

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

Wstęp	12
1. Eksperyment LHCb	13
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
2. Eksperyment LHCb	21
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	31
2.2.6. Komory mionowe	32
2.2.7. System wyzwalań	34

3. Rekonstrukcja śladów	35
3.1. Oddziaływanie cząstek z materią	35
3.1.1. Oddziaływania elektromagnetyczne	35
3.1.2. Oddziaływania hadronowe	36
4. Oprogramowanie	37
4.1. Root	37
4.2. Gaudi	38
4.2.1. Oprogramowanie LHCb	39
4.3. Przetwarzanie sieciowe	40
4.4. System kontroli wersji	40
4.5. Programowanie zwinne	40
Podsumowanie	41
Literatura	42

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 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
4.2.1	Schemat blokowy architektury GAUDI[8]	39

Wstęp

Rozdział 1

Eksperyment LHCb

Ten rozdział opisuje pokrótce eksperyment LHCb. Na samym początku omówione zostaje 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 [9] pokazuje, że jeśli układ fizyczny jest niezmienniczy¹ względem pewnej ciągłej transformacji, to istnienie prawo zachowania stowarzyszonej z tą transformacją wielkości. Niezmienniczość praw fizycznych względem translacji czasowej jest odpowiedzialne 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.[10].
- \hat{P} - parzystość (ang. parity) jest to operacja zamiany wszystkich współrzędnych przestrzennych na przeciwne. [10]

¹rozumiemy tu Lagranżjan opisujący ten układ

- \hat{T} odwrócenie czasu (ang. time reversal) zmienia kierunek przepływu czasu na przeciwny [10].

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 [10].

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 ± 0.11 miliarda lat [11].

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 [12], że aby istniał Wszechświat w obecnej formie wymagane jest spełnienie trzech warunków.

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

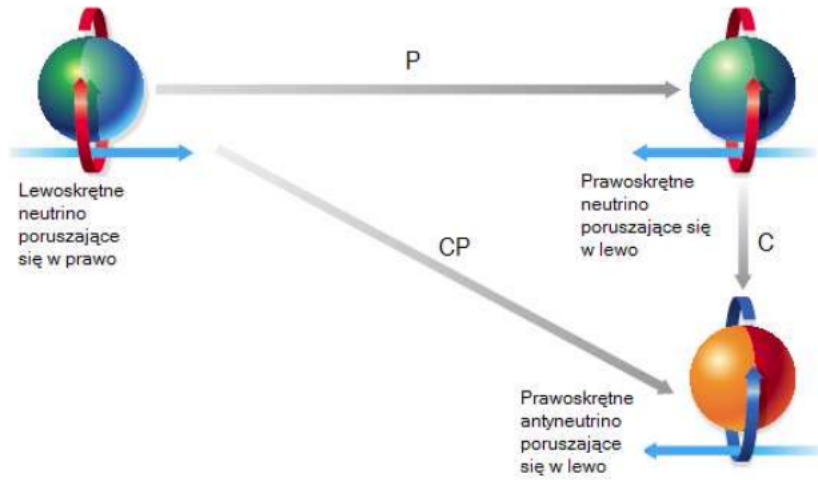
1.3. Symetria kombinowana CP

Symetria kombinowana **CP**, będąca jak uprzednio wspomniano jednym z warunków Sacharowa do tego, aby istniał wszechświat, była poddana obserwacji już wcześniej. Powodem tego było odkrycie istnienia tylko lewoskrętnych² neutrin i prawoskrętnych antyneutrino. Wynikiem zastosowania operatora **CP**³ na neutrino lewoskrętne jest antyneutrino prawoskrętne.

²Skrętność oznacza rzut wektora spinu na kierunek ruchu cząstki

³Operatory **C** oraz **P** komutują ze sobą nawzajem

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^4 . 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 silnych⁵. Przejście z jednej bazy do drugiej możliwe jest dzięki macierzy Cabbibo-Kobayashiego-Maskawy (CKM).

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

Macierz CKM jest macierzą unitarną trzeciego rzędu. Rozmiar macierzy odpowiada ilość rodzin kwarkowych. Zostało udowodnione⁶, że istnieją tylko 3 rodziny. Elementy macierzy okre-

⁴Mezon B to hadron składający się z kwarka b oraz lżejszego antykwarka

⁵zwane również stanami własnymi masy

⁶na podstawie pomiarów astronomicznych oraz niezależnie eksperymentu DELPHI[13]

śląją 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 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 $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$. Warto wyjaśnienie jest znaczenie kąta θ_{ij} oraz δ . θ_{ij} są to tzw. kąty Eulera⁷ mówiące o stopniu mieszania pomiędzy trzema zapachami kwarków ($i,j=1,2,3$) oraz δ jest fazą odpowiedzialną za łamanie symetrii **CP**.

Ważną, z punktu widzenia hierarchizacji wielkości mieszanie pomiędzy rodzinami kwarkowymi jest tak zwana parametryzacja Wolfensteina [14]. Każdy z elementów macierzy CKM jest wyrażany przez szereg potęgowy parametru $\lambda = \sin\theta_{12} \approx 0.22$. Kąt θ_{12} zwany jest kątem Cabibbo [15].

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

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 λ 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.

⁷Układ 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.

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

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

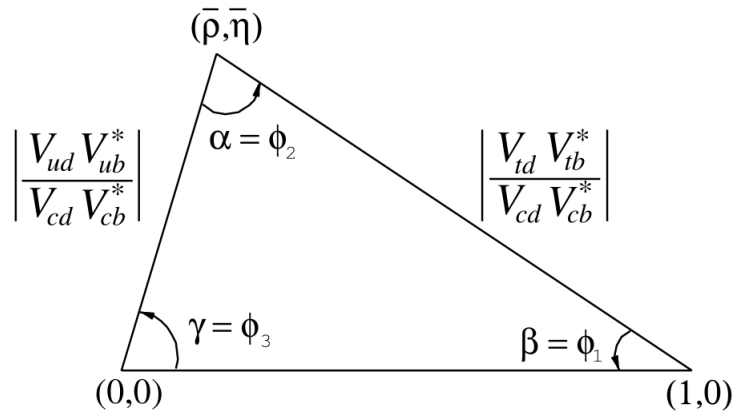
$$ds : V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* = 0 \quad (1.3.7)$$

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

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

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

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 α, β, γ w notacji używanej przez eksperyment BELLE. Dolny bok trójkąta posiada jednostkową długość jest to zgodne z przyjętą konwencją. [16]

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

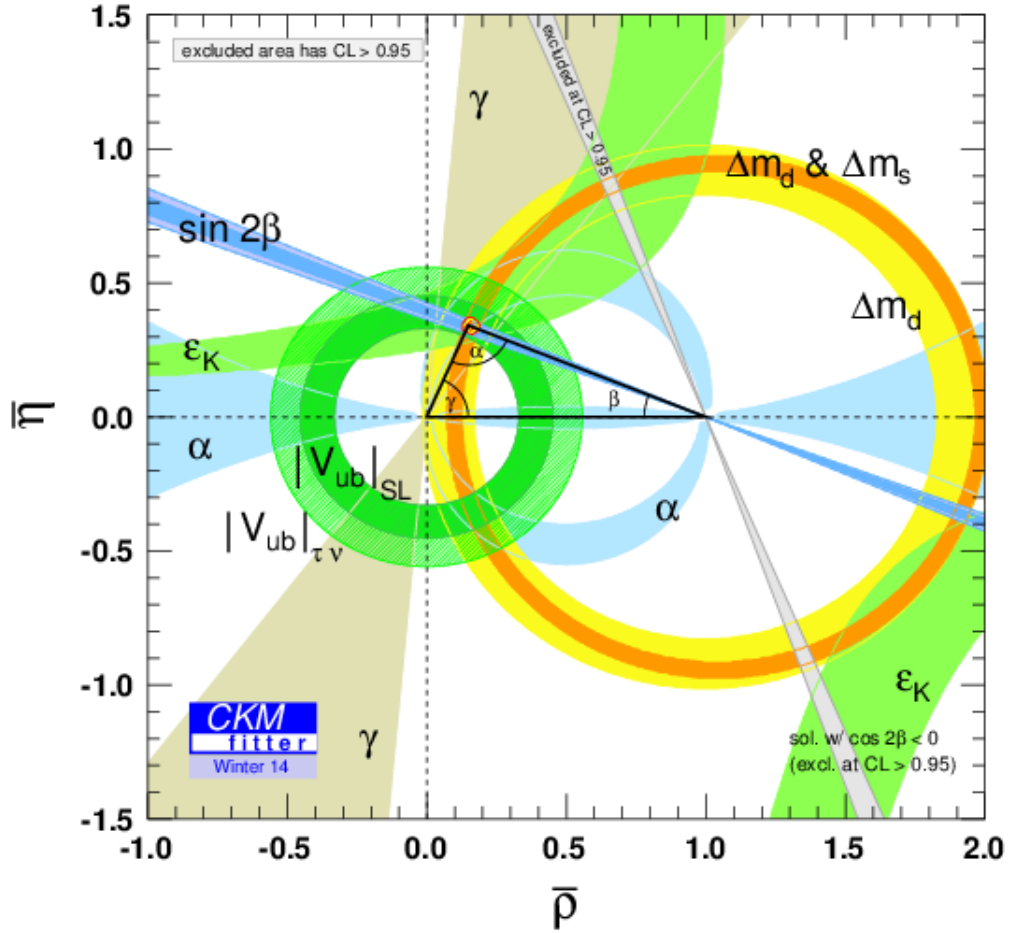
fazy) są duże. Rysunek 1.3.2 przedstawia ten trójkąt. Użyto standardowego oznaczenia kątów (α, β, γ) , te trzy kąty odnoszą się do zespolonych komponentów macierzy CKM przez związki:

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

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

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

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 [16]. 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.

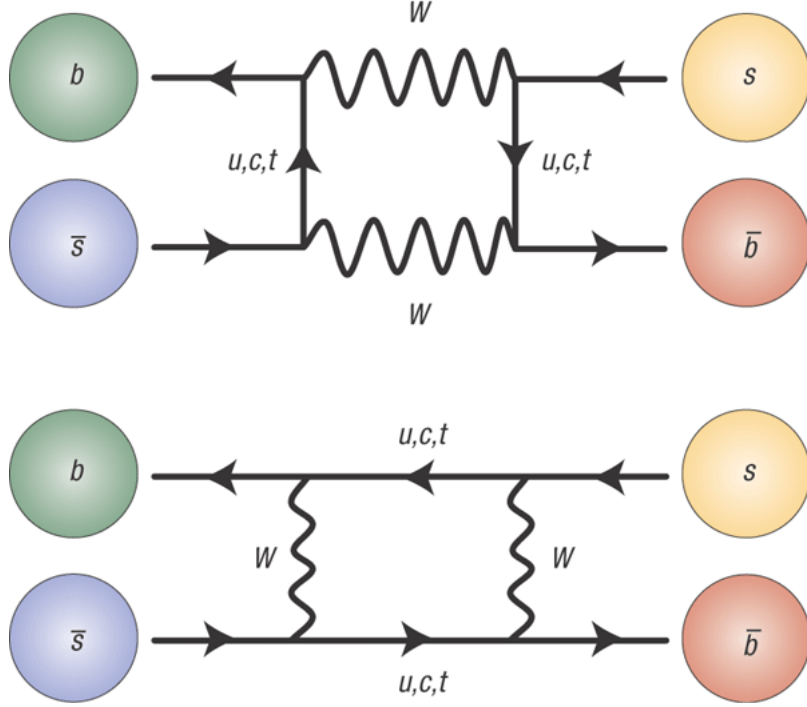
$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} p(t) \\ q(t) \end{pmatrix} = \hat{\mathcal{H}} \begin{pmatrix} p(t) \\ q(t) \end{pmatrix} = (\mathbf{M} - \frac{i}{2}\Gamma) \begin{pmatrix} p(t) \\ q(t) \end{pmatrix} \quad (1.3.16)$$

gdzie $\hat{\mathcal{H}}$ - hamiltonian, \mathbf{M} oraz γ 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 [17]. W niniejszej pracy przytoczone zostanie tylko ostateczny wynik.

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

Łamaniem symetrii CP zachodzi gdy $|\frac{p}{q}| \neq 1$. Analizując równanie 1.3.17 można wnioskować, 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 η_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:

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

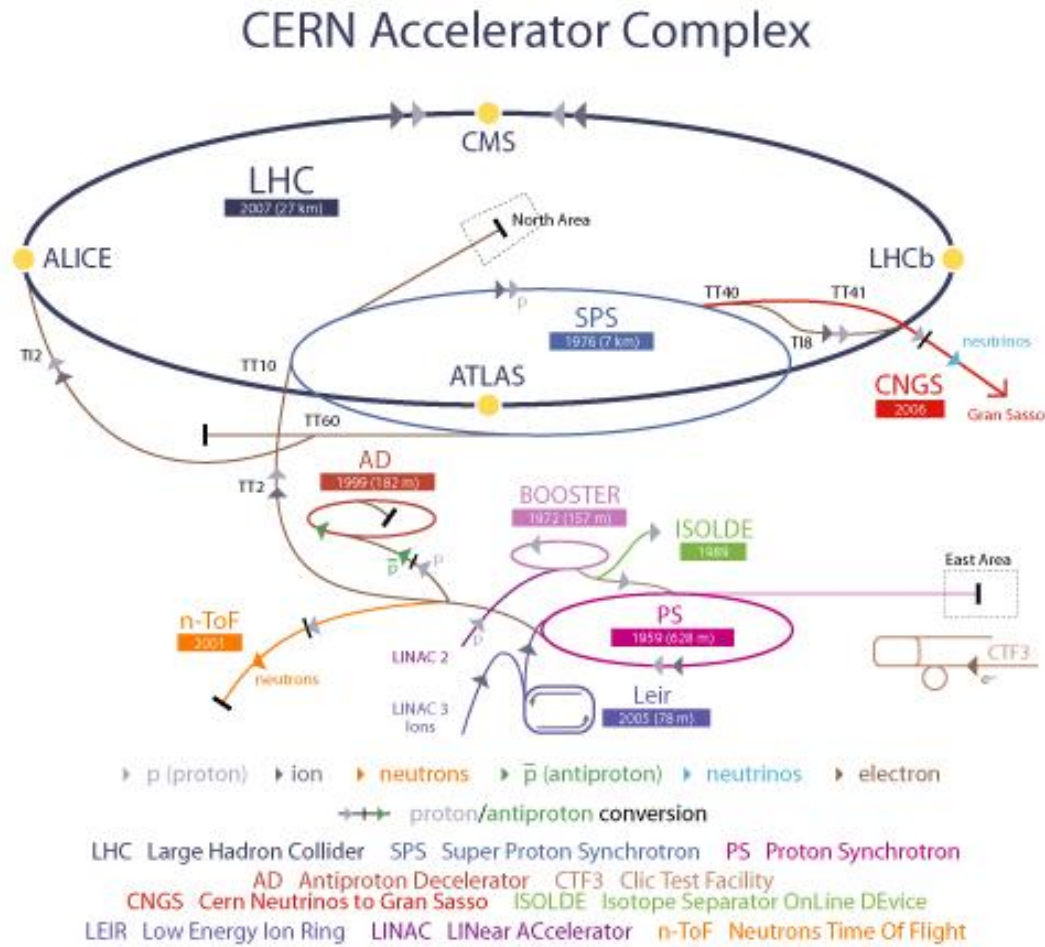
Łączny rozmiar zebranych danych można otrzymać całkując chwilową świetlność:

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

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 dla swoich potrzeb redukuje ją 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[18]. 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)[19] oraz CMS (ang. Compact Muon Solenoid) [20] 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)[21] został zoptymalizowany do badania plazmy gluonowo-kwarkowej powstającej w wyniku zderzeń ciężkich jonów.

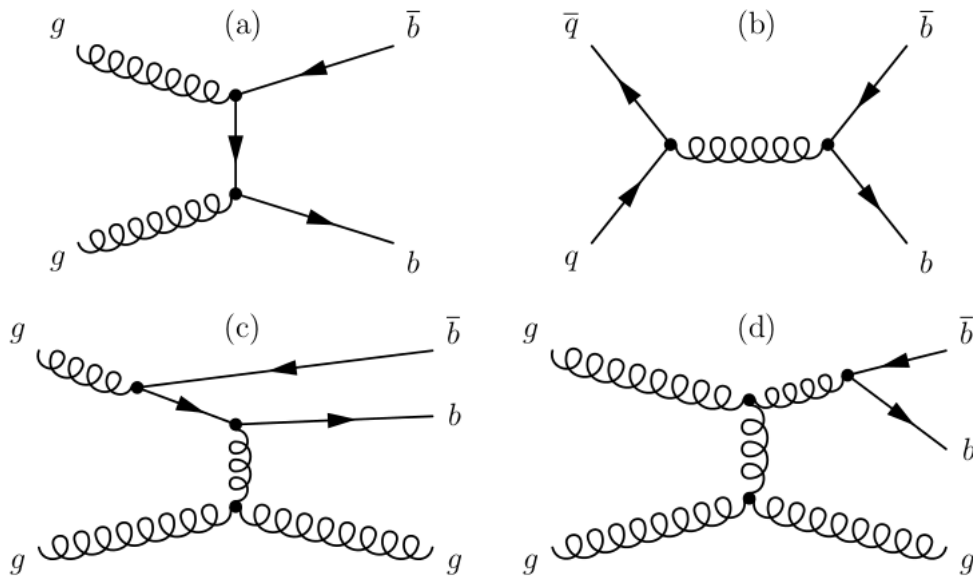
2.2. Detektor LHCb

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 jest równa:

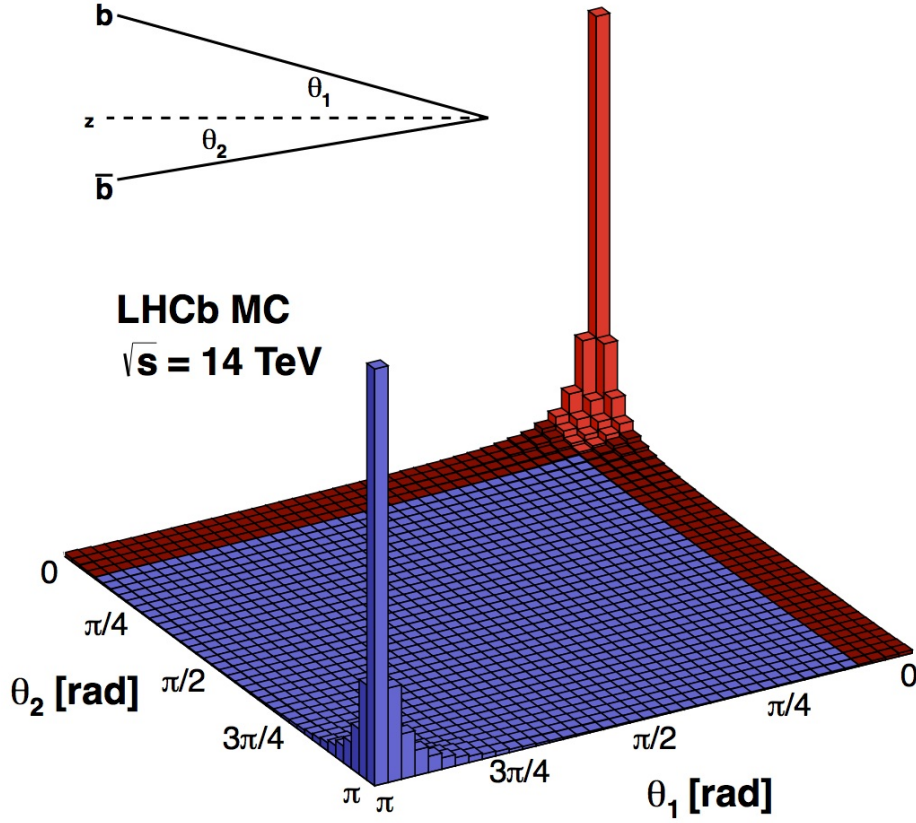
$$\alpha_{QED} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (2.2.1)$$

Stałe sprzężenia oddziaływań silnych zmieniają się z odległościami pomiędzy kwarkami [15]. Symulacje takich procesów pokazały, że przy energiach osiąganych 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]

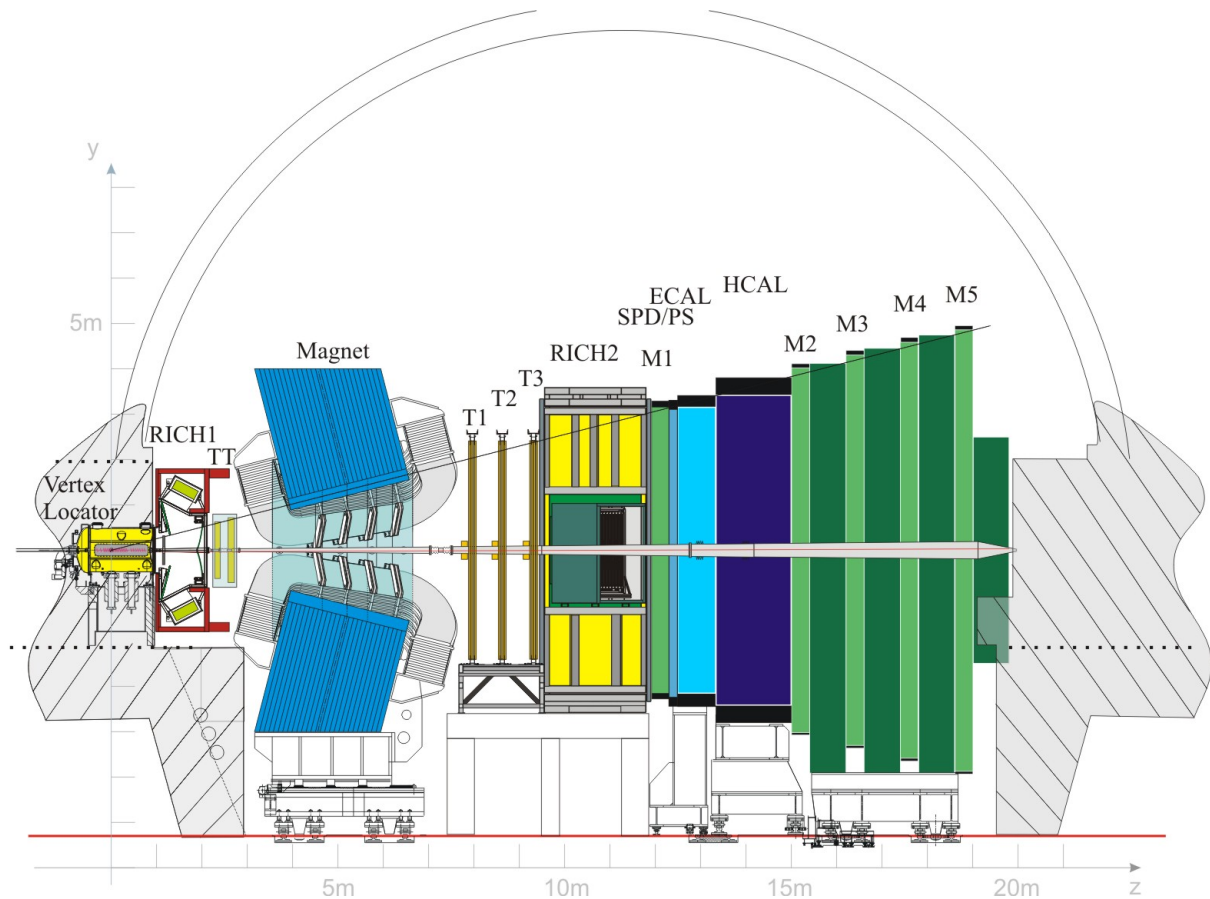
obserwowanych cząstek $1.7 < \eta < 5.3$. Przy czym pseudorapidity, η jest zdefiniowana jako

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

gdzie θ 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

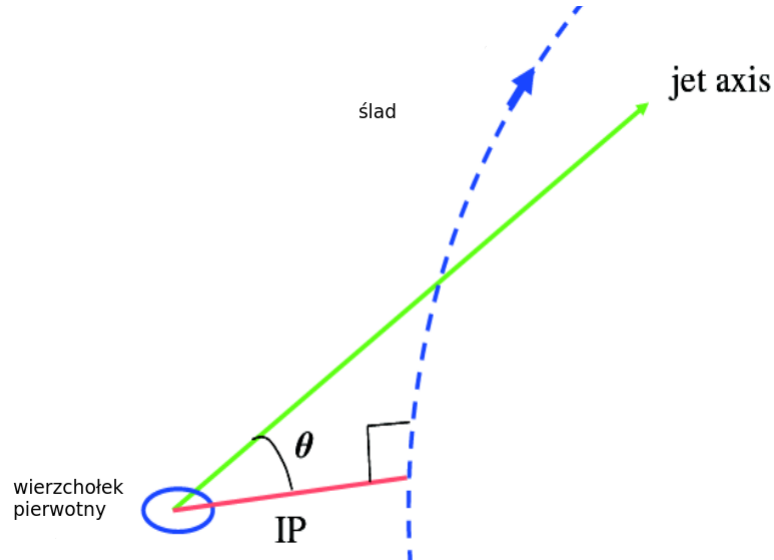


Rys. 2.2.3. Detektor LHCb w całej okazałości [2]

LOcator) który, z bardzo dużą precyzją, mierzy pozycję pierwotnego wierzchołka oraz parametr zderzenia (ang. Impact Parameter). 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 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.

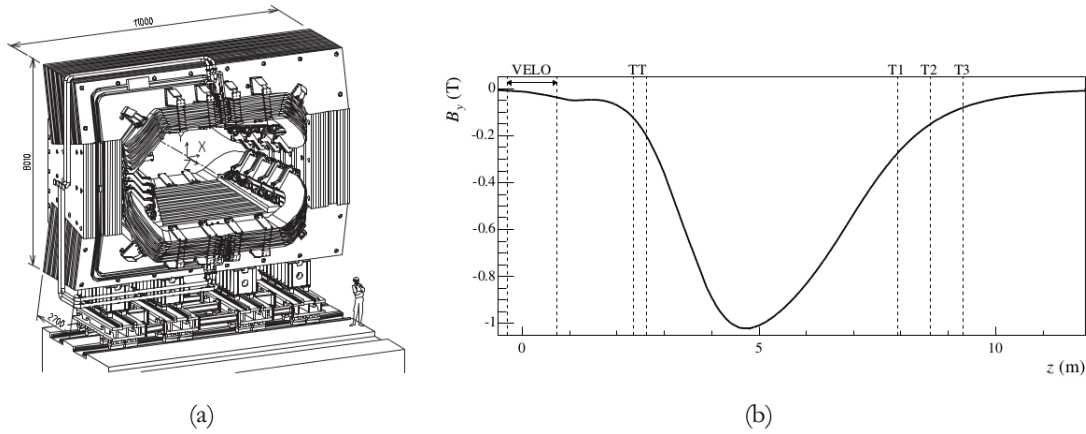
Elektromagnetyczne oraz hadronowe kalorymetry, ECAL i HCAL, mierzą energię oddziałujących z nimi cząstek poprzez całkowitą ich absorpcję. Detektory te wspierane są przez SPD oraz PS, które to pomagają w rozwiązywaniu występujących dwuznaczności w identyfikacji. Ostatnim elementem czynnym, w znaczeniu 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.

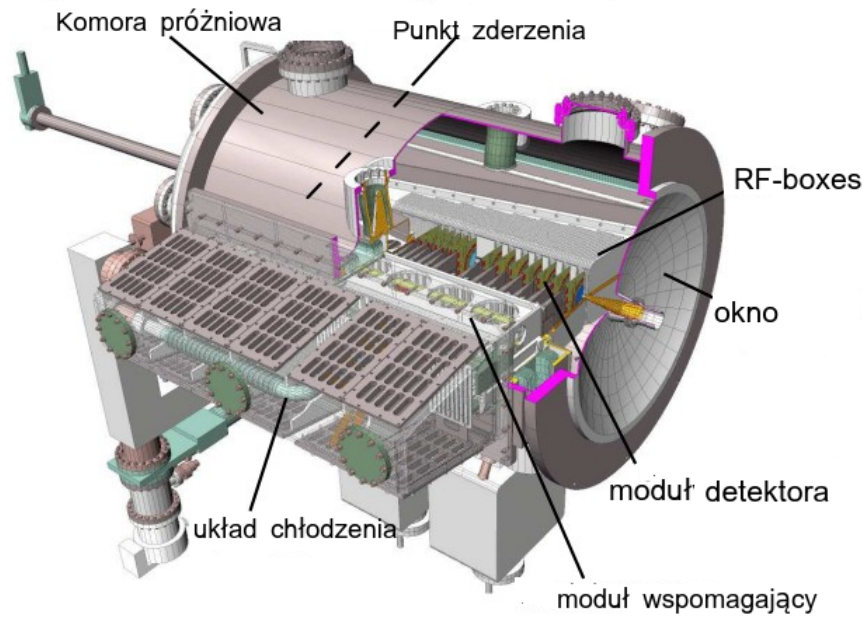
Magnes ten wytwarza pole o maksymalnej indukcji o wartości $B_{max} = 1.1T$ oraz siłę gięcia równą $\int Bdl = 4Tm$ [22]. Posiada możliwość zamiany polaryzacji. Dokonuje się tego w celu wyeliminowania wpływu ewentualnej asymetrii detekcji, która to może wpływać na pomiary łamania symetrii **CP**. Diagram 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

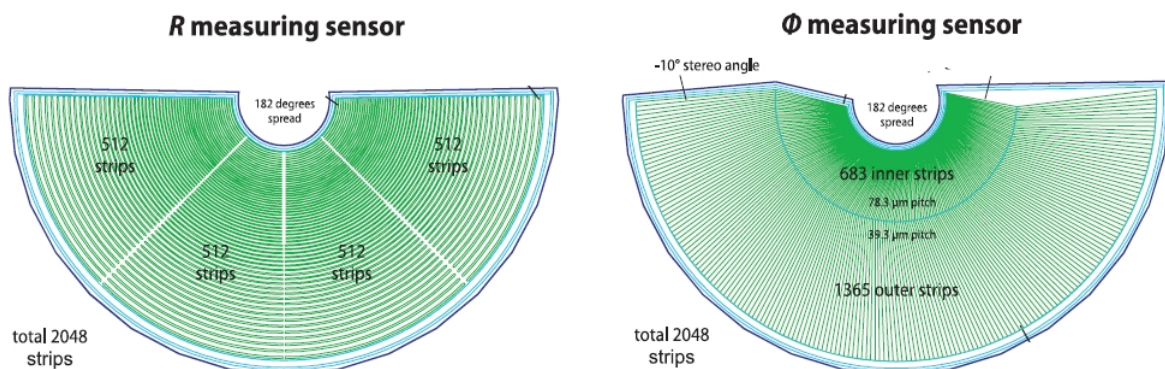
VELO (ang. VErteX LOcator) to mikropaskowy detektor krzemowy specjalnie zaprojektowany do rekonstrukcji pierwotnego oraz wtórnych wierzchołków powstającego w wyniku rozpadu mezonu $B_{(s)}^0$ oraz $D_{(s)}^0$ [4]. Obszar detekcji znajduje się już 8 mm od osi wiązki. W celu kontroli skutków efektów radiacyjnych układ stale utrzymywany jest w obniżonej temperaturze [23]. Pomiary dokonywane przez detektor są wykorzystywane również przez tryger wysokiego poziomu (HLT).



Rys. 2.2.6. Schemat detektora VELO[4]

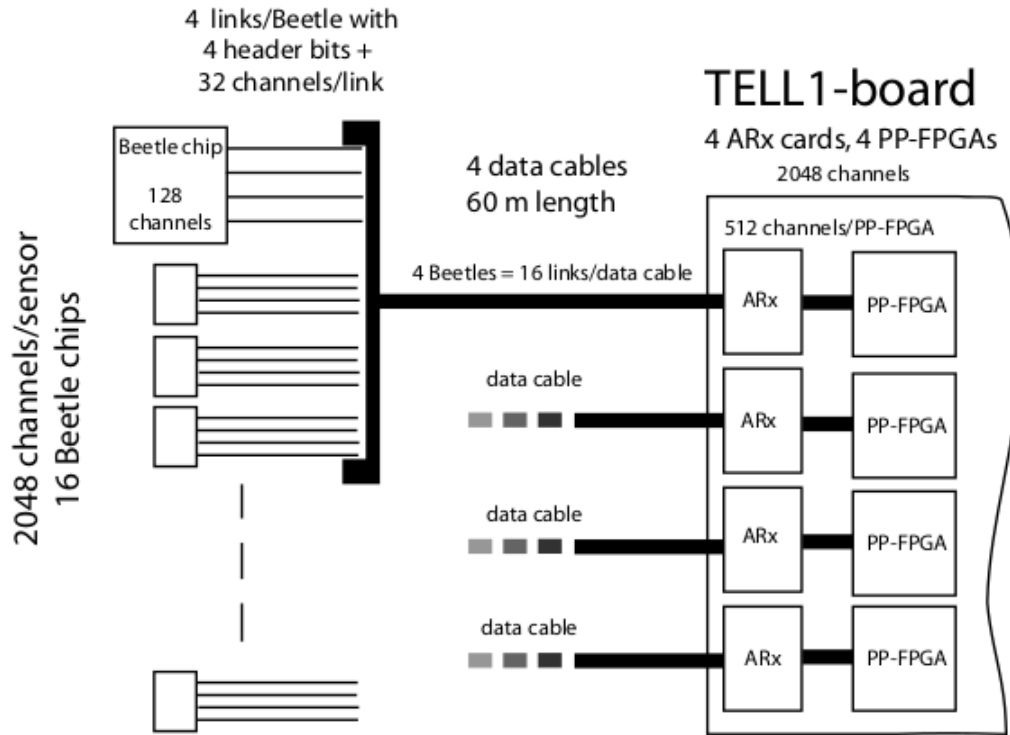
2.2.2.1. Sensory krzemowe

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° , przy czym 2° jest to obszar pokryty przez dwa przeciwległe sensory. Wyróżniamy dwa typy sensorów. Jedne, służące do pomiaru współrzędnej radialnej R , drugie mierzą składową azymutalną Φ . 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 Φ 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.

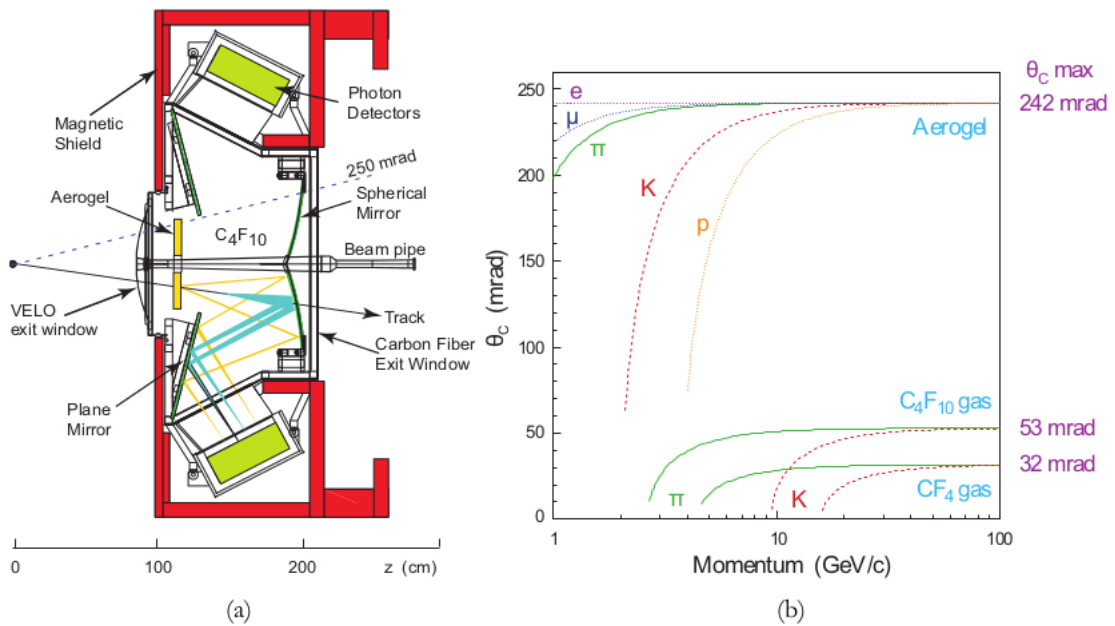


Rys. 2.2.9. Ścieżka odczytowa pomiędzy kanałami VELO a płytą TELL1[6]

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 ($\sim 15 - 100 \text{ GeV}/c$) [24]. 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 mm warstwy szkła pokrytej 900 nm warstwą glinu i 200 nm warstwą kwarcu. Do detekcji promieniowania użyto hybrydowych fotodetektorów umieszczone na powierzchni sferycznej o promieniu dwa razy mniejszym

niż zwierciadła.



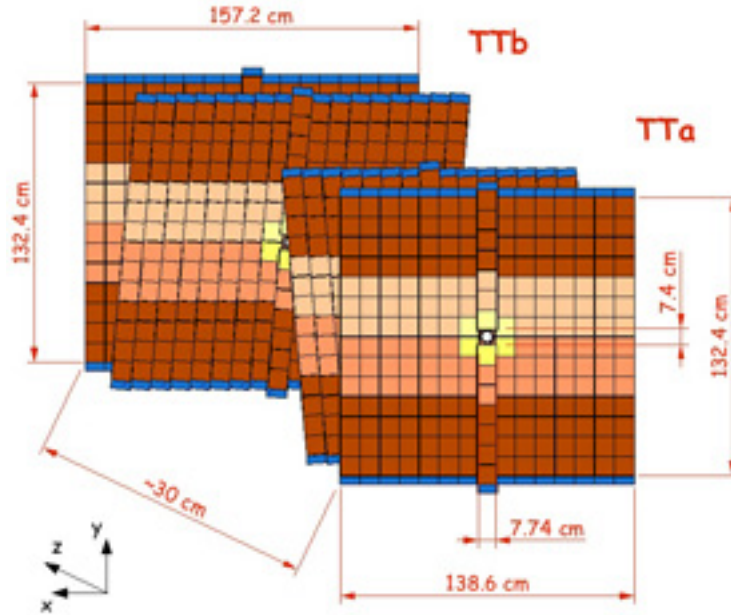
Rys. 2.2.10. Schemat detektora RICH1 z zaznaczonymi ścieżkami dla światła pojawiającego się w aerożelu oraz C₄F₁₀(a). Rozkład kątów Czerenkowa w zależności od pędu cząstek emitujących. Rysunki pochodzą z [2]

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

2.2.5. Kalorymetry

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

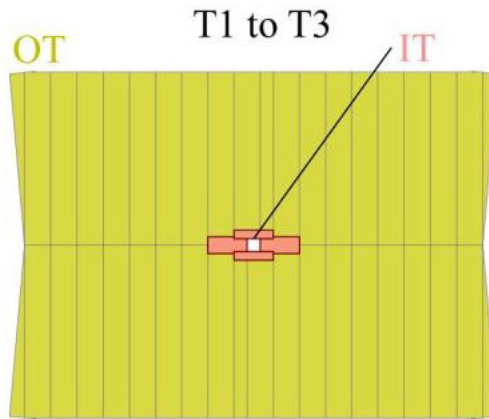


Rys. 2.2.11. Schemat detektora TT [2]

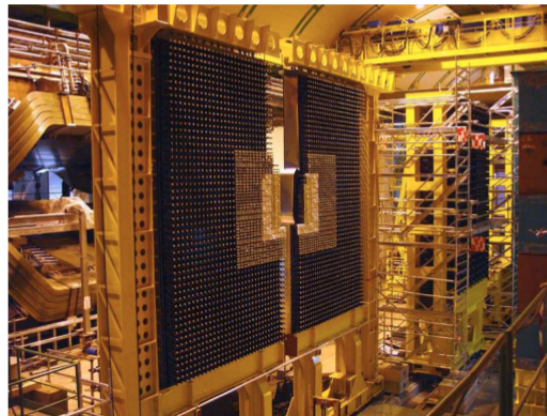
- SPD (ang. Scintillator Pad Detector) oraz PS (ang. Pre Shower) służą do odróżniania fotonów i elektronów poprzez analizę topologii elektromagnetycznej kaskady cząstek wtórnych.
- ECAL (ang. Electromagnetic CALorimeter) mierzy energię fotonów i elektronów. Zdjęcie detektora zostało zaprezentowane na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

2.2.6. Komory mionowe

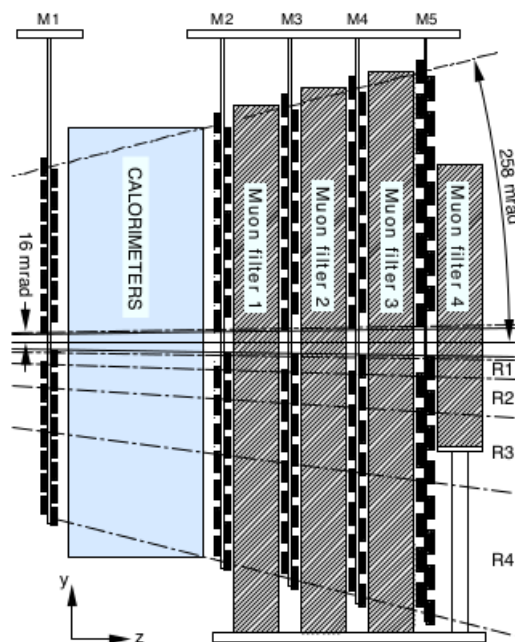
Identyfikacja mionów jest fundamentalnym wyzwaniem eksperymentu LHCb ponieważ cząstki te są stanami końcowymi powstającymi w wyniku rozpadów mezonów $B_{(s)}^0$ oraz $D_{(s)}^0$. Miony, słabo oddziaływające z materią, są jedynymi cząstkami które przechodzą przez system kalorymetrów. Układ detektorów 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.

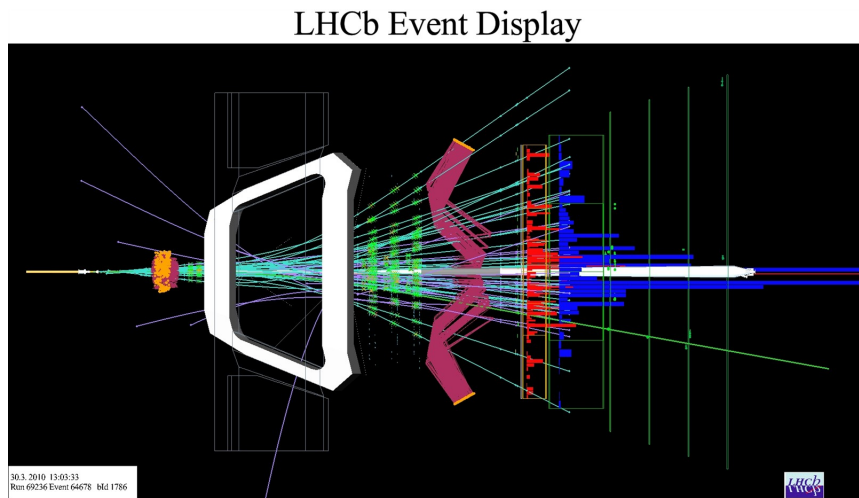


Rys. 2.2.14. Schematyczne przedstawienie (widok z boku) stacji mionowych oraz żelaznych absorberów umieszczonych pomiędzy stacjami.

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. 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 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 jest oddziaływanie cząstek z materią, następnie rozdział skupia się na opisaniu strategii znajdowania śladów. Na samym końcu omówione jest algorytm zastosowany algorytm rozpoznawania wzorców oraz algorytm obliczania wartości statystyki χ^2 .

Znajdowanie śladów jest procedurą mającą na celu znalezienie trajektorii lotu naładowanej cząstki przez detektor. Jest to niezbędny punkt każdego eksperymentu z dziedziny fizyki cząstek, a wykonywana w celu estymowania 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 hadronowe⁸.

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 Bethego-Blocha:

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

⁸W 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.
- **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.

Idea drogi radiacyjnej, oznaczanej X_0 , jest użyteczna do oszacowania wielkości straty energii w wyniku Bremsstrahlungu. Przy czym X_0 jest średnią odległością jaką przebywa elektron w danym materiale jednocześnie zmniejszając swoją energię o czynnik e . Energia cząstki po przebyciu odległości x , wynosi:

$$E(x) = E_0 e^{\frac{-x}{X_0}} \quad (3.1.2)$$

- **Wielokrotne rozpraszanie** jest to sekwencja rozpraszania Columbowskich powodująca zmianę kierunku ruchu cząstki. Dla małych kątów rozpraszania, rozkład kątów projekcji może być aproksymowany przy pomocy rozkładu Gaussa (dowalic ref od gości).

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.

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.

4.1. Root

Root [25] 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 χ^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

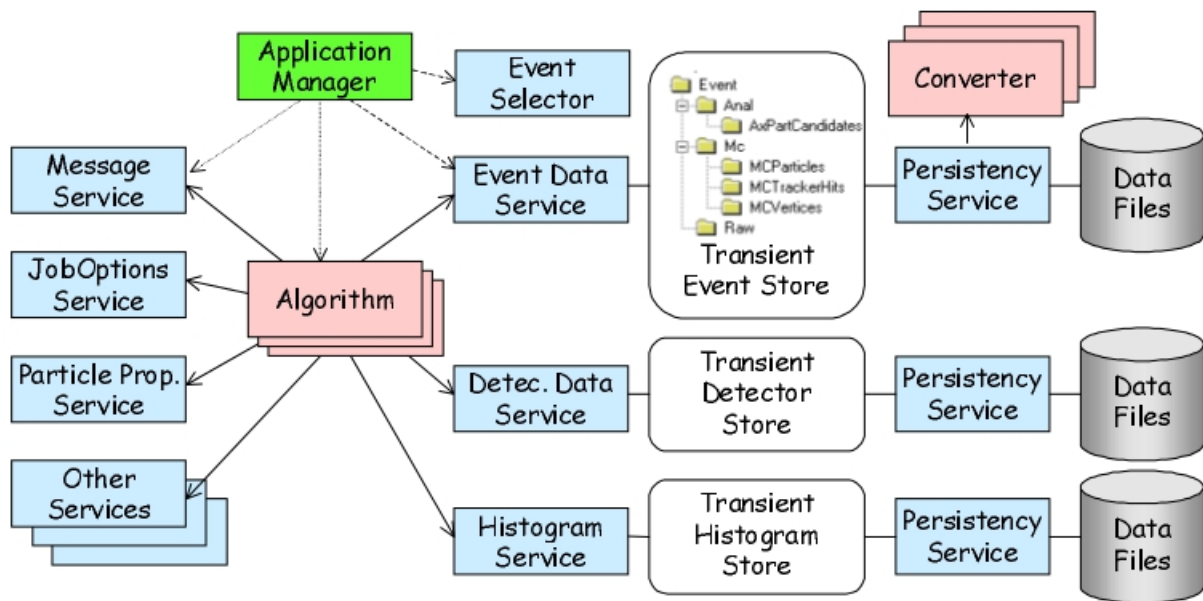
Eksperyment Fizyki Wysokich Energii produkuje rocznie peta bajty danych, które muszą zostać zebrane, a następnie przeanalizowane w celu produkcji końcowych fizycznych rezultatów. Czas życia takiego eksperymentu wynosi wiele lat w związku z tym oprogramowanie rozwijane przy nim musi mieć możliwość dopasowania do zmian technologii. Drugim ważnym wymaganiem dotyczącym oprogramowania jest elastyczność, możliwość wykorzystania w wielu dziedzinach, począwszy wydobywania 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[8]. 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 - dane 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 szczególności 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 wykonywana jest przy użyciu skryptów Python’owskich.



Rys. 4.2.1. Schemat blokowy architektury GAUDI[8]

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. Poniżej znajduje się opis najważniejszych z nich, w szczególności 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 rekonstrukcję 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 wykorzystanego 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 [26]. W celu ułatwienia korzystania z rozproszonych zasobów stworzono interfejs Gaga[27].

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

4.4. System kontroli wersji

W celu ułatwienia rozwoju oraz kontroli zmian w kodzie źródłowym podczas tworzenia oprogramowania do analizy posłużono się dwoma systemami kontroli wersji.

- **subversion** zwany również **svn** [28].
- **git** [29].

4.5. Programowanie zwinne

[30].

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] 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.
- [9] B.E. Schwarzbach and Y. Kosmann-Schwarzbach. *The Noether Theorems: Invariance and Conservation Laws in the Twentieth Century*. 2010.
- [10] W.M. Gibson and B.R. Pollard. *Symmetry Principles Particle Physics*.
- [11] P.D. Naselsky, D.I. Novikov, and I.D. Novikov. *The Physics of the Cosmic Microwave Background*.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Lincoln Wolfenstein. Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix. *Phys.Rev.Lett.*, 51:1945, 1983. doi: 10.1103/PhysRevLett.51.1945.
- [15] D. Perkins. *Introduction to High Energy Physics*. Addison-Wesley, Reading, USA, 1982.
- [16] J. Beringer et al. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 86:010001, 2012.
- [17] Tatsuya Nakada. Review on CP violation. *AIP Conf.Proc.*, 302:425–463, 1994.
- [18] 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.
- [19] The ATLAS Collaboration. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. *Journal of Instrumentation*, 3(08):S08003, August 2008.
- [20] CMS Collaboration. The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3:S08004, 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [21] ALICE Collaboration. The ALICE experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3, 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08002.
- [22] LHCb Collaboration. *LHCb magnet: Technical Design Report*. Technical Design Report LHCb. CERN, Geneva, 2000.
- [23] 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.
- [24] M Adinolfi, G Aglieri Rinella, E Albrecht, T Bellunato, S Benson, C Blake, and (...). Performance of the lhcb rich detector at the lhcb. Technical Report arXiv:1211.6759. CERN-LHCb-DP-2012-003. LHCb-DP-2012-003, CERN, Geneva, Nov 2012.
- [25] R. Brun and F. Rademakers. ROOT: An object oriented data analysis framework. *Nucl.Instrum.Meth.*, A389, 1997.

- [26] 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 Romanovski, 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.
- [27] Ulrik Egede. Ganga and distributed analysis in the LHCb. Oct 2006.
- [28] C.M. Pilato, B. Collins-Sussman, and B. Fitzpatrick. *Version Control with Subversion*. O'Reilly Series. O'Reilly Media, 2008. ISBN 9780596510336. URL <http://books.google.pl/books?id=EW-3srTM84sC>.
- [29] J. Loeliger and M. McCullough. *Version Control with Git: Powerful Tools and Techniques for Collaborative Software Development*. Oreilly and Associate Series. O'Reilly Media, Incorporated, 2012. ISBN 9781449316389. URL <http://books.google.pl/books?id=ZkXELyQWf4UC>.
- [30] R.C. Martin. *Clean Code: A Handbook of Agile Software Craftsmanship*. Pearson Education, 2008. ISBN 9780136083252. URL http://books.google.pl/books?id=_i6bDeoCQzsC.