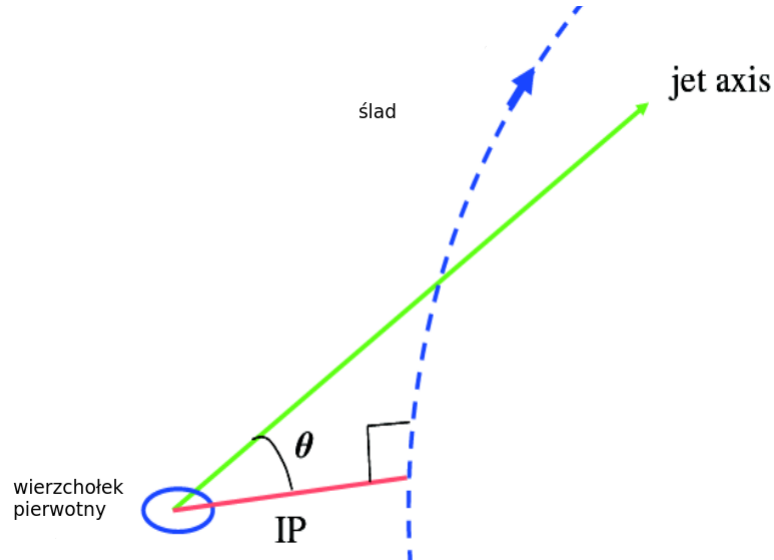


Rys. 2.2.3. Detektor LHCb w całej okazałości [2]

LOcator) który, z bardzo dużą precyzją, mierzy pozycję pierwotnego wierzchołka oraz parametr zderzenia (ang. Impact Parameter, IP). Wizualizacja parametru zderzenia znajduje się na rysunku 2.2.4.

Następnym po detektorze VELO, jest umiejscowiony przed magnesem zakrzywiającym, detektor TT (ang. Tracker Turicensis). Podobnie jak wcześniej wspomniany VELO, TT również został wykonany w technologii mikropaskowej. Zadaniem jego jest zwiększenie rozdzielczości mierzonego pędu cząstek. Pole magnetyczne wytwarzane przez magnes dipolowy zakrzywia trajektorię ruchu cząstek w płaszczyźnie x-z, co umożliwia wyznaczenie ich pędu poprzez porównywanie elementów toru przed oraz za magnesem. System śladowy jest dopełniany przez stacje T, które to wraz z VELO, pozwalają wyznaczać pęd oraz kierunek ruchu cząstek. Stacje T dzielą się na dwa regiony. Pierwszy, znajdujący się bliżej rury akceleratora, składa się z mikropaskowych detektorów krzemowych, natomiast ten bardziej oddalony jest gazowym detektorem słomkowym. Każdy z detektorów do wyznaczania śladów charakteryzuje się wystarczającą rozdzielczością przestrzenną.

- **Identyfikacja cząstek:** Zasada działania systemu identyfikacji cząstek jest oparta na dwóch prawach fizycznych. Pierwszym z nich jest emisja promieniowania Czerenkowa.



**Rys. 2.2.4.** Wizualizacja parametru zderzenia, będącego najmniejszą odległością od wierzchołka pierwotnego do śladu. Parametr zderzenia (IP) został oznaczony czerwoną linią.

Promieniowanie to jest emitowane gdy naładowana cząstka porusza się w danym ośrodku szybciej niż światło w tym ośrodku. Kąt emitowanego fotonu jest zależny od prędkości z jaką porusza się cząstka wg wzoru

$$\cos\theta = \frac{c}{nv} \quad (2.2.3)$$

gdzie:

c- prędkość światła w próżni, v- prędkość cząstki, n- współczynnik załamania ośrodka. Jak pokazano na rysunku 2.2.10

Zjawisko to wykorzystują dwa detektory RICH (ang. Ring Imaging Cherenkov detector). Efekt ten pozwala na rozróżnienie pomiędzy typami hadronów.

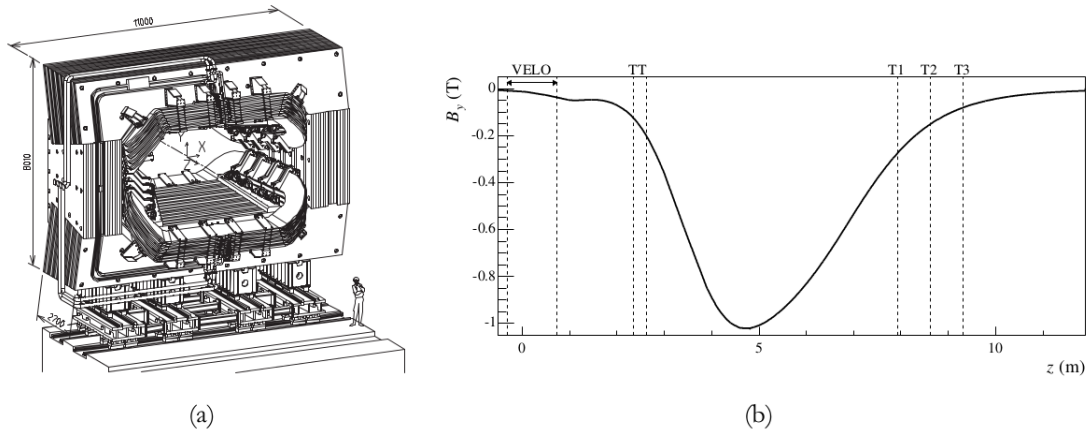
Elektromagnetyczne oraz hadronowe kalorymetry, ECAL i HCAL, mierzą energię oddziałujących z nimi cząstek poprzez całkowitą ich absorpcję. Detektory te wspierane są przez SPD oraz PS, które to pomagają w rozwiązywaniu występujących dwuznaczności w identyfikacji. Ostatnim elementem czynnym, w znaczeniu oddalenia od miejsca zajścia zderzenia, w systemie detekcyjnym LHCb jest układ detektorów mionowych. Układ ten, jak sama nazwa wskazuje, jest wykorzystywany do identyfikacji mionów. Jego stacje (od M1 do M5) rejestrują cząstki, które przemierzyły całą długość detektora LHCb. Tylko miony, z naładowanych cząstek, posiadają takie własności.

Komponenty wchodzące w skład detektora są dokładnie opisane w dalszej części tego rozdziału.

### 2.2.1. Magnes zakrzywiający

Jednym z istotnych elementów systemu rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych jest magnes dipolowy, który zakrzywia trajektorie cząstek, co daje możliwość pomiaru pędu. Składa się z dwóch identycznych, aluminiowych, jednocześnie nie będących w stanie nadprzewodnictwa cewek umiejscowionych symetrycznie w około osi wiązki.

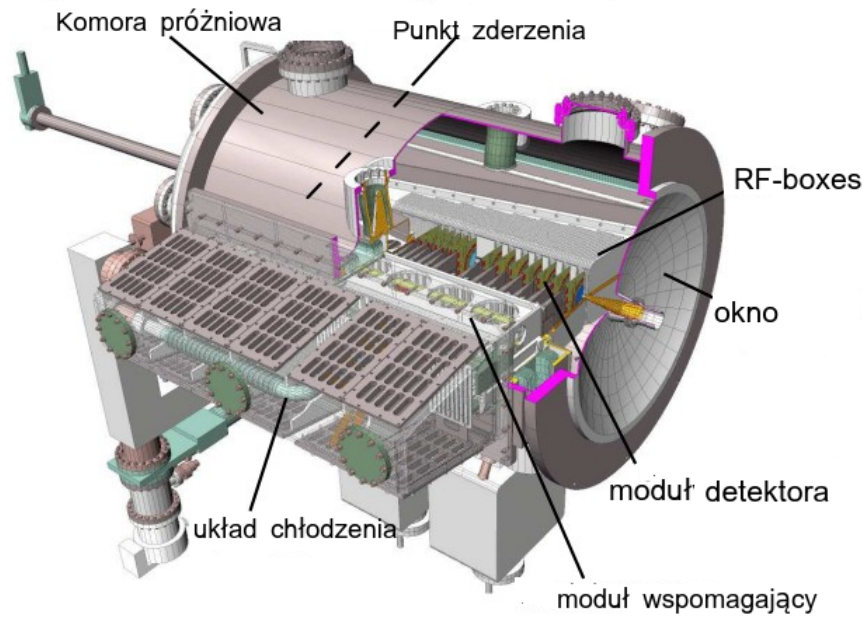
Magnes ten wytwarza pole o maksymalnej indukcji o wartości  $B_{max} = 1.1T$  oraz siłę gięcia równą  $\int Bdl = 4Tm$  [23]. Posiada możliwość zamiany polaryzacji. Dokonuje się tego w celu wyeliminowania wpływu ewentualnej asymetrii detekcji, która to może wpływać na pomiary łamania symetrii **CP**. Diagram prezentujący wygląd magnesu został zamieszczony na rysunku 2.2.5.



**Rys. 2.2.5.** Schemat magnesu zakrzywiającego wchodzącego w skład systemu detekcyjnego LHCb(a) oraz wielkość składowej y-owej indukcji pola magnetycznego jako funkcja współrzędnej z-owej.

### 2.2.2. VELO

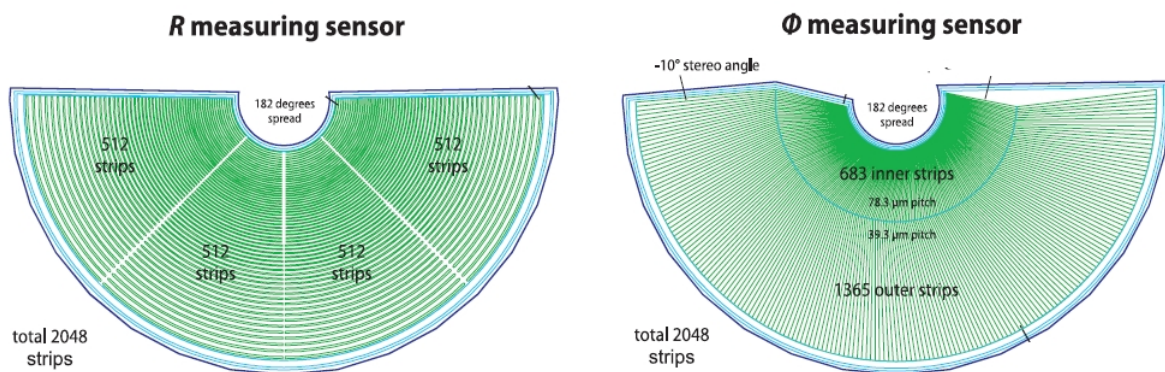
VELO (ang. VErteX LOcator) to mikropaskowy detektor krzemowy specjalnie zaprojektowany do rekonstrukcji pierwotnego oraz wtórnych wierzchołków powstającego w wyniku rozpadu mezonu  $B_{(s)}^0$  oraz  $D_{(s)}^0$  [4]. Obszar detekcji znajduje się już 8 mm od osi wiązki. W celu kontroli skutków efektów radiacyjnych układ stale utrzymywany jest w obniżonej temperaturze [24]. Pomiary dokonywane przez detektor są wykorzystywane również przez tryger wysokiego poziomu (HLT).



Rys. 2.2.6. Schemat detektora VELO[4]

### 2.2.2.1. Sensory krzemowe

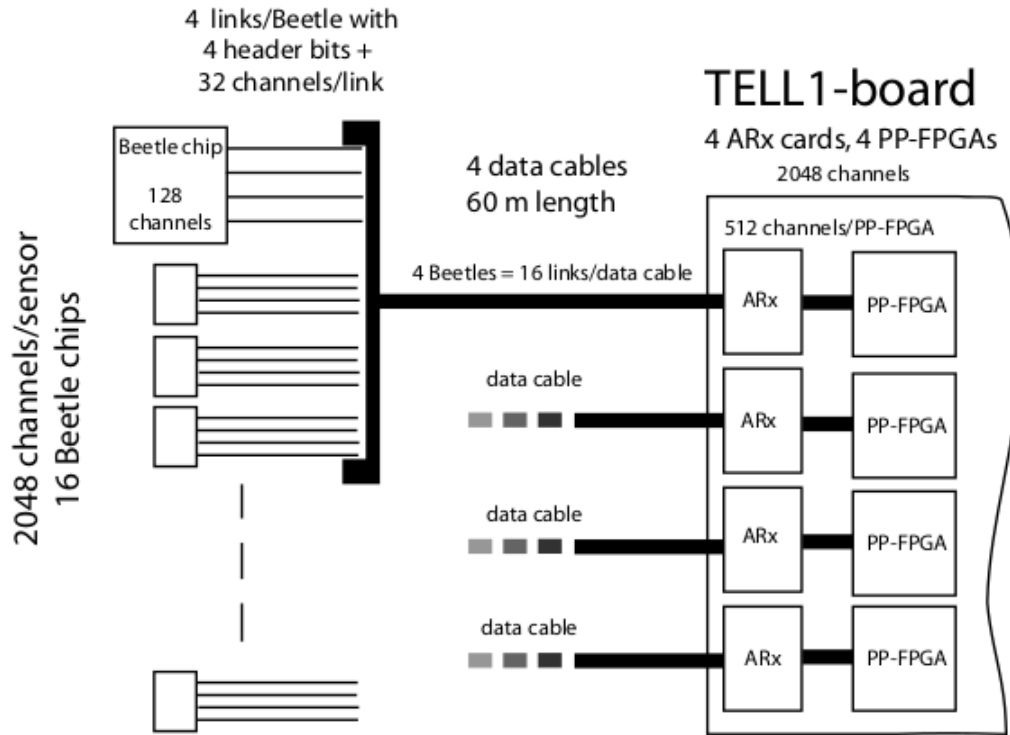
Pozycjo-czułe elementy VELO składają się z jednostronnych detektorów półprzewodnikowych o grubości  $300\mu m$  i kształcie zaprezentowanym na rysunku 2.2.7, akceptacja kątowa wynosi  $182^\circ$ , przy czym  $2^\circ$  jest to obszar pokryty przez dwa przeciwległe sensory. Wyróżniamy dwa typy sensorów. Jedne, służące do pomiaru współrzędnej radialnej  $R$ , drugie mierzą składową azymutalną  $\Phi$ . Każdy sensor zawiera 2048 fizycznych kanałów pomiarowych.



Rys. 2.2.7. Geometria sensorów [4]

Na 2.2.7 przedstawiona jest różnica w geometrii pasków. Paski w sensorach typu  $R$  są wycinkami współśrodkowych okręgów. Paski, te podzielone są na 4 segmenty. Natomiast sensory  $\Phi$  dzielą się radialnie na dwie części- zewnętrzną (638 pasków) oraz wewnętrzną (1365 pasków), przy czym paski w każdej z części posiadają kąty stereo o przeciwnych znakach.



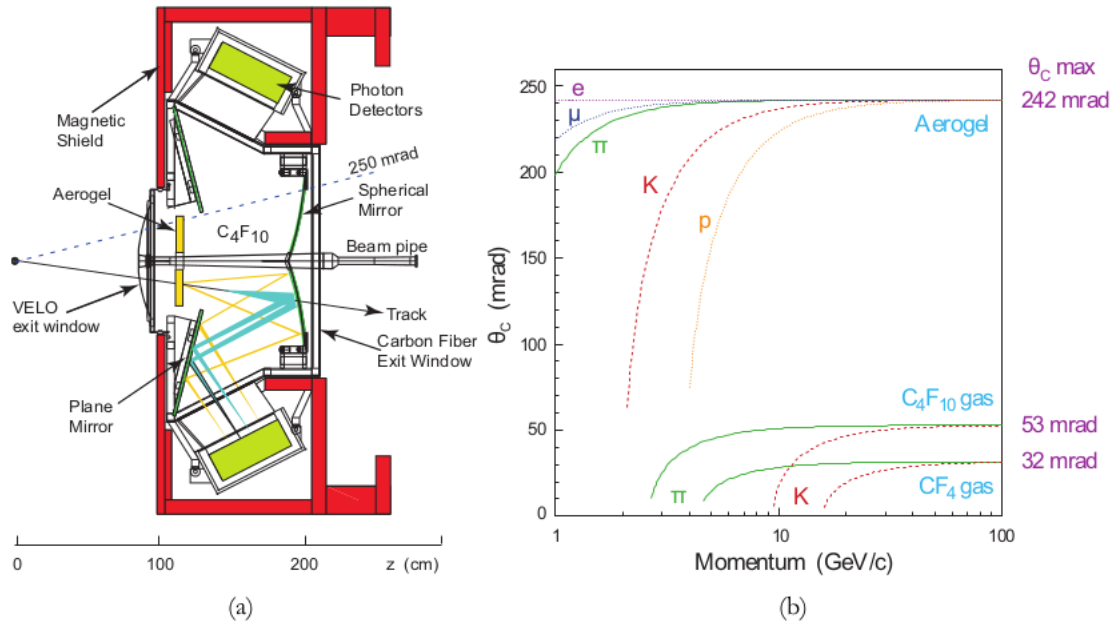


Rys. 2.2.9. Ścieżka odczytowa pomiędzy kanałami VELO a płytą TELL1[6]

### 2.2.3. Detektory Czerenkowa

RICH (ang. Ring Imaging Cherenkov detector) jest detektorem promieniowania Czerenkowa wykorzystywanym do identyfikacji hadronów. W szczególności wydajna i niezawodna separacja pionów oraz kaonów jest niezbędna przy badaniu rozpadów mezonów  $B_{(s)}^0$  oraz  $D_{(s)}^0$ . W spektrometrze LHCb zamontowano dwa detektory RICH. Pierwszy z nich (RICH1), umieszczony zaraz za VELO, jest zoptymalizowany dla nisko pędowych cząstek o pędzie w przedziale  $\sim 1 - 60 \text{ GeV}/c$ . Drugi (RICH2), położony za magnesem, służy do identyfikacji cząstek o dużych pędach ( $\sim 15 - 100 \text{ GeV}/c$ ) [25]. Detektory promieniowania Czerenkowa zbudowane są z radiatora, w którym cząstka emituje promieniowanie, oraz z układu lusterek skupiających odpowiednio promieniowanie na powierzchni fotoczulej. Pomiar kąta emisji promieniowania odbywa się przez pomiar promienia charakterystycznego pierścienia, który tworzy. RICH1 znajduje się zaraz za detektorem wierzchołka, przed magnesem dipolowym. Radiatorem w nim jest aerogel ( $n = 1,03$ ), który umożliwia identyfikację kaonów dla przedziału pędów sięgających  $2 \text{ GeV}/c$  oraz odróżnienie pionów od kaonów, aż do  $10 \text{ GeV}/c$ . W RICH1 znajduje się drugi radiator:  $C_4F_{10}$  ( $n=1,0015$ ), który zapewnia rozróżnienie pion-kaon, w przedziale  $50 \text{ GeV}/c$ . Układem skupiającym jest lustro sferyczne o promieniu  $1,7 \text{ m}$  wykonane z  $6 \text{ mm}$  warstwy szkła pokrytej  $900 \text{ nm}$  warstwą glinu i  $200 \text{ nm}$  warstwą kwarcu. Do detekcji promieniowania użyto hybrydo-

wych fotodetektorów umieszczone na powierzchni sferycznej o promieniu dwa razy mniejszym niż zwierciadła.

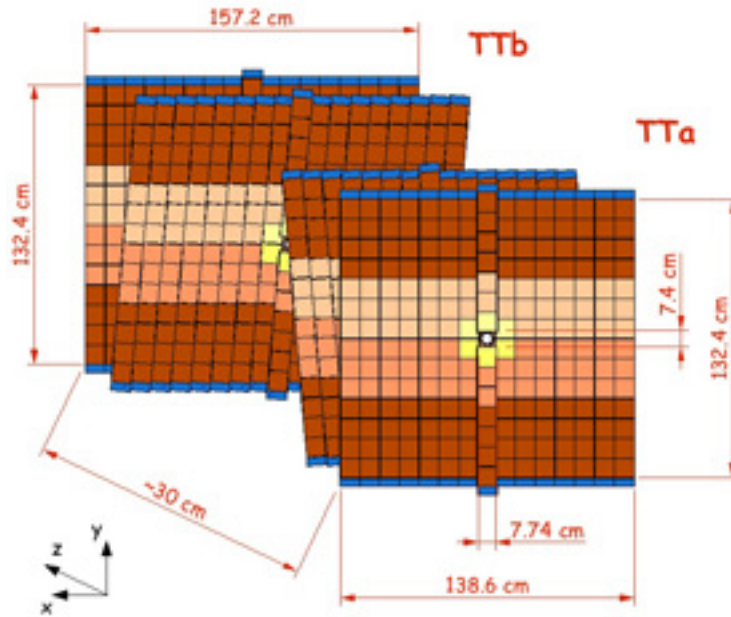


**Rys. 2.2.10.** Schemat detektora RICH1 z zaznaczonymi ścieżkami dla światła pojawiającego się w aerożelu oraz C<sub>4</sub>F<sub>10</sub>(a). Rozkład kątów Czerenkowa w zależności od pędu cząstek emitujących. Rysunki pochodzą z [2]

## 2.2.4. Detektory śladowe

Układ detektorów śladowych pozwala na rekonstrukcję trajektorii cząstek oddziałujących z materiałem czynnym detektora. Składa się z części umieszczonych przed magnesem (VELO, TT) oraz za nim (stacje T1-T3 i komory mionowe). Umieszczony na rysunku 2.2.11 TT (ang. Tracker Turicensis) jest wykorzystywana w analizie do rekonstrukcji długożyciowych neutralnych cząstek np. kaonów rozpadających się na zewnątrz detektora VELO. Detektor ten zbudowany jest z czterech warstw krzemowych, mikropaskowych detektorów. Detektory śladowe T1-T3, których schemat zamieszczono na rysunku 2.2.12, dokonujące pomiarów pozycji za magnesem, dzielą się na dwie części. Pierwszą z nich jest IT (ang. Inner Tracker) zbudowany podobnie jak TT, z krzemowych mikropaskowych detektorów. Wynika to z faktu iż IT znajduje się w miejscu, w którym oczekiwana jest największa ilość cząstek, natomiast OT (ang. Outer Tracker) jest gazowym detektorem słomkowym.





Rys. 2.2.11. Schemat detektora TT [2]

### 2.2.5. Kalorymetry

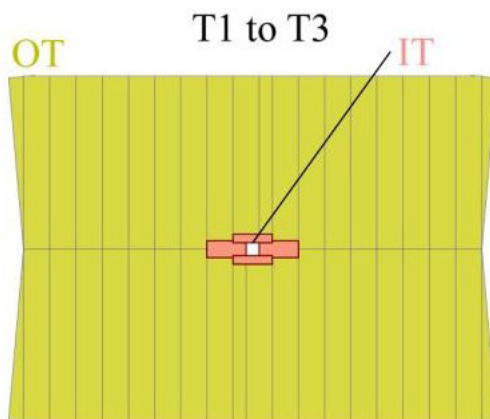
Zadaniem kalorymetrów jest identyfikacja fotonów, elektronów i hadronów oraz pomiar ich energii. Wykorzystywane są również w systemie wyzwalania. Wyróżniono następujące części:

- SPD (ang. Scintillator Pad Detector) oraz PS (ang. Pre Shower) służą do odróżniania fotonów i elektronów poprzez analizę topologii elektromagnetycznej kaskady cząstek wtórnych.
- ECAL (ang. Electromagnetic CALorimeter) mierzy energię fotonów i elektronów. Zdjęcie detektora zostało zaprezentowane na rysunku 2.2.13.
- HCAL (ang. Hadronic CALorimeter) używany do pomiaru energii hadronów.

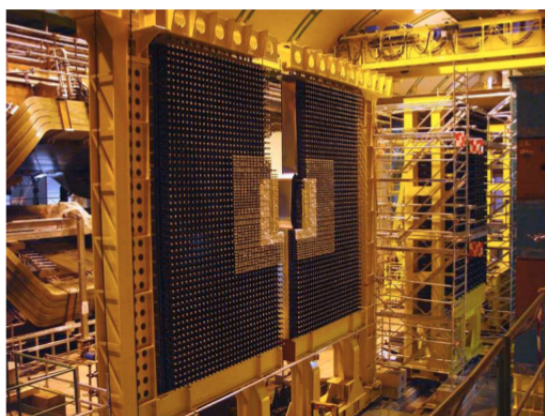
### 2.2.6. Komory mionowe

Identyfikacja mionów jest fundamentalnym wyzwaniem eksperymentu LHCb ponieważ cząstki te są stanami końcowymi powstającymi w wyniku rozpadów mezonów  $B_{(s)}^0$  oraz  $D_{(s)}^0$ . Miony słabo oddziaływające z materią są jedynymi cząstkami, które przechodzą przez system kalorymetrów. Układ detektorów składa się z pięciu wielodrutowych komór proporcjonalnych. Mają bardzo ważną rolę w systemie wyzwalania L0, oraz estymacji pędu poprzecznego mionów. Struktura systemu detekcji mionów została zaprezentowana na rysunku 2.2.14

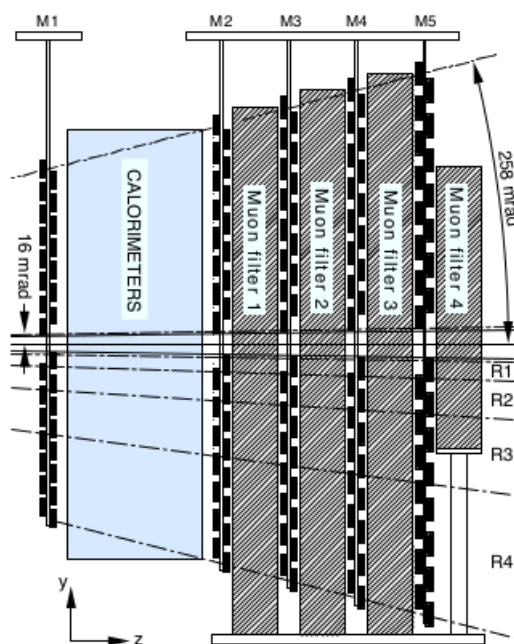




**Rys. 2.2.12.** Schemat detektorów T1-T3[2]. Region oznaczony na czerwono przedstawia IT natomiast na żółto zaznaczono OT.



**Rys. 2.2.13.** Zdjęcie detektora ECAL po zamontowaniu go w detektorze LHCb.

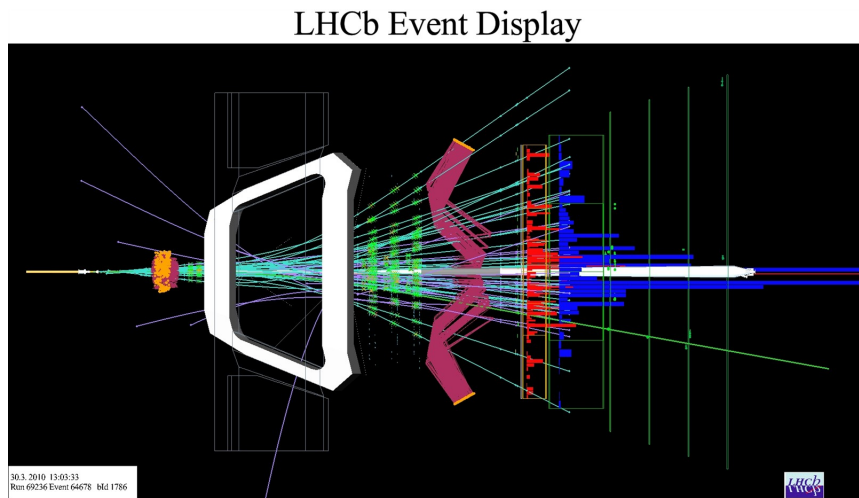


**Rys. 2.2.14.** Schematyczne przedstawienie (widok z boku) stacji mionowych oraz żelaznych absorberów umieszczonych pomiędzy stacjami.

### 2.2.7. System wyzwalania

Częstotliwość oddziaływania wiązek protonowych wynosi 40MHz, co w przybliżeniu odpowiada strumieniowi danych 40TB/s. W celu jego ograniczenia zastosowano system wyzwalania (ang. trigger). Obecny system akwizycji jest w stanie archiwizować dane przychodzące z prędkością nie większą niż 200 MB/s(4kHz). Końcowy efekt uzyskany jest dzięki dwóm poziomom decyzyjnym.

- Pierwszy poziom (Level0 [L0]) ogranicza strumień danych z 40 MHz do 1.1MHz. W procesie dokonywania decyzji wykorzystuje fakt iż produkty rozpadów mezonów  $B_{(s)}^0$  oraz  $D_{(s)}^0$  posiadają stosunkowo wysoki pęd poprzeczny oraz energię.
- Drugi poziom (High Level Trigger [HLT]) jest programem komputerowym wykonywanym na bardzo wielu CPU jednocześnie. Wykorzystuje dane pochodzące ze wszystkich detektorów. Szybki algorytm rekonstrukcji śladów łączy wyniki pochodzące z VELO wraz ze śladami zrekonstruowanymi przez pozostałe detektory śladowe. Na tej podstawie wybiera się przypadki fizyczne, które zapisywane są na dysku.



**Rys. 2.2.15.** Wizualizacja przypadku zdarzenia w detektorze LHCb[7]

# Rozdział 3

## Rekonstrukcja śladów

Rozdział ten ma na celu przedstawienie procesu rekonstrukcji śladów w eksperymencie LHCb. Na samym początku, pokrótce omówione będą oddziaływania cząstek z materią, następnie autor skupia się na opisanu strategii znajdowania śladów.

Rekonstrukcja śladów jest procedurą wykonywaną w celu znalezienie trajektorii lotu naładowanej cząstki przez detektor. Jest to niezbędny punkt praktycznie każdego eksperymentu z dziedziny fizyki cząstek, głównym celem wykonywania tej skomplikowanej procedury jest pomiar wartości trzech składowych pędu cząstki.

### 3.1. Oddziaływanie cząstek z materią

Kiedy cząstka przechodzi przez materię oddziałuje z nią. Istnieją dwa typy oddziaływań: elektromagnetyczne oraz hadronowe<sup>8</sup>.

#### 3.1.1. Oddziaływania elektromagnetyczne

Możliwe są następujące typy oddziaływań elektromagnetycznych:

- **Jonizacja** zachodzi gdy naładowana cząstka podróżując przez materiał wzbudza atom do wyższego stanu, lub gdy jonizuje go przez oddziaływanie z zewnętrznym elektronem. Średnia wartość traconej energii jest opisana przez pół-empirycznym wzorem Bethgo-Blocha[26]:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \log \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (3.1.1)$$

---

<sup>8</sup>W ogólności występują jeszcze oddziaływania słabe, lecz nie są one istotne z punktu widzenia znajdowania śladów

gdzie:

$K = \frac{4\pi e^2}{c^2 m_e} N_A$ , przy czym  $e$  ładunek elementarny,  $c$  prędkość światła,  $m_e$  masa elektronu,  $N_A$  stałą Avogadro,  $z$  ładunek cząstki ( w jednostkach ładunku elementarnego),  $Z$  liczba atomowa absorbentu,  $A$  liczba masowa absorbentu,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $I$  średnia energia jonizacji (w eV),  $T_{max}$  maksymalna energia kinetyczna przekazywana do swobodnego elektronu w pojedynczym zderzeniu,  $\delta(\beta\gamma)$  poprawka do energii wynikająca z elektrostatycznej polaryzacji ośrodka.

Warto zwrócić uwagę, że formuła Bethego-Blocha opisuje średnią energię traconą w przedziale prędkości  $0.1 < \beta\gamma < 1000$  z precyzją kilku procent. Z powyższego równania można wywnioskować, że najbardziej istotnymi przyczynkami do straty energii cząstki poprzez jonizację pochodzą od prędkości cząstki, jej ładunku i gęstości materiału.

- **Rozpraszanie Coulombowskie**, również zwane rozpraszanie Rutherforda, ten typ oddziaływania występuje pomiędzy cząstkami oraz jądrami atomowymi w materiale. W przeciwieństwie do wcześniej opisanej jonizacji zjawisko to nie prowadzi do strat energii, tylko do zmiany trajektorii lotu cząstki. Poza pojedynczym rozproszeniem Coulomba często zachodzi do zwielokrotnienia tego procesu tzw. **wielokrotnego rozpraszania Coulomba**.
- **Bremsstrahlung** zachodzi, gdy naładowana cząstka emituje foton pod wpływem pola pochodzącego od jąder atomowych. Jest to dominujący sposób na stratę energii elektronu w eksperymentach Fizyki Wysokich Energii.

### 3.1.2. Oddziaływania hadronowe

W wyniku oddziaływań hadronowych, hadrony powodują niszczenie jąder atomowych, co prowadzi do uwalniania protonów oraz neutronów (proces ten nazywa się spalacją) lub też prowadzi do głębokiego nieelastycznego rozpraszania, które to produkuje nowe hadrony, w większości piony. Cząstka oddziałująca hadronowo jest często tracona i dalsze jej śledzenie nie jest już możliwe. Przekrój czynny zależy od typu cząstki, jej ładunku oraz pędu.

## 3.2. Algorytm rekonstrukcji śladów

### 3.2.1. Parametryzacja śladów

Cząstka podróżując przez układ detektorów śladowych oznacza w miejscach oddziaływania punkty. Punkty te zwane są potocznie z angielskiego *hitami*. Zbiór takich punktów można wykorzystać do zrekonstruowania ścieżki, po której oryginalnie poruszała się cząstka poprzez

dopasowanie odpowiedniej trajektorii ruchu. Znalezienie tej trajektorii jest niezbędne aby dokonać pomiaru pędu cząstki. Zrekonstruowany ślad (ang. track) jest przechowywany jako zbiór tzw. stanów (ang. states). W praktycznym zastosowaniu stan jest prostą styczną do trajektorii w określonym punkcie o współrzędnej  $z$ . Tak zdefiniowany stan  $\vec{x}_z$  może zostać sparametryzowany przy użyciu:

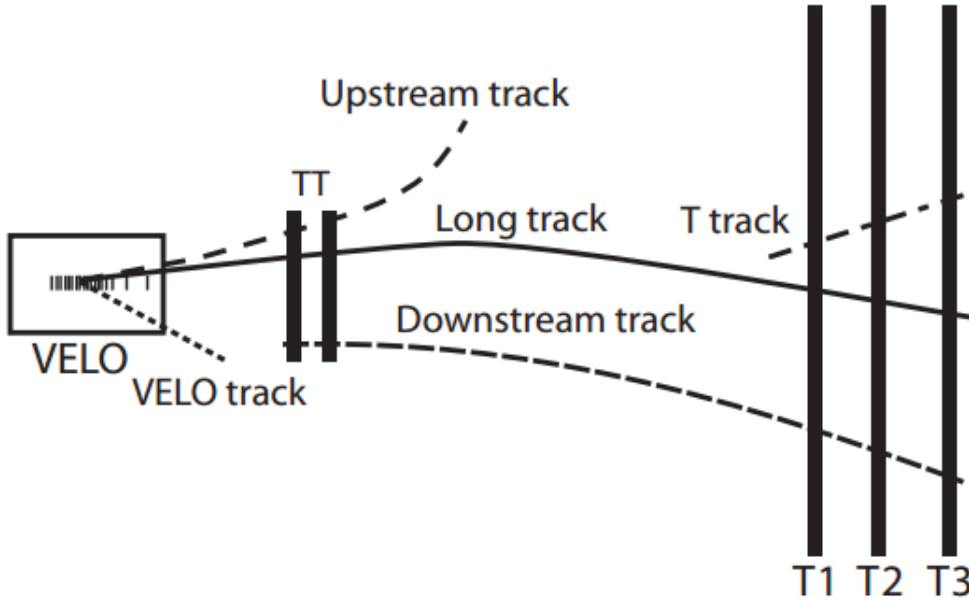
$$\vec{x}_z = \begin{pmatrix} x \\ y \\ t_x \\ t_y \\ \frac{q}{p} \end{pmatrix} \quad (3.2.1)$$

gdzie:  $x, y, z$  są składowymi kartezjańskimi zależnymi od punktu oddziaływania, przy czym oś  $z$  skierowana tak, aby wskazywać oś wiązki, natomiast oś  $y$  jest skierowana zgodnie z kierunkiem pola magnetycznego. Wartości  $t_x = \frac{dx}{dz}$  oraz  $t_y = \frac{dy}{dz}$  są nachyleniami ścieżki. Ostatni parametr  $\frac{q}{p}$  jest ładunkiem podzielonym przez wartość pędu. Warto zwrócić uwagę, że przyjmuje się  $q = \pm 1$ .

Poza samymi wartościami parametrów opisujących ślady kluczowa jest macierz kowariancji pomiędzy nimi.

### 3.2.2. Typy śladów

**3.2.3** LHCb używa pięć głównych kategorii śladów, co zostało zaprezentowane na schemacie z rysunku 3.2.1. Poniżej przedstawiono wyjaśnienie nazw typów śladów.



Rys. 3.2.1. Poglądowym rysunek śladów w LHCb [8]

- **Ślady długie** (ang. long tracks) zawierają informacje ze wszystkich detektorów śladowych zainstalowanych w LHCb, co czyni je optymalne z punktu widzenia fizycznych analiz. Oszacowanie pędu na ich podstawie jest najbardziej dokładne.
- **Ślady Velo** zawierają tylko pomiary z detektora Velo w rezultacie czego nie dostarczają żadnej informacji o pędzie cząstki. Natomiast mogą być użyte np. w celu znalezienia wierzchołka pierwotnego.
- **Ślady upstream** są to ślady składające się z pomiarów dokonanych zarówno przez Velo jak i TT, natomiast nie zawierają informacji ze stacji TT. Dzieje się tak w przypadkach, kiedy cząstka wypada z obszaru akceptancji detektorów T.
- **Ślady downstream** bazują na pomiarach tylko w detektorach TT oraz stacjach T. Są wykorzystywane do rekonstrukcji neutralnych cząstek rozpadających się poza obszarem Velo.
- **Ślady T** zawierają tylko informacje ze stacji T. Taki ślad może zostać wykorzystany np. w algorytmie rozpoznawania wzorców dla detektora RICH2.

### 3.2.3. Rozpoznawania wzorców

Pierwszym etapem w procesie rekonstrukcji śladów jest algorytm rozpoznawania wzorców, który to rozpoczyna pracę od budowy segmentów śladów w detektorach VELO oraz stacjach T. Tak powstałe załączki śladów są następnie rozszerzane. Do wykonania powierzonego zadania w eksperymencie LHCb zaimplementowany kilka typów algorytmów rozpoznających wzorce, których celem jest znajdowanie śladów opisanych w podrozdziale . Poniżej znajduje się skrótowy opis każdego z nich.

- **Załączki śladów VELO** Klastry zmierzone w detektorze VELO wzdłuż linii prostych są wykorzystywane do konstruowania załączków śladów [27]. Użycie modelu linii prostej jest usprawiedliwione poprzez fakt małej amplitudy pola magnetycznego w przestrzeni zajmowanej przez VELO, co można łatwo wywnioskować z rysunku 2.2.5. Tak skontrolowane załączki śladów są używane przez następne algorytmy.
- **Załączki śladów T** są budowane przy użyciu klastrów zarejestrowanych przez IT oraz OT [28]. Następnie do każdego z nich jest dopasowywana krzywa trzeciego stopnia, przy czym współczynnik przy czynniku stopnia trzeciego jest dość niewielki, więc faktycznie dopasowuje się parabolę. Następnie zastosowane są cięcia mające na celu zwiększenie jakości otrzymanych śladów.

- **Znajdowanie śladów "do przodu"** Algorytm ten wykorzystuje załączki śladów VELO, które to stara się połączyć z pojedynczymi, zarejestrowanymi przez stacje T punktami kolizji (ang. Hit) [29]. Jeżeli tak znaleziony kandydat na ślad spełnia odpowiednie kryteria zostaje przekształcony w ślad długi. Około 90% śladów długich jest rekonstruowanych przy użyciu tego algorytmu.
- **Dopasowanie śladów** Ten algorytm na wejściu przyjmuje zarówno załączki śladów z VELO jak również ze stacji T, a następnie stara się połączyć je poprzez ekstrapolację obu segmentów do centralnej płaszczyzny magnesu. Następnym krokiem jest dodanie odpowiednich punktów oddziaływań z detektorem TT [30]. Algorytm ten rekonstruuje dodatkowe 5% długich śladów. Pozostałe 5% nie jest rekonstruowane z powodu nieefektywności oprogramowania służącego do rozpoznawania wzorców.
- **Znajdowanie śladów Up/Downstream** Ślady tego typu są budowane z załączków VELO/T jeżeli algorytm jest w stanie dopasować do nich co najmniej trzy punkty oddziaływań z detektorem TT.
- **Znajdowanie śladów VELO/T** Załączki śladów, które nie były wykorzystane przez wcześniej opisane algorytmy są zapisywane jako odpowiednio ślady VELO oraz T.
- **Eliminowanie wielokrotnionych śladów** Ślady mogą być zrekonstruowane przez więcej niż jeden z algorytmów. W celu eliminacji sklonowanych śladów stosuje się wyspecjalizowany algorytm. Klonami nazywa się dwa ślady zawierające pewien procent wspólnych punktów oddziaływania. Jeżeli dany ślad jest zbudowany z mniejszej ilości punktów interakcji zostaje odrzucony natomiast w przypadku równej liczby takich punktów wybierany jest taki, którego jakość ( bazując na  $\chi^2$  ) jest większa [31].

### 3.3. Filtr Kalmana

Procedura dopasowywanie trajektorii do śladów jest wykonana przy użyciu formalizmu filtru Kalmana. Dokładny opis procedury znajdującej zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach nauki takich jak robotyka, teoria sterowania czy przetwarzanie sygnałów można znaleźć w [32] oraz [33]. Metoda ta rozpoczyna budowę śladów od małej ilości klastrów a następnie dodaje kolejne zmierzone punkty oddziaływania w sposób rekursywny. Wynikiem takiej procedury jest ślad, sparametryzowany zgodnie z notacją opisaną w podrozdziale 3.2.3 oraz odpowiednia macierz kowariancji. W każdej iteracji punkt oddziaływania pochodzący z kolejnej płaszczyzny detektora jest dodawany oraz wektor stanu i macierz kowariancji są aktualizowane.

Ogólnie rzecz biorąc procedura nazywana filtrem Kalmana jest równoznaczna z minimalizacją  $\chi^2$ . Jednakże posiada szereg zalet w porównaniu do tej bardziej znanej metody. Główną

z nich jest fakt iż dopasowania trajektorii oraz rozpoznawanie wzorców są wykonywane przez jeden iteracyjny algorytm. Warto zwrócić uwagę, że rekursywna metoda pozwala na osiągnięcie identycznych wyników w dużo krótszym czasie. Kolejnym ważną cechą filtru Kalmana jest możliwość dodania informacji o wielokrotnych rozproszeniach czy o stratach energii.



# Rozdział 4

## Oprogramowanie

W obecnych czasach praca w eksperymencie fizyki wysokich energii nieodzownie łączy się z programowaniem. Każdy element pracy zaczynając od zbierania danych poprzez selekcja przypadków po analizę wykonywany jest poprzez napisane przez członków kolaboracji oprogramowanie. Dlatego tak ważnym elementem w pracy są umiejętności programistyczne. Poniższy rozdział ma na celu przedstawienie narzędzi używanych podczas analizy, która to jest opisywana przez niniejszą pracę magisterską.

### 4.1. Root

Root [34] jest zorientowaną obiektową platformą programistyczną (ang. framework) napisaną w języku C++ na potrzeby Fizyki Wysokich Energii rozwijana przy ośrodku CERN, oraz rozpowszechniana na licencji LGPL. Głównymi zaletami środowiska są wysoce rozwinięte biblioteki ułatwiające statystyczną analizę danych. ROOT umożliwia między innymi:

- tworzenie oraz analizę histogramów, zarówno jedno jak i wielowymiarowych,
- dopasowywania krzywych do danych przy użyciu różnych metod, między innymi metody największej wiarygodności, czy minimalizacji funkcji  $\chi^2$ ,
- bardzo wydajne, pod względem ilości zajmowanego miejsca, przechowywanie danych, w tym celu utworzone i zoptymalizowane obiekty o nazwie Ntuple,
- korzystanie z zaawansowanych operacji matematycznych np. rachunek na macierzach, czterowektorach,
- równoległe przetwarzanie danych
- prace z specjalnie stworzonym interpreterem

- wizualizację 3D
- tworzenie plików w wielu najpopularniejszych formatach graficznych typu PostScript, PNG, SVG, JPG czy GIF

## 4.2. Gaudi

Eksperyment Fizyki Wysokich Energii produkuje rocznie peta bajty danych, które muszą zostać zebrane, a następnie przeanalizowane w celu produkcji końcowych fizycznych rezultatów. Czas życia takiego eksperymentu wynosi wiele lat w związku z tym oprogramowanie rozwijane przy nim musi mieć możliwość dopasowania do zmian technologii. Drugim ważnym wymaganiem dotyczącym oprogramowania jest elastyczność, możliwość wykorzystania w wielu dziedzinach, począwszy wydobycia interesujących przypadków z tła- algorytm HLT, poprzez rekonstrukcję po analizę fizyczną. Jednym z powodów owych wymagań jest ujednolicenia całego oprogramowania używanego przez ludzi pracujących przy eksperymencie, co ułatwia zajmowanie się wieloma aspektami pracy, wystarczy jednorazowe nauczanie się zasad tworzenia oprogramowania.

Wychodząc na przeciw tym wymaganiom stworzono architekturę GAUDI[9]. Podczas tworzenia architektury została podjęta decyzja o rozdzieleniu “danych” od “algorytmów”. Poprzez dane rozumiano przykładowo składowe pędów oraz energie cząstek natomiast algorytmem może być funkcja wyliczająca masę inwariantną oraz dopasowująca odpowiednią krzywą. Algorytmy mogą tworzyć nowe typy danych. Natomiast dane dzielimy na trzy typy:

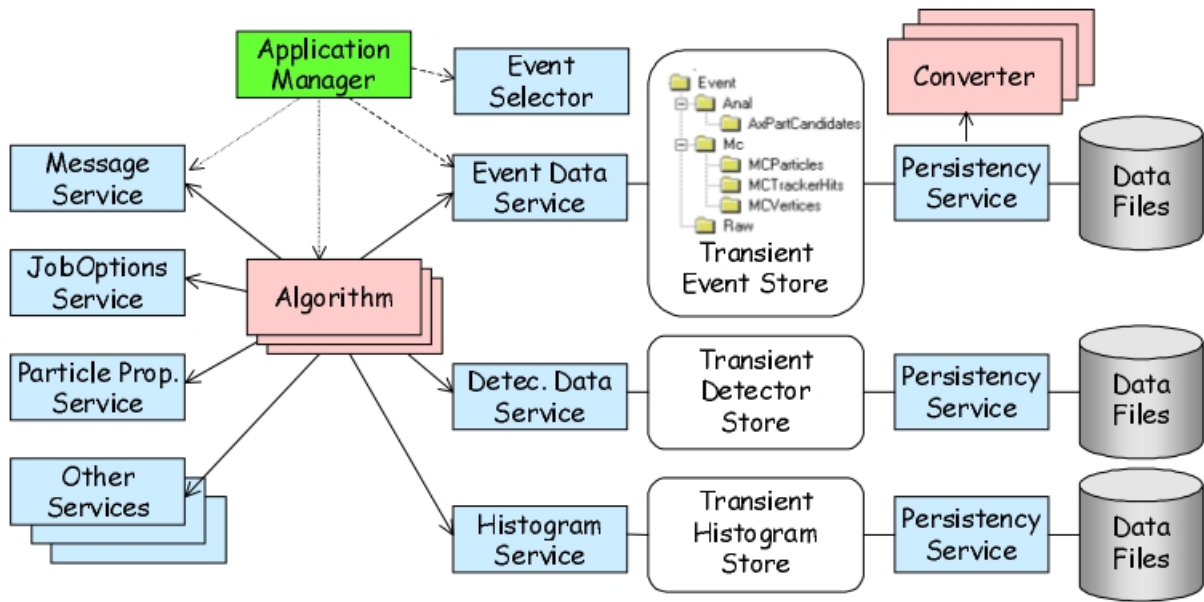
- Event data - dane otrzymane z zderzenia protonów oraz ich pochodne,
- Detector - data opisujące aparaturę detekcyjną, używane do interpretowania danych pomiarowych ( struktura, geometria, parametry środowiskowe),
- Dane statystyczne - wynik przetwarzania ww danych (histogramy, Ntuple).

Rysunek 4.2.1 przedstawia główne elementy architektury oraz ich interakcję, przy czym nie wchodzi w szczegóły dotyczące zastosowanych klas.

Dzięki swojej elastyczności GAUDI jest podstawą oprogramowania używanego w LHCb oraz ATLAS. Kod źródłowy architektury GAUDI napisany jest w języku C++ to konfiguracja wykonywane jest przy użyciu skryptów Python’owskich.

### 4.2.1. Oprogramowanie LHCb

Jak wcześniej wspomniano, większość oprogramowania używanego przez eksperyment LHCb bazuje na platformie programistycznej GAUDI. Oprogramowanie to składa się z wyspecjalizowanych aplikacji służących do symulacji, rekonstrukcji oraz analizy danych doświadczalnych.



Rys. 4.2.1. Schemat blokowy architektury GAUDI[9]

Dalsza część tego podrozdziału jest poświęcona opisowi tych aplikacji, które okazały się najważniejsze z punktu widzenia niniejszej pracy magisterskiej.

- **Gauss** używany jest do symulacji Monte Carlo. Zawiera generator przypadków, jak również pozwala przeprowadzać symulacje oddziaływania z detektorem. Zderzenia proton-proton są symulowane przy wykorzystaniu programu PYTHIA[3]. Efekty detektorowe dodawane są dzięki użyciu pakietu GEANT4.
- **Boole** jego zadaniem jest symulacja odpowiedzi detektora oraz digitalizacje danych. Format danych generowanych przez ten program jest identyczny z tym, produkowanym przez elektronikę oraz system akwizycji danych.
- **Brunel** pozwala na rekonstrukcje przypadków na poziomie subdetektorów jak również na poziomie globalnym. Więcej o procesie rekonstrukcji można znaleźć w rozdziale poświęconym rekonstrukcji śladów. Ważną cechą jest możliwość przetwarzania danych wyprodukowanych przez Boole.
- **DaVinci** jest to platforma programistyczna używana do fizycznej analizy pracująca w trybie offline. Pakiet ten jest bardzo istotny z punktu widzenia niniejszej pracy. Oprogramowanie odpowiedzialne za przetwarzanie danych, zarówno tych zebranych w trakcie pracy detektora jak i symulacji Monte Carlo, oraz tworzenie strumienia wyjściowego wykorzystywanego do dalszej analizy zostało stworzone jako część DaVinci'ego.
- **Panoramix** jest zbiorem bibliotek umożliwiających wizualizację przypadków.

### 4.3. Przetwarzanie sieciowe

Ilość danych wytwarzanych przez detektory pracujące przy LHC jest tak wielka, że musiano stworzyć nową strategię przetwarzania ich. Strategia ta nazywana jest przetwarzaniem sieciowym lub GRID'owym.

Grid dostarcza dwóch podstawowych funkcjonalności. Pierwszą z nich jest szybka dystrybucja danych pomiędzy centra przetwarzania danych umiejscowione na całym świecie. Druga natomiast związana jest z przydzielaniem zasobów systemowych w momencie uruchomienia przez użytkownika danego zadania. Dokładny opis realizacji tych zadań można znaleźć w [35]. W celu ułatwienia korzystania z rozproszonych zasobów stworzono interfejs Gaga[36].

Przygotowanie danych oraz wstępna ich analiza wykonana w ramach tej pracy magisterskiej została wykona przy użyciu przetwarzania GRID'owego. W celu uruchomienia zadania na sieci niezbędne było napisanie odpowiedniego skryptu Python'owskiego tłumaczącego opcje DaVinci'ego na te, zrozumiałe przez Gangę. Wykorzystanie rozproszonych zasobów pozwoliło na przeanalizowanie bardzo dużej ilości danych.

## Rozdział 5

# $\chi^2$ - Badanie jakości dopasowania śladów

Krytycznym punktem każdego eksperymentu fizycznego jest, poza dokonanie niezbędnych pomiarów przeanalizowanie ich. Główne metody analizy danych doświadczalnych bazują na statystyce. W większości przypadków do zebranych danych eksperymentator stara się dopasować pewien model. Dopasowywany model powinien być tak dobrany, aby możliwe było wyznaczenie pewnych, poszukiwanych parametrów.

Dlatego kluczowym elementem podczas przeprowadzania analizy danych powinna być weryfikacja otrzymanych wyników. Niska jakość dopasania modelu do danych przekłada się na fakt, iż otrzymane wyniki są mało wiarygodne. Badanie jakości daje możliwość weryfikacji poprawności wyboru danego modelu. Głównym narzędziem służącym do tego jest test  $\chi^2$ .

### 5.1. Definicja $\chi^2$

Niech próbka zawiera  $\nu$  niezależnych zmiennych  $x_i$  pochodzących z rozkładów normalnych o średnich  $\mu_i$  oraz wariancjach  $\sigma_i$ , to wielkość nazywana  $\chi^2$ <sup>9</sup> jest definiowana jako

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \frac{(x_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{(x_\nu - \mu_\nu)^2}{\sigma_\nu^2} \\ &= \sum_{i=1}^{\nu} \frac{(x_i - \mu_i)^2}{\sigma_i^2}\end{aligned}\tag{5.1.1}$$

---

<sup>9</sup>Warto zwrócić uwagę, że używana nazwa  $\chi^2$  może być myląca, gdyż jest to pojedyncza statystyczna zmienna a nie kwadrat jakiejś wielkości  $\chi$ . Notacja ta powinna być rozumiana w sensie, że wielkość ta składa się z sumy kwadratów.

W idealnym przypadku, po uwzględnieniu przypadkowych fluktuacji każdy z czynników sumy 5.1.1 powinien być rzędu jedności. Zatem przy założeniu dobrania odpowiednich wartości  $\mu_i$  oraz  $\sigma_i$  powinno się spodziewać, że obliczona wartość  $\chi^2$  powinna się zbliżać do  $\nu$ . Jeżeli tak jest, to uzasadnione jest wyciągnięcie wniosku, że dane opisane są dobrze przez wartości  $\mu_i$  czyli innymi słowami hipotetyczną funkcję. Z drugiej strony, jeżeli wartość sumy  $\chi^2$  znacznie odbiega od  $\nu$  prawdopodobnie wybrany model nie opisuje zbyt dokładnie zmierzonych danych.

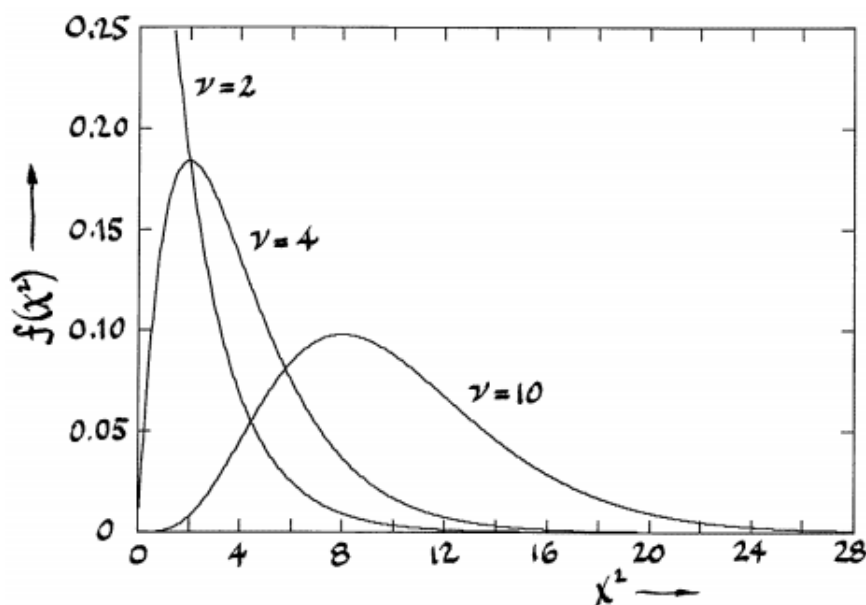
Powyżej przedstawiono ogólną idee stojącą za testem  $\chi^2$ . W następnych częściach tego rozdziału omówione jak wygląda procedura przeprowadzania takiego testu.

## 5.2. Rozkład $\chi^2$

Wielkość  $\chi^2$  zdefiniowana równaniem 5.1.1 posiada funkcję gęstości prawdopodobieństwa daną równaniem:

$$f(\chi^2) = \frac{1}{2^{0.5\nu}\Gamma(\frac{\nu}{2})} e^{-\frac{\chi^2}{2}} (\chi^2)^{\frac{\nu}{2}-1} \quad (5.2.1)$$

Funkcja przedstawiona powyżej (równanie 5.1.1) zwana jest rozkładem  $\chi^2$  o  $\nu$  stopniach swobody, przy czym  $\nu \in \mathbb{N}_+$ . Na rysunku 5.2.1 zamieszczony został ten rozkład dla kilku, wybranych stopni swobody.



Rys. 5.2.1. Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa  $\chi^2$  dla  $\nu = 2, 4, 10$ .

Warto zwrócić uwagę na wartości parametrów tego rozkładu. Średnia wartość rozkładu  $\chi_\nu^2$  wynosi  $\nu$ , natomiast wariancja jest równa  $2\nu$ . Łatwo jest również zauważyć, że rozkład ma dużą dodatnią skośność, która to zmienia się wraz z wartością parametru  $\nu$ , stając coraz mniejszą dla

coraz to większych wartości ilości stopni swobody. Fakt ten wynika z centralnego twierdzenia granicznego.

### 5.3. Sposób wykorzystania testu $\chi^2$ do badania jakości dopasowania

Niech próbka pomiarowa składa się z  $N$  pomiarów eksperymentalnych pewnych wielkości  $x_i$ . Eksperymentator chce sprawdzić, czy dane te są dobrze opisane przez zbiór hipotetycznych wartości  $\mu_i$ . W tym celu formułuje sumę zgodnie z równaniem 5.1.1. Warto zwrócić uwagę, iż bardzo istotnym faktem, po za samym pomiarem jest wyznaczenie niezależnie dla każdego pomiaru niepewności  $\sigma_i$ .

Powtarzając ten eksperyment wiele razy oraz za każdym razem konstruując sumę  $\chi^2$  doświadczałnik powinien spodziewać się, o ile model którego używa jest prawidłowy, że rozkład sum będzie się zachowywał zgodnie z równaniem 5.2.1. W tym momencie warto być ostrożnym, ponieważ ilość stopni swobody nie musi być, i zazwyczaj nie jest równa ilości punktów pomiarowych. Ilość stopni swobody jest równa ilości punktów pomiarowych pomniejszona o ilość estymowanych parametrów modelu.

Metody statystyczne nie są w stanie odpowiedzieć na pytanie czy dany model jest poprawny czy nie. Może, natomiast podać odpowiedź na pytanie w jakim przedziale istotności  $\alpha$  wybrany przez eksperymentatora model dobrze opisuje zbiór danych pomiarowych. Z matematycznego punktu widzenia przedział istotności opisany jest równaniem:

$$\alpha = \int_{\chi^2_{\nu,\alpha}}^{\infty} f(\chi^2) d\chi^2 \quad (5.3.1)$$

Z praktycznego punktu widzenia w celu weryfikacji hipotezy o poprawności danego modelu trzeba najpierw obliczyć wartość znormalizowanej sumy  $\chi^2/\nu$  a następnie porównać ją z wartością  $\chi^2_{\nu,\alpha}/\nu$ . Jeżeli otrzymana wartość jest większa może to oznaczać:

- wybrany model niedostatecznie opisuje dane doświadczalne,
- model jest prawidłowy zaszło zdarzenie statystycznie mało prawdopodobne.

Warto zwrócić uwagę na pewne założenie dotyczące rozkładu zmiennych losowych. Cała idea sumy  $\chi^2$  bazuje na założeniu o rozkładzie Gaussa. W związku z tym pewne punkty pomiarowe znacząco odbiegające od rozkładu normalnego mogą znacząco podnieść wartość sumy.

Drugim, skrajnym przypadkiem są "dane za dobre". Taka sytuacja może być spowodowana przykładowo złą estymacją wartości  $\sigma_i$ . Warto zapamiętać, że zbyt mała wartość nie jest związana ze niską jakością modelu opisującego dane, taki model może tylko podnosić wartość sumy  $\chi^2$ .

# Podsumowanie



# Bibliografia

- [1] KMfitter group. URL <http://ckmfitter.in2p3.fr/>.
- [2] <http://public.web.cern.ch>.
- [3] Torbjörn Sjöstrand, Stephen Mrenna, and Peter Z. Skands. PYTHIA 6.4 Physics and Manual. *JHEP*, 05:026, 2006. URL <http://www.slac.stanford.edu/spires/find/hep/www?key=6566170&FORMAT=WWWBRIEFBIBTEX>.
- [4] LHCb Collaboration. *LHCb VELO (VERtex LOCator): Technical Design Report*. Technical Design Report LHCb. CERN, Geneva, 2001.
- [5] S Löchner and M Schmelling. The beetle reference manual - chip version 1.3, 1.4 and 1.5. Technical Report LHCb-2005-105. CERN-LHCb-2005-105, CERN, Geneva, Nov 2006.
- [6] Aras Papadelis, MHM Merk, and E Jans. *Characterisation and commissioning of the LHCb VELO detector*. oai:cds.cern.ch:1186697. PhD thesis, Amsterdam, VU University, Amsterdam, 2009. Presented on 17 Jun 2009.
- [7] <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Collaboration/LHCbEvDis.html>.
- [8] E Rodrigues. Tracking definitions. Technical Report LHCb-2007-006. CERN-LHCb-2007-006, CERN, Geneva, Feb 2007. revised version submitted on 2007-03-28 09:34:37.
- [9] G Barrand, I Belyaev, P Binko, M Cattaneo, R Chytrcek, G Corti, M Frank, G Gracia, J Harvey, Eric Van Herwijnen, B Jost, I Last, P Maley, P Mato, S Probst, F Ranjard, and A Yu Tsaregorodtsev. Gaudi: The software architecture and framework for building lhcb data processing applications. oai:cds.cern.ch:467678. 2000.
- [10] B.E. Schwarzbach and Y. Kosmann-Schwarzbach. *The Noether Theorems: Invariance and Conservation Laws in the Twentieth Century*. 2010.
- [11] W.M. Gibson and B.R. Pollard. *Symmetry Principles Particle Physics*.

- [12] P.D. Naselsky, D.I. Novikov, and I.D. Novikov. *The Physics of the Cosmic Microwave Background*.
- [13] A.D. Sakharov. Violation of CP Invariance, c Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe. *Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz.*, 5:32–35, 1967. doi: 10.1070/PU1991v034n05ABEH002497.
- [14] DELPHI Collaboration. A precise measurement of the Z resonance parameters through its hadronic decays. *Phys. Lett. B*, 241(CERN-EP-90-32):435–448. 21 p, Mar 1990.
- [15] Lincoln Wolfenstein. Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix. *Phys.Rev.Lett.*, 51:1945, 1983. doi: 10.1103/PhysRevLett.51.1945.
- [16] D. Perkins. *Introduction to High Energy Physics*. Addison-Wesley, Reading, USA, 1982.
- [17] J. Beringer et al. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 86:010001, 2012.
- [18] Tatsuya Nakada. Review on CP violation. *AIP Conf.Proc.*, 302:425–463, 1994.
- [19] G Haefeli. *Contribution to the development of the acquisition electronics for the LHCb experiment*. oai:cds.cern.ch:800810. PhD thesis, EPFL Lausanne, Geneva, 2004.
- [20] The ATLAS Collaboration. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. *Journal of Instrumentation*, 3(08):S08003, August 2008.
- [21] CMS Collaboration. The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3:S08004, 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [22] ALICE Collaboration. The ALICE experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3, 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08002.
- [23] LHCb Collaboration. *LHCb magnet: Technical Design Report*. Technical Design Report LHCb. CERN, Geneva, 2000.
- [24] Aras Papadelis, MHM Merk, and E Jans. *Characterisation and commissioning of the LHCb VELO detector*. oai:cds.cern.ch:1186697. PhD thesis, Amsterdam, VU University, Amsterdam, 2009. Presented on 17 Jun 2009.
- [25] M Adinolfi, G Aglieri Rinella, E Albrecht, T Bellunato, S Benson, C Blake, and (... ). Performance of the lhcb rich detector at the lhc. Technical Report arXiv:1211.6759. CERN-LHCb-DP-2012-003. LHCb-DP-2012-003, CERN, Geneva, Nov 2012.
- [26] K Nakamura and Particle Data Group. Review of particle physics. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 37(7A):075021, 2010. URL <http://stacks.iop.org/0954-3899/37/i=7A/a=075021>.

- [27] T Lastoviicka. Generic VELO Pattern Recognition. Technical Report LHCb-2007-002. CERN-LHCb-2007-002, CERN, Geneva, Feb 2008.
- [28] R W Forty and M Needham. Standalone Track Reconstruction in the T-stations. Technical Report LHCb-2007-022. CERN-LHCb-2007-022, CERN, Geneva, Mar 2007.
- [29] O Callot and S Hansmann-Menzemer. The Forward Tracking: Algorithm and Performance Studies. Technical Report LHCb-2007-015. CERN-LHCb-2007-015, CERN, Geneva, May 2007.
- [30] M Needham. Performance of the Track Matching. Technical Report LHCb-2007-129. CERN-LHCb-2007-129, CERN, Geneva, Oct 2007.
- [31] E Rodrigues. Dealing with clones in the tracking. Technical Report LHCb-2006-057. CERN-LHCb-2006-057, CERN, Geneva, Nov 2006.
- [32] Rudolph Emil Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 82(Series D):35–45, 1960.
- [33] R. Fruhwirth. Application of Kalman filtering to track and vertex fitting. *Nucl.Instrum.Meth.*, 1987.
- [34] R. Brun and F. Rademakers. ROOT: An object oriented data analysis framework. *Nucl.Instrum.Meth.*, A389, 1997.
- [35] L Arrabito, V Bernardoff, D Bouvet, M Cattaneo, P Charpentier, P Clarke, J Closier, P Franchini, R Graciani, E Lanciotti, V Mendez, S Perazzini, R Nandkumar, D Remenska, S Roiser, V Romanovskiy, R Santinelli, F Stagni, A Tsaregorodtsev, M Ubeda Garcia, A Vedaee, and A Zhelezov. Major changes to the LHCb Grid computing model in year 2 of LHC data. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 396:032092. 8 p, 2012.
- [36] Ulrik Egede. Ganga and distributed analysis in the LHCb. Oct 2006.