

**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 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. Podstawy teoretyczne eksperymentu 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
<b>2. Eksperyment LHCb</b>	<b>20</b>
2.1. Akcelerator LHC	20
2.2. Detektor LHCb	22
2.2.1. Magnes zakrzywiający	26
2.2.2. VELO	27
2.2.2.1. Sensory krzemowe	27
2.2.2.2. Elektronika odczytu	28
2.2.2.3. Przetwarzanie danych	29
2.2.3. Detektory Czerenkowa	29
2.2.4. Detektory śladowe	30
2.2.5. Kalorymetry	31
2.2.6. Komory mionowe	32
2.2.7. System wyzwalań	32



<b>3. Rekonstrukcja śladów</b>	<b>34</b>
<b>4. Oprogramowanie</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Root</b> . . . . .	35
4.1.1. RooFit . . . . .	36
<b>4.2. Gaudi</b> . . . . .	36
<b>4.3. Da Vinci</b> . . . . .	37
<b>Podsumowanie</b>	<b>38</b>
<b>Literatura</b> . . . . .	39

## Spis rysunków

1.3.1.Działanie operatorów C, P i CP na neutrino . . . . .	15
1.3.2.Artystyczne wizualizacja łamania symetrii <b>CP</b> . Sprzężenie ładunkowe zostało zaprezentowane jako zamiana kolorów, natomiast symetria C jako odbicie lustrzane. Można zauważyć, że rysunek oryginalny oraz ten po dwukrotnym przekształceniu nieznacznie się różnią. Różnica da obrazuje łamanie symetrii <b>CP</b> CP . . . . .	16
1.3.3.Trójkąt unitarności, kąty $\phi_{1,2,3}$ . . . . .	18
1.3.4.Trójkąt unitarności, kąty $\phi_{1,2,3}$ . . . . .	19
2.1.1.Schemat kompleksu przyspieszającego akceleratora LHC. [1] . . . . .	21
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 . . . . .	22
2.2.2.Wykres korelacji pomiędzy kątem polarnym a ilością produkowanych kwarków b w zderzeniu proton-proton. Symulacja została wykonana przy użyciu programu Pythia [1] . . . . .	23
2.2.3.Detektor LHCb w całej okazałości [1] . . . . .	24
2.2.4.Wizualizacja parametru zderzenia, będącego najmniejszą odległością od wierzchołka pierwotnego do śladu. Parametr zderzenia został oznaczony czerwoną linią. . . . .	25
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. . . . .	26
2.2.6.Schemat detektora VELO[?] . . . . .	27
2.2.7.Geometria sensorów [?] . . . . .	28
2.2.8.Schemat blokowy czipu Beetle[?] . . . . .	28
2.2.9.Ścieżka odczytowa pomiędzy kanałami VELO a płytą TELL1[?] . . . . .	29

2.2.10	Schemat detektora RHICH1 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 [1] . . . . .	30
2.2.11	Schemat detektor TT [1] . . . . .	31
2.2.12	Schemat detektorów T1-T3[1] . . . . .	31
2.2.13	Wizualizacja przypadku zdarzenia w detektorze LHCb[2] . . . . .	33
4.2.1.	Schemat blokowy architektury GAUDI[?] . . . . .	37

Wstęp

# Rozdział 1

## Podstawy teoretyczne eksperymentu LHCb

Ten rozdział pokrótce opisuje teoretyczne podstawy stojące za eksperymentem LHCb. Na samym początku omówiona zostaje fundamentalna zasada fizyki łącząca zasady zachowania z symetriami. Następnie opisane zostają podstawowe 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 pokazuje, że jeśli układ fizyczny jest niezmienniczy<sup>1</sup> względem ciągłej transformacji, oznacza istnienie zachowanie pewnej wielkości. Niezmienniczość praw fizycznych względem translacji czasowej jest odpowiedzialna za istnienie zasady zachowania energii. Zasada zachowania pędu, pochodzi natomiast od niezmienniczości względem przesunięć w przestrzeni. Natomiast zasada zachowania momentu pędu jest zachowana gdy prawa fizyki są identyczne po zastosowaniu obrotów w przestrzeni.

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

- **C**- sprzężenie ładunkowe (ang. charge conjugation) zmienia znak wszystkich addytywnych numerów kwantowych. W specyficznym odniesieniu do rozpadów sub-atomowych cząstek, sprzężenie ładunkowe oznacza zamianę każdej cząstki na sprzężoną z nią antycząstkę.
- **P**- parzystość (ang. parity) jest to operacja odwrócenia jednej z trzech przestrzennych osi.

---

<sup>1</sup>w znaczeniu Lagranżjan opisujący ten układ

- **T** odwrócenie czasu (ang. time reversal) zmienia kierunek ruchu przez odbicie w czasie osi.

Według obecnej wiedzy, każda z tych symetrii jest zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych. Natomiast, co bardziej interesujące, słabe siły łamią symetrie **C** oraz **P**. Jednakże, kombinacja tych symetrii **CPT** jest dokładną symetrią w każdej lokalnej Lorentz'owskiej teorii pola.

## 1.2. Symetrie a początek Wszechświata

W przybliżeniu po okresie  $10^{-6}s$  do Wielkiego Wybuchu została uformowana plazma gluonowo-kwarkowa 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 pozostają widzialne pamiątki nazywane Mikrofalowym Promieniowaniem Tła (ang. **C**osmic **M**icrowave **B**ackground). Na podstawie badań tego promieniowania oszacowano wiek Wszechświata na  $13.75 \pm 0.11$  miliarda lat.

Niedługo, po tym jak CMB zostało wytworzone jedna liczb kwantowych *liczba barionowa* została złamana, powodując, że więcej cząstek było produkowanych niż antycząstek. Ten proces nazywany *bariogenezą* tłumaczy niewystępowanie antymaterii oraz to, że dzisiejszy wszechświat zbudowany jest z materii.

W 1967 Sacharow wyjaśnił, że powodem dla którego we Wszechświecie brak jest antymaterii 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**

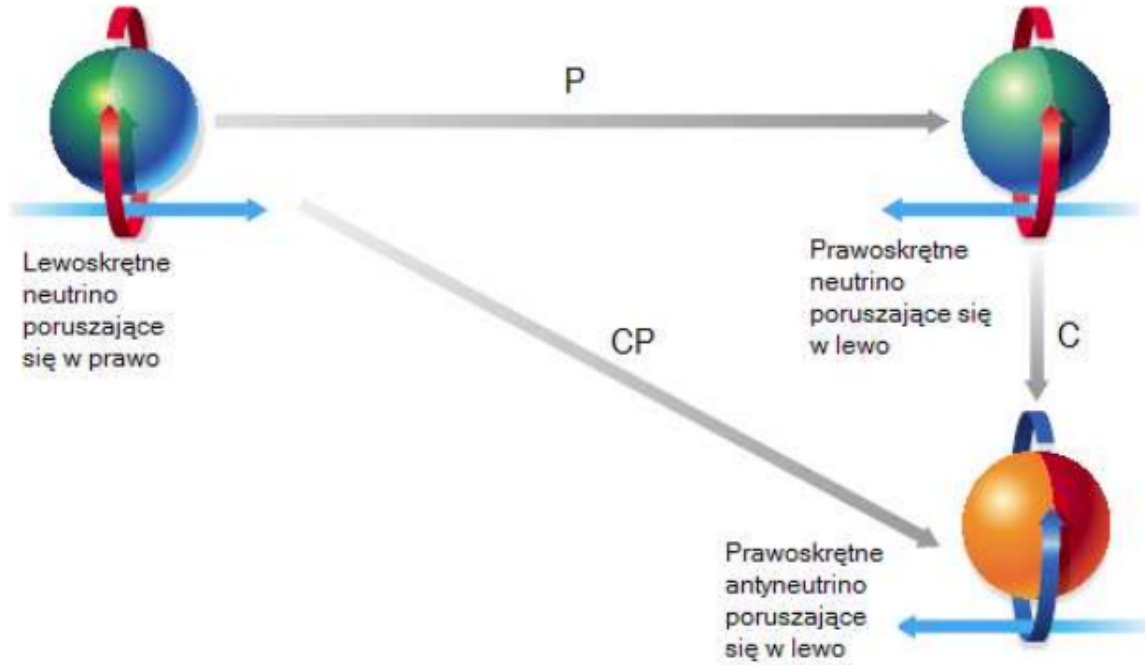
## 1.3. Symetria kombinowana CP

Symetria kombinowana **CP**, będąca jak wcześniej 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> neutrin i prawoskrętnych antyneutrino. Wynikiem zastosowania operatora **CP**<sup>3</sup> na neutrino lewoskrętne jest antyneutrino prawoskrętne. Stąd sądzono,

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

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

że ta symetria jest zachowana przez oddziaływania słabe, obrazowo działania tych operatorów zostały zaprezentowane na rysunku 1.3.2.



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

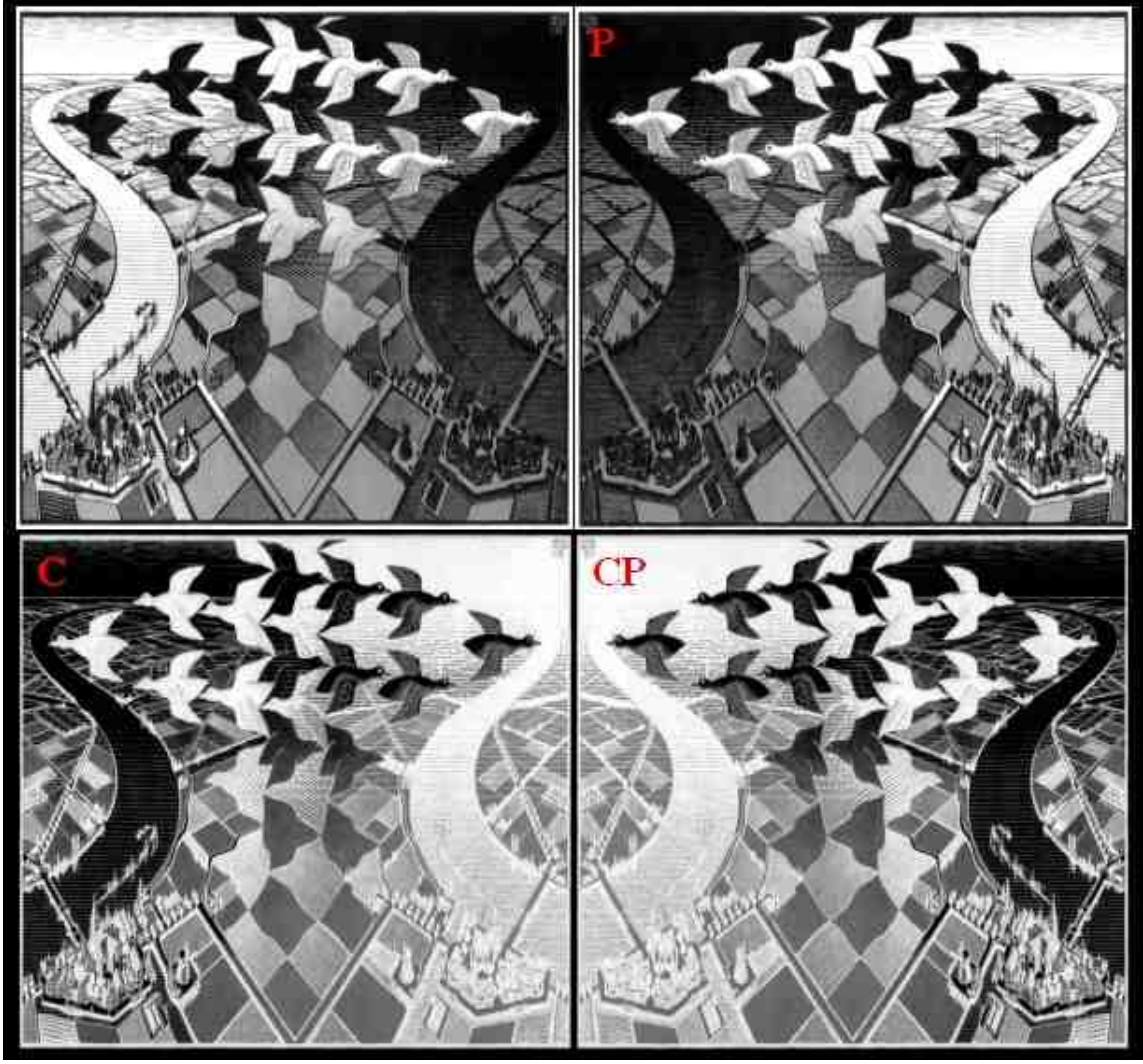
Tak było do roku 1964, kiedy to w rozpad neutralnych kaonów pokazał, że ta symetria jednak jest łamana (więcej informacji ref ). Pierwszym dowodem na łamanie  $CP$  poza układem kaonów, był zaobserwowany w 2001 roku przez kolaborację eksperymentu Belle. Badali oni układ neutralnych mezonów  $B$ <sup>4</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(ref) oraz BaBar(ref). LHCb jest eksperymentem drugiej generacji. Właściwości eksperymentu, które będą omówione w następnym rozdziale, pozwalają na poszukiwania łamania  $CP$  w sektorze mezonów  $B_s$  oraz zjawisk Nowej Fizyki.

### 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-Kobayashiego-Maskawy

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

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



**Rys. 1.3.2.** Artystyczna wizualizacja łamania symetrii **CP**. Sprzężenie ładunkowe zostało zaprezentowane jako zamiana kolorów, natomiast symetria **C** jako odbicie lustrzane. Można zauważyć, że rysunek oryginalny oraz ten po dwukrotnym przekształceniu nieznacznie się różnią. Różnica obrazuje łamanie symetrii **CP**

(CKM).

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

Macierz CKM jest 3x3 macierzą unitarną. Za rozmiar macierzy odpowiada ilość rodzin kwarkowych. Zostało udowodnione<sup>6</sup>, że istnieją tylko 3 rodziny. Elementy macierzy określają sprzężenie pomiędzy odpowiednimi kwarkami. Warto zwrócić uwagę, że Model Standardowy w żaden sposób nie przewiduje wartości wyrazów z macierzy CKM. Wartości te należy wyznaczyć doświadczalnie. Wiele parametryzacji było zaproponowanych w literaturze. Do najbardziej

<sup>6</sup>na podstawie pomiarów astronomicznych oraz niezależnie eksperymentu LEP



popularnych należy parametryzacja Keung-Chau, zwana również standardowa parametryzacją.

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

gdzie:

$c_{ij} = \cos\theta_{ij}$  oraz  $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ . Wartość wyrażenia jest znaczenie kąta  $\theta_{ij}$  oraz  $\delta$ .  $\theta_{ij}$  są to 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 Wolfenstein (tu ref). Każdy z elementów macierzy CKM jest wyrażany przez szereg potęgowy parametru  $\lambda = \sin\theta_{12} \approx 0.22$ .

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

Pozostałe parametry występujące w równaniu 1.3.3 określone są zależnościami:

$$A \equiv \frac{s_{23}}{s_{12}^2}, \quad \rho \equiv \frac{s_{13}\cos\delta}{s_{12}s_{23}}, \quad \eta \equiv \frac{s_{13}\sin\delta}{s_{12}s_{23}}$$

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.

### 1.3.2. Trójkąty unitarności

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

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

---

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

Powyższy fakt implikuje sześć warunków ortogonalności.

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

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

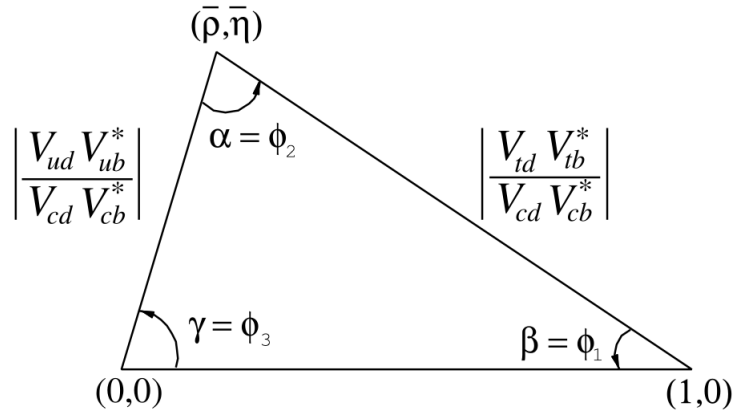
$$ds : V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* = 0 \quad (1.3.7)$$

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

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

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

Każdy z nich implikuje 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 posiadają jednakowe pole, które można wyrazić w używając notacji parametryzacji Wolfensteina  $P = \lambda^6 A^2 \eta$  jednakże różnią się kształtem. 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. 1.3.3.** Trójkąt unitarności, kąty  $\phi_{1,2,3}$

są ekwiwalentem do kątów  $\alpha, \beta, \gamma$  w notacji używanej przez eksperyment BELLE. Dolny bok trójkąta posiada jednostkową długość jest to zgodne z przyjętą konwencją.

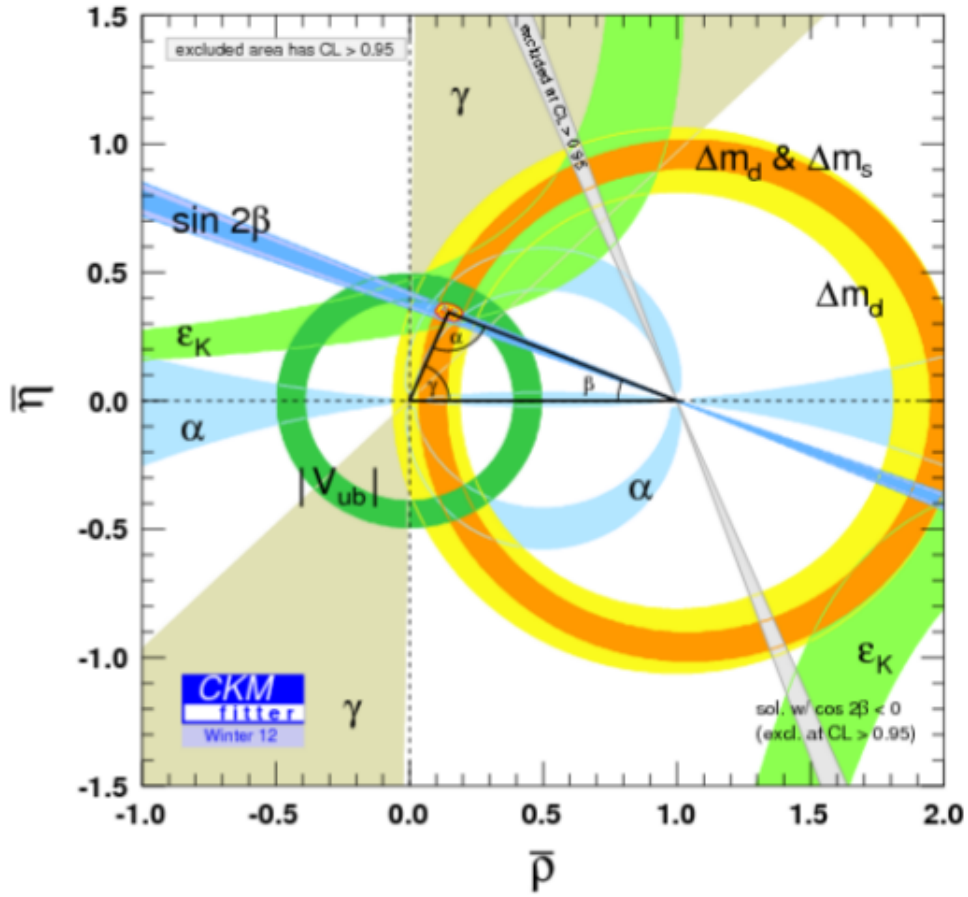
Z eksperymentalnego punktu widzenia, najciekawszym trójkątem jest (db), ponieważ jego boki są porównywalnych rozmiarów co oznacza, że wszystkie kąty (bądź odpowiadające im fazy) są duże. Rysunek 1.3.3 przedstawia ten trójkąt. Użyto standardowego oznaczenia kątów  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , te trzy kąty odnoszą się do zespolonych komponentów macierzy CKM przez związki:

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

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

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

Wiele różnych rozpadów mezonów B oraz D można użyć do ograniczania przedziału dostępności dla kątów. Rysunek przedstawia



**Rys. 1.3.4.** Trójkąt unitarności, kąty  $\phi_{1,2,3}$

są ekwiwalentem do kątów  $\alpha, \beta, \gamma$  w notacji używanej przez eksperyment BELLE. Dolny bok trójkąta posiada jednostkową długość jest to zgodne z przyjętą konwencją.

Kusi mnie dodanie podrozdziału o typach łamania symetrii i mieszaniu ogólnie.

# Rozdział 2

## Eksperyment LHCb

Badania opisywane w niniejszej pracy zostały wykonane w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych (CERN) pod Genewą. Laboratorium zostało założone w 1954 roku i zrzeszało 12 Europejskich krajów. Wartą odnotowania data jest 1 lipca 1991 roku, kiedy to Polska stała się pełnoprawnym członkiem CERN. Międzynarodowa kolaboracja była i jest jedynym sensownym rozwiązaniem problemów ze zwiększającymi się wymaganiami co do złożoności oraz kosztów prowadzenia eksperymentów fizyki wysokich energii.

Analizowane pomiary zostały przeprowadzone przy użyciu akceleratora zwanego Wielkim Zderzaczem Hadronów (ang. Large Hadron Collider) oraz eksperymentu LHCb. Rozdział ten ma na celu dać krótkie wprowadzenie do zagadnień związanych z eksperymentem w k pracach którego, autor bierze czynny udział.

### 2.1. Akcelerator LHC

LHC jest największym, działającym akceleratorem na świecie zaprojektowanym do zderzania protonów o całkowitej energii środka masy  $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ . Poza samą energią wiązki ważnym parametrem związanym z pracą akceleratora jest świetlność ( $L$ ). Wielkość ta określa ile zaszło zderzeń cząstek, kiedy dwie wiązki zderzyły się ze sobą. Co więcej liczba ta jest ściśle związana z ilością zderzeń na sekundę oraz przekrojem czynnym:

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

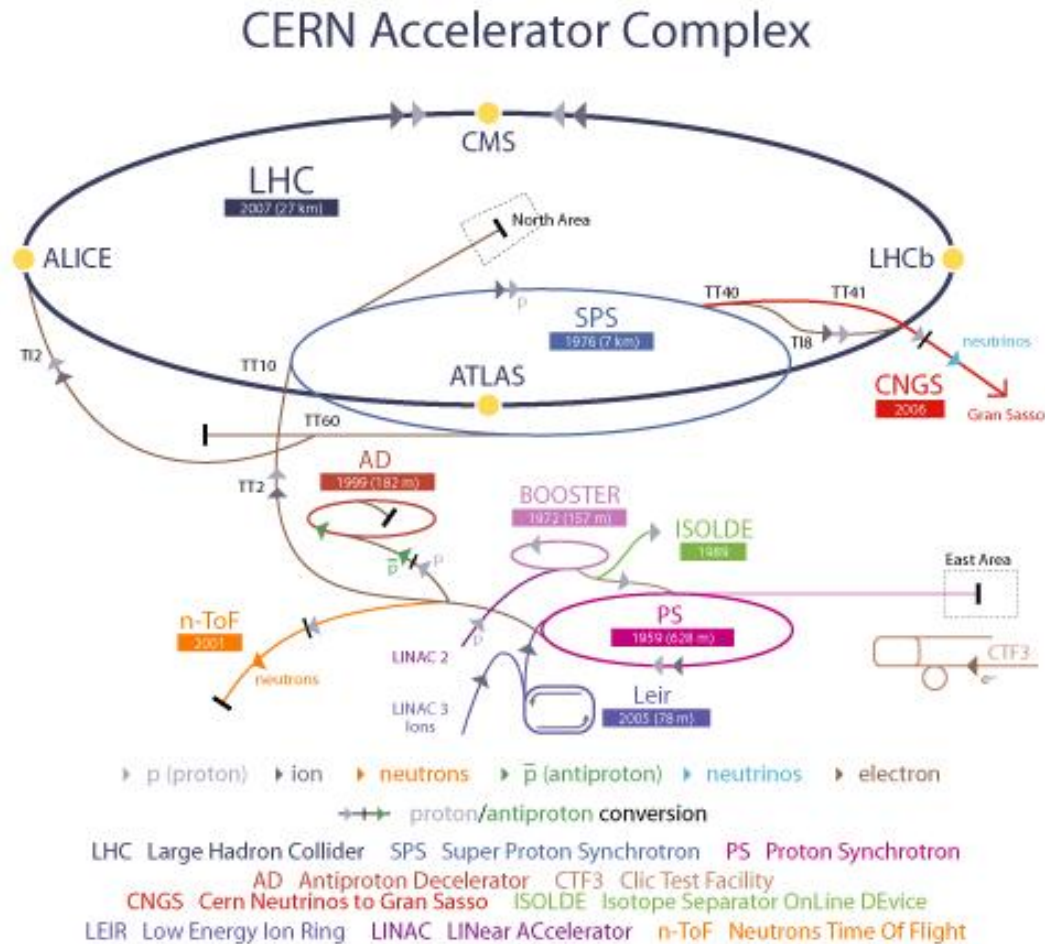
Ilość zebranych danych można otrzymać całkując chwilową świetlność:

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

Otrzymana wielkość posiada jednostkę odwrotności pola, zwaną również barnem. Eksperymenty ATLAS oraz CMS (opisane poniżej) mogą pracować z maksymalną osiągalną świetlnością przez

$LHC-\mathcal{L} = 10^{34} cm^{-2}s^{-1}$ , natomiast LHCb dla swoich potrzeb redukuje światłość w celu zmniejszenia ilości wielokrotnych zderzeń na wiązkę.

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



Rys. 2.1.1. Schemat kompleksu przyspieszającego akceleratora LHC. [1]

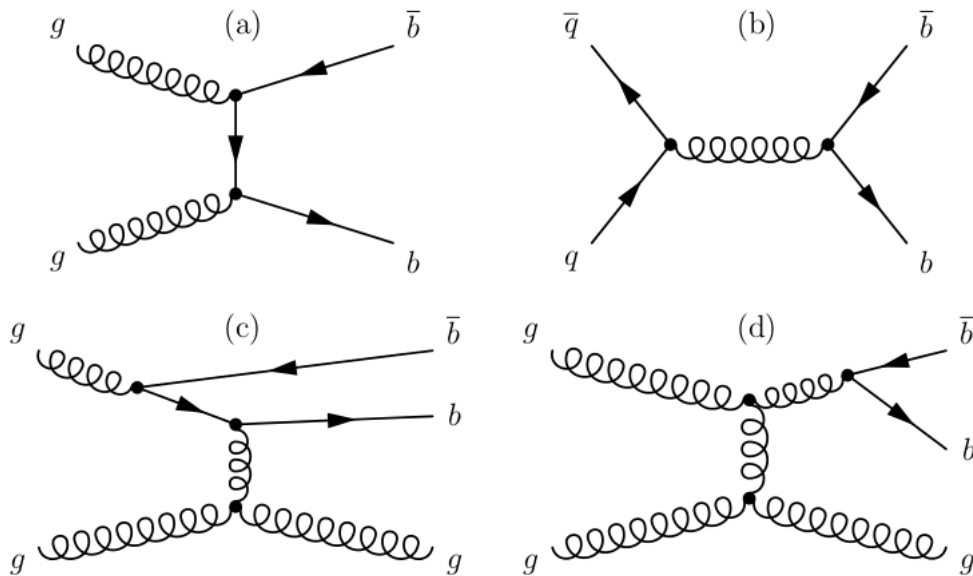
Na rysunku 2.1.1 pokazany jest schemat kompleksu przyspieszającego oraz detektorów pracujących przy eksperymencie LHC. Sam proces przyspieszania jest kilku stopniowy[? ]. Na początku protony otrzymywane są w wyniku jonizacji atomów wodoru po czym wstępnie przyspieszane w akceleratorze liniowym (LINIAC2)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

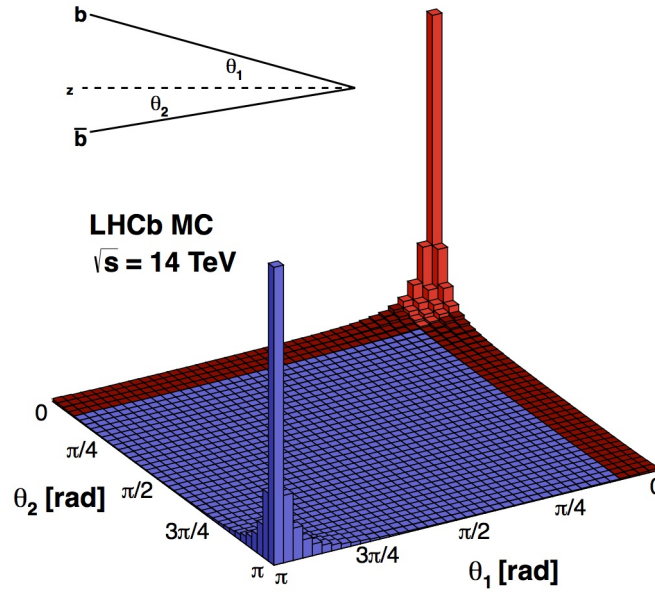
Głównymi celami eksperymentów ATLAS (ang. A Toroidal Lhc ApparatuS)[?] oraz CMS (ang. Compact Muon Solenoid) [?] jest poszukiwanie bozonu Higgsa, cząstki która wg Modelu Standardowego odpowiada za nadawanie masy, oraz sprawdzenie teorii supersymetrii (SUSY). ALICE (ang. A Large Ion Collider Experiment)[?]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

## 2.2. Detektor LHCb

Eksperyment oraz stowarzyszony z nim detektor LHCb został zaprojektowany do badania łamania symetrii kombinowanej  $\mathbf{CP}$  oraz rzadkich procesów obficie produkujących hadrony zawierające kwarki b. Jako przykład można podać mezon B. Produkcja pary  $b\bar{b}$  będąca wynikiem zderzenia proton-proton jest zdominowana przez procesy fuzyjne gluonów i partonów, diagram Feynmana opisujący takie procesy został umieszczony na rysunku 2.2.1. Symulacje takich procesów pokazały, że przy energiach osiąganych dzięki LHC, zarazem kwarki b oraz  $\bar{b}$  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



**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 [1]

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

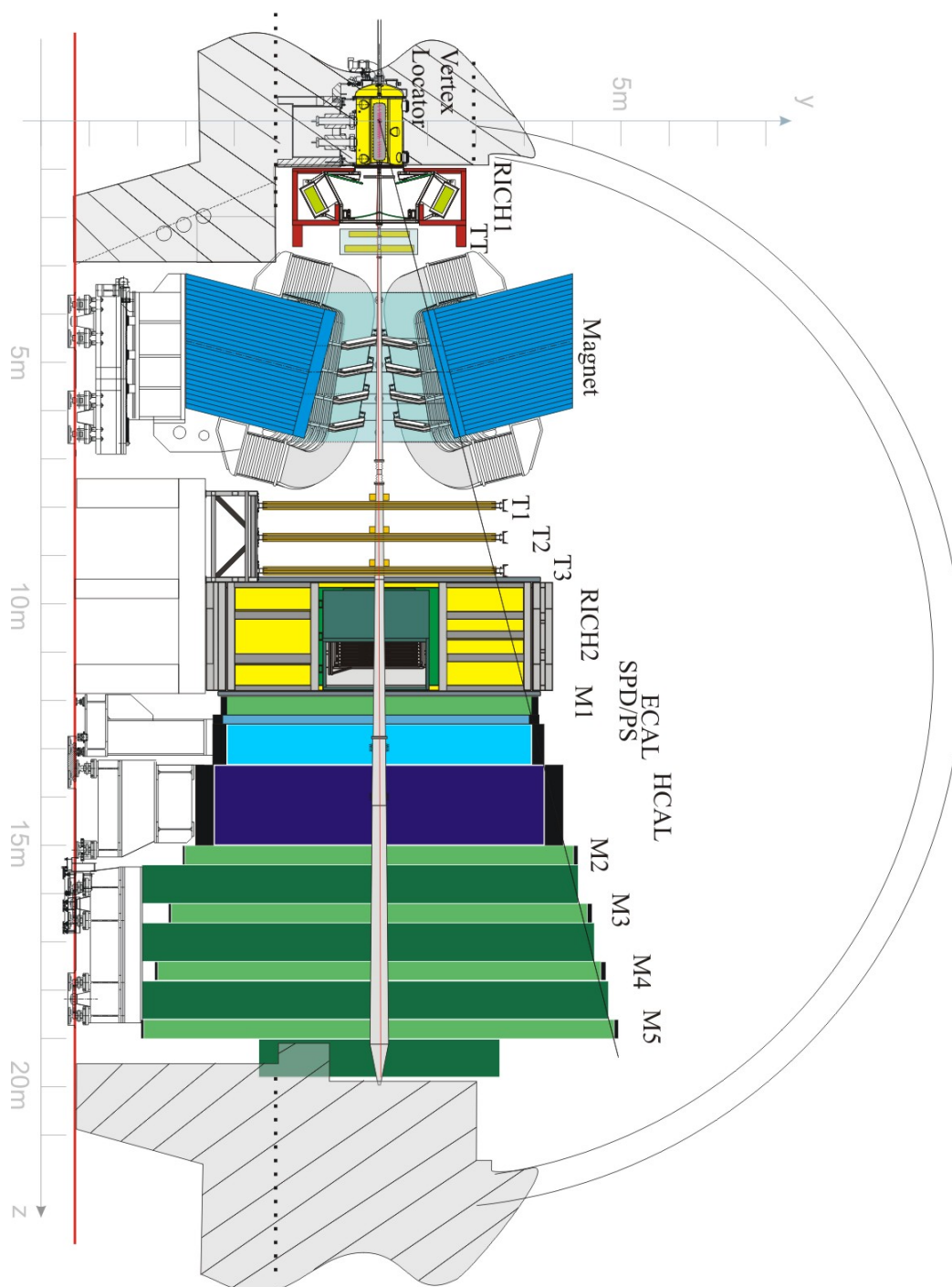
$1.7 < \eta < 5.3$ . Przy czym pseudorapidity,  $\eta$  jest zdefiniowana jako

$$\eta = -\ln \left( \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.2.1)$$

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

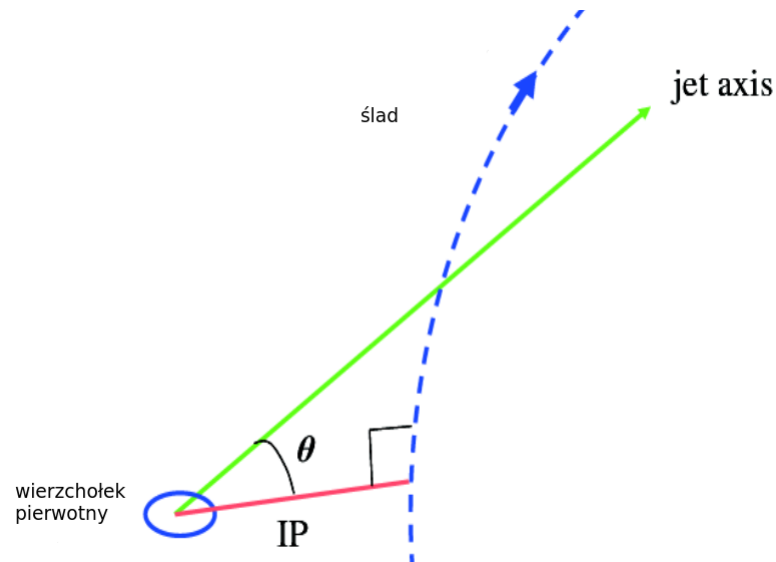
Zamieszczony na rysunku 2.2.3 spektrometr LHCb składa się z szeregu systemów detekcyjnych. Te systemy detekcyjne są podzielone na trzy główne grupy. Pierwsza z nich służy do rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych. Informacja o śladach niezbędna jest do wyznaczania trzech komponentów pędów cząstek. 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 ostatni 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 przecięcia wiązek mikropaskowego, krzemowego detektora zwanego VELO (ang. VErtext LOcator) który, bardzo dużą precyzją, mierzy pozycję pierwotnego wierzchołka oraz parametr zderzenia (ang. Impact Parameter), wizualizacja parametru zderzenia znajduje się na rysunku 2.2.4.



Rys. 2.2.3. Detektor LHCB w całej okazałości [1]





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

Następnym, po detektorze VELO, jest umiejscowiony przed magnesem zakrzywiającym detektor TT. Podobnie jak wcześniej wspomniany VELO, TT również został wykonany w technologii mikropaskowych detektorów krzemowych. Zadaniem jego jest zwiększenie rozdzielczości estymowanego pędu cząstek oraz odrzucanie par śladów, które są stowarzyszone z tą samą cząstką. Pole magnetyczne wytwarzane przez magnes dipolowy zakrzywia trajektorię ruchu cząstek w płaszczyźnie x-z, co umożliwia wyznaczenie ich pędu poprzez porównywanie zakrzywienia 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, używają zróżnicowanej techniki do detekcji cząstek. 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 świetną rozdzielczością przestrzenną (mierząc jedną lub dwie składowe). To wszystko osiągnięte jest przy jednoczesnej minimalizacji kosztów materiałowych.

- **Identyfikacja cząstek:** System identyfikacji cząstek używa dwóch praw fizyki w celu wykonania swojego zadania. Dwa detektory RHICH (ang. Ring Imaging Cherenkov detector) bazują fakcie, iż cząstka lecąc przez określony materiał emitują światło pod odpowiednim kątem. 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

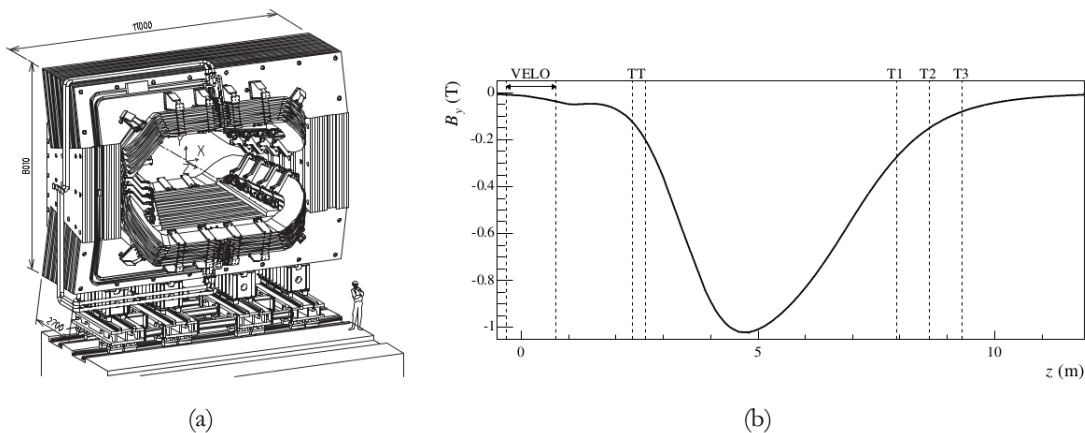
systemie detekcyjnym LHCb jest układ detektorów mionowych. Układ ten, jak sama nazwa wskazuje, jest wykorzystywany do identyfikacji mionów. Jego stacje (od M1 do M5) rejestrują cząstki, które przemierzyły całą długość detektora LHCb oraz metalowe tarcze umiejscowioną pomiędzy stacjami mionowymi nienaruszone. Tylko miony, z naładowanych cząstek, posiadają takie własności.

- **System wyzwalania:** Ilość informacji, otrzymywanych w wyniku zderzeń protonów jest tak dużo, że nie istnieje możliwość ich zapisania. Co więcej wiele ze zdarzeń z punktu widzenia późniejszych analiz fizycznych są kompletnie bez znaczenia. W celu eliminacji zapisu na dyski nieciekawych przypadków kolaboracja LHCb zdecydowała się na zaimplementowanie trzystopniowego systemu wyzwalania. Pierwszym poziom, zwany LO, bazuje na bezpośredniej sprzętowej implementacji. Następne dwa stopnie, HLT1 oraz HLT2(ang. High Level Trigger) są programami wykonującymi równoległe algorytmy, rekonstruują zdarzenie a następnie decydują czy jest interesujące i warto zapisać na dysk czy nie.

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

### 2.2.1. Magnes zakrzywiający

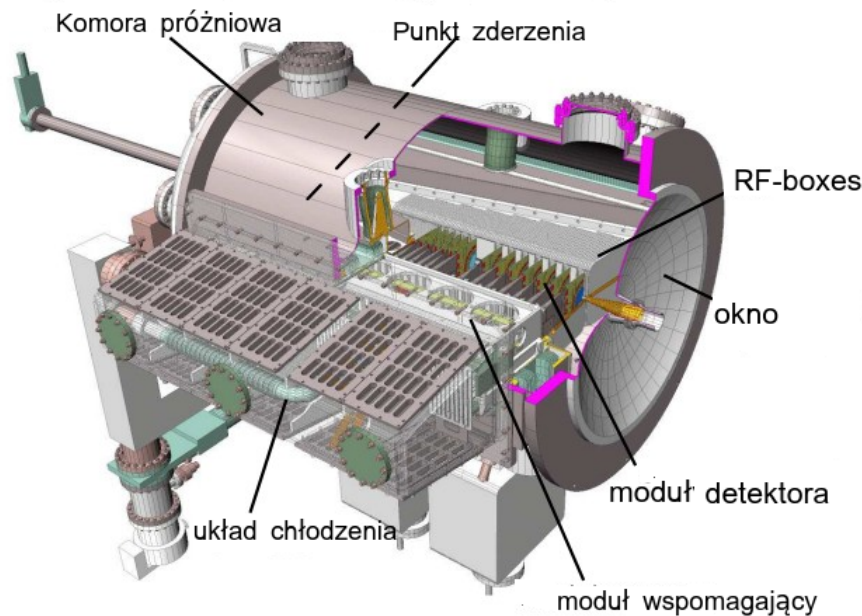
Jednym z najważniejszych elementów systemu znajdowania śladów cząstek naładowanych jest dipolowy magnes, który zakrzywia trajektorie cząstek, co daje możliwość estymowania pędu. Składa się z dwóch identycznych, aluminiowych, jednocześnie nie będących w stanie nadprzewodnictwa cewek umiejscowionych symetrycznie w około osi wiązki. 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 wierzchołka zderzenia oraz wtórnego powstającego w wyniku rozpadu mezonu  $B_{(s)}^0$  oraz  $D_{(s)}^0$  [? ]. Obszar detekcji znajduje się już 8 mm od osi wiązki. W celu kontroli skutków efektów radiacyjnych układ stale utrzymywany jest w obniżonej temperaturze [? ]. Pomiary dokonywane przez detektor są wykorzystywane również przez tryger wysokiego poziomu (HLT).

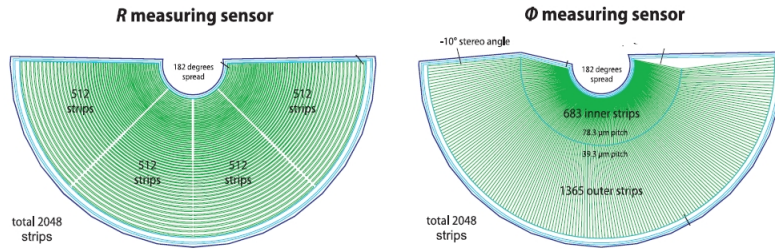


Rys. 2.2.6. Schemat detektora VELO[? ]

#### 2.2.2.1. Sensory krzemowe

Pozycjo-czułe elementy VELO składa 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 odległości radialnej  $R$ , drugie mierzą składową azymutalną  $\Phi$ . Każdy sensor zawiera 2048 kanałów pomiarowych.

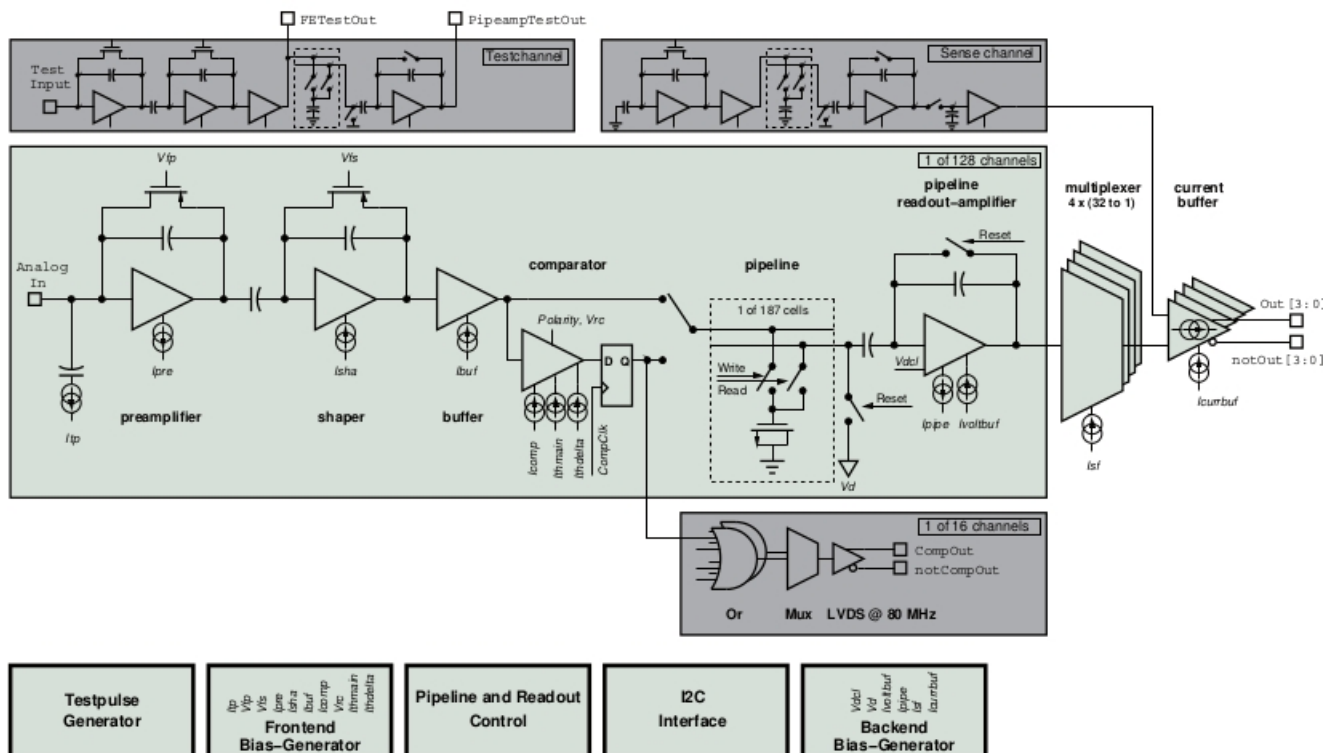
Na 2.2.7 przedstawiona jest różnica w geometrii. Paski w sensorach typu  $R$  są półokrągłe, współśrodkowe podzielone na 4 segmenty. Natomiast sensory  $\Phi$  dzielą się radialnie na dwie części- zewnętrzną (638 pasków) oraz wewnętrzną (1365 pasków), przy czym paski w każdej z części posiadają kąty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



Rys. 2.2.7. Geometria sensorów [? ]

### 2.2.2.2. Elektronika odczytu

Beetle reprezentuje typ układów elektroniki front-end. Jest to ASIC (ang. Application Specific Integrated Circuit) czyli dedykowany układ scalony mający za zadanie odczyt oraz kształtowanie impulsów zarejestrowanych przez sensory VELO. Na 2.2.8 został przedstawiony schemat blokowy układu Beetle.

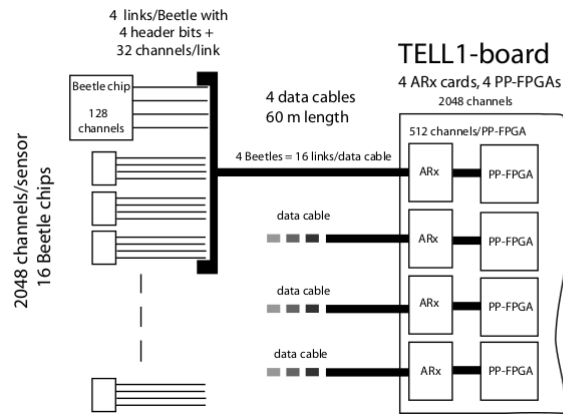


Rys. 2.2.8. Schemat blokowy czipu Beetle[? ]

Układ odczytuje 128 kanały VELO. Zbiór prądowych oraz napięciowych przedwzmacniaczy oraz kształtowników wykorzystywany jest do optymalizacji parametrów impulsu. Po ukształtowaniu impuls jest próbkowany a następnie w postaci analogowej przechowywany przez  $4\mu s$  w linii opóźniającej (ang. pipeline) w oczekiwaniu na decyzję systemu wyzwalania. Po akceptacji przez L0 dane przesyłane są do czterech kanałów analogowych. Każdy port wysyła dane z 32 fizycznych sensorów poprzedzone czterema pseudo-cyfrowymi nagłówkami.

### 2.2.2.3. Przetwarzanie danych

Sygnały wyjściowe z układu Beetle przesyłane są przy pomocy 60 m kabli analogowych, w celu dalszej obróbki, do elektronicznych płyt akwizycyjnych TELL1 [? ]. Przy użyciu których sygnały są digitalizowane z 10 bitową precyzją a następnie przetwarzane przez układy FPGA (ang. Field Programmable Gate Arrays).



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

### 2.2.3. Detektory Czerenkowa

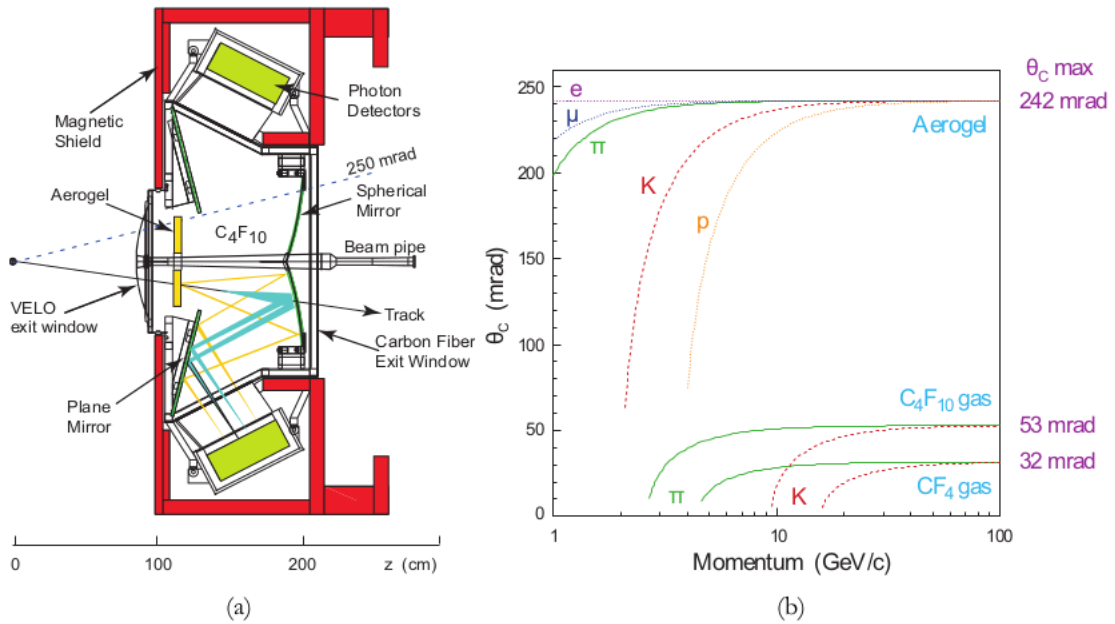
RICH (ang. Ring Imaging Cherenkov detector) jest detektorem promieniowania Czerenkowa wykorzystywanym do identyfikacji hadronów. W szczególności wydajna separacja pionów oraz kaonów jest niezbędna przy badaniu rozpadów mezonów  $B_{(s)}^0$  oraz  $D_{(s)}^0$ . W spektrometrze LHCb zamontowano dwa detektory RICH. Pierwszy z nich (RICH1), umieszczony zaraz za VELO, jest zoptymalizowany dla nisko pędowych cząstek o pędzie w przedziale  $\sim 1 - 60 GeV/c$ . Drugi (RICH2), położony za magnesem, służy do identyfikacji cząstek o dużych pędach ( $\sim 15 - 100 GeV/c$ ) [? ]. Zasada działania wyżej wymienionych detektorów jest oparta na procesie emisji promieniowania Czerenkowa. 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

$$\cos\theta = \frac{c}{nv} \quad (2.2.2)$$

gdzie:

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

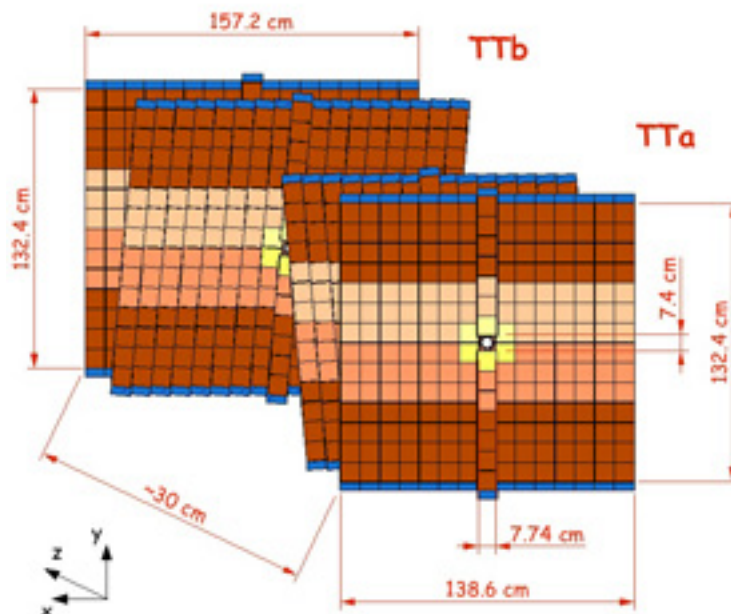
pomiar promienia charakterystycznego pierścienia, który tworzy. RICH1 znajduje się zaraz za detektorem wierzchołka, przed magnesem dipolowym. Radiatorem w nim jest aerogel ( $n = 1,03$ ), który umożliwia identyfikację kaonów dla przedziału pędów sięgających  $2 \text{ GeV}/c$  oraz odróżnienie pionów 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 hybrydowych 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  $C_4F_{10}$ (a). Rozkład kątów Czerenkowa w zależności od pędu cząstek emitujących. Rysunki pochodzą z [1]

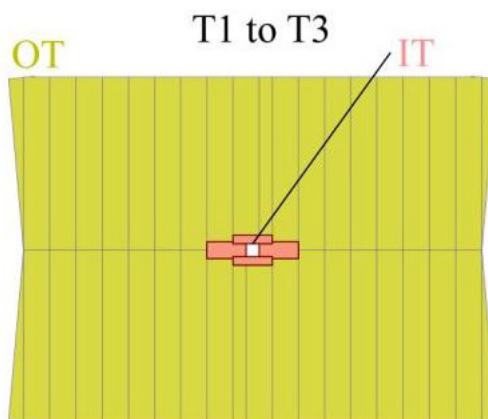
## 2.2.4. Detektory śladowe

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 oraz komory mionowe). Ze względu na temat pracy, bezpośrednio związany z detektorem VELO, zostanie on dokładnie opisany w rozdziale 2.2.2. 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



Rys. 2.2.11. Schemat detektor TT [1]

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 którym oczekiwane jest największa ilość cząstek, natomiast OT(ang. Outer Tracker) jest gazowym detektorem słomkowym.



Rys. 2.2.12. Schemat detektorów T1-T3[1]

### 2.2.5. Kalorymetry

Zadaniem kalorymetrów jest identyfikacja fotonów, elektronów i hadronów oraz pomiar ich energii. Są wykorzystywane również w algorytmie systemu wyzwalania. System dzieli się na kilka 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.
- HCAL (ang. Hadronic CALorimeter) używany do pomiaru energii hadronów.

### 2.2.6. Komory mionowe

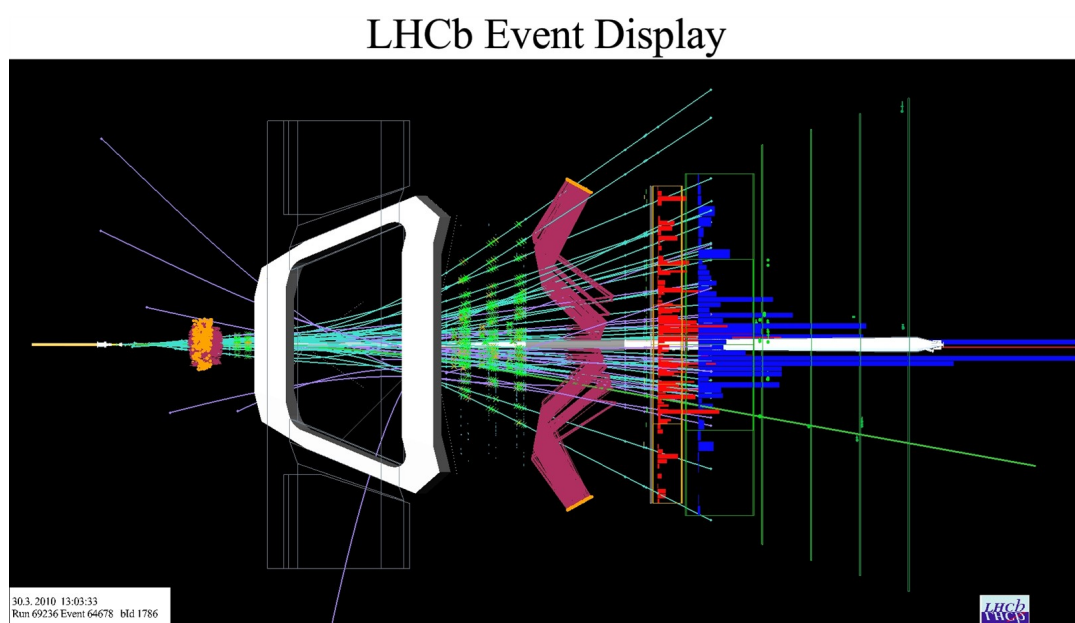
Identyfikacja mionów jest fundamentalnym wyzwaniem eksperymentu LHCb ponieważ cząstki te są stanami końcowymi powstającymi w wyniku rozpadów mezonów  $B_{(s)}^0$  oraz  $D_{(s)}^0$ . Miony, słabo oddziaływające z materią, są jedynymi cząstkami które przechodzą przez system kalorymetrów. Układ detektorów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

### 2.2.7. System wyzwalania

Częstotliwość przecinania się wiązek protonowych wynosi 40MHz, co w przybliżeniu odpowiada strumieniowi danych 40TB/s. W celu ograniczenia strumienia danych 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. Wykorzystuje on w procesie dokonywania decyzji 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 inne detektory śladowe. Na tej podstawie wybiera się przypadki fizyczne, które zapisywane są na dysku.





**Rys. 2.2.13.** Wizualizacja przypadku zdarzenia w detektorze LHCb[2]

## Rozdział 3

### Rekonstrukcja śladów

# 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. Ponadto pokrótce przedstawione będą techniki tworzenia oprogramowania, na których autor starał się oprzeć swoje badania.

Rozdział ten zaczyna się od przedstawienia dwóch języków programowania, w których napisano oprogramowanie będące integralną częścią pracy magisterskiej. Następnie przedstawione będą narzędzia programistyczne używane przez kolaboracje LHCb, wykorzystane w analizie.

### 4.1. Root

Root [?] 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 bardzo 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

#### 4.1.1. RooFit

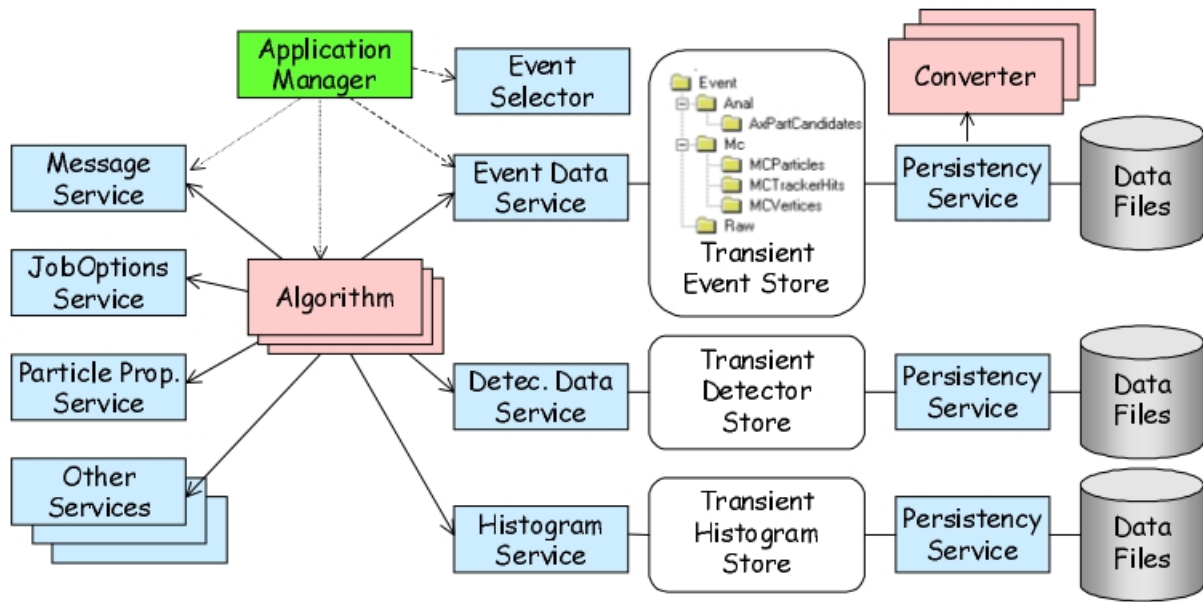
Napisać o rooficie z manuala

### 4.2. Gaudi

Eksperyment Fizyki Wysokich Energii produkuje rocznie peta bajty danych, które muszą zostać zrekonstruowane, a następnie zanalizowane 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 wydobywania interesujących przypadków z tła- algorytm HLT, poprzez rekonstrukcję po analizę fizyczną. Jednym z powodów owych wymagań jest ujednolicenie 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[? ]. 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).



Rys. 4.2.1. Schemat blokowy architektury GAUDI[? ]

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. Mimo iż kod GAUDI'ego napisany jest w języku C++ to konfiguracja wykonywane jest przy użyciu skryptów Python'owskich.

## 4.3. Da Vinci

# Podsumowanie

# Bibliografia

- [1] <http://public.web.cern.ch>.
- [2] <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Collaboration/LHCbEvDis.html>.