

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Konrad Paweł Nesteruk

Nr albumu: 276977

Mionowy system wyzwiania
w oparciu o komory RPC
w eksperymencie CMS przy
Wielkim Zderzaczu Hadronów

Praca licencjacka
na kierunku FIZYKA

Praca wykonana pod kierunkiem
dr. Marcina Koneckiego
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki UW

Warszawa, Czerwiec 2011

Oświadczenie kierującego pracą

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis kierującego pracą

Oświadczenie autora (autorów) pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora (autorów) pracy

Streszczenie

Mionowy system wyzwalania w oparciu o komory RPC, za który w całości odpowiada Warszawska Grupa eksperymentu Compact Muon Solenoid, jest jednym z podsystemów mionowego systemu detektora CMS. Detektor ten jest jednym z dwóch największych znajdujących się przy Wielkim Zderzaczu Hadronów usytuowanym w Europejskim Laboratorium Fizyki Cząstek CERN pod Genewą. Jednym z zadań detektora CMS jest poszukiwanie wysoko-energetycznych mionów, które mogą być sygnaturą ważnych odkryć. Głównym celem pracy było zbadanie efektywności systemu w całym obszarze detektora. Uzyskano krzywe efektywności dla kilku cięć na pęd poprzeczny na podstawie symulacji Monte Carlo przeprowadzonej w środowisku CMSSW z wykorzystaniem analizatora napisanego przez autora niniejszej pracy.

Słowa kluczowe

Mionowy system wyzwalania RPC, Tryger RPC, CMS, CMSSW, Wielki Zderzacz Hadronów (LHC)

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

13.2 Fizyka

Tytuł pracy w języku angielskim

The RPC based trigger for the CMS experiment at the Large Hadron Collider

Spis treści

1. Wstęp	3
Wstęp	3
1.1. Wielki Zderzacz Hadronów (LHC)	3
1.2. Eksperyment CMS	4
2. Mionowy system wyzwiania (tryger mionowy)	6
2.1. Tryger mionowy pierwszego stopnia	6
2.2. Zasada działania trygera RPC	7
3. Efektywność trygera RPC	10
3.1. Próbkę mionów	10
3.2. Wzorce pędowe i analizator	10
3.3. Cięcia na pęd poprzeczny	11
3.4. Krzywe efektywności	11
4. Podsumowanie i wnioski	15
Bibliografia	16

Rozdział 1

Wstęp

Fizyka cząstek jest jednym z najszybciej rozwijających się działów fizyki. Teorią, która opisuje tę dziedzinę jest Model Standardowy, o którym mówi się, że stanowi zestawienie naszej aktualnej wiedzy o Wszechświecie i cząstkach elementarnych. Mimo, że Model Standardowy jest bardzo konsyistentną teorią, która przeszła pomyślnie wiele doświadczalnych sprawdzianów, istnieją wciąż zagadnienia, które nie znajdują jeszcze rozwiązania i wybiegają poza Model Standardowy, np.:

- pochodzenie masy
- grawitacja na poziomie mikroświata
- ciemna materia i ciemna energia.

Nadzieją na wyjaśnienie chociaż części takich zagadnień jest Wielki Zderzacz Hadronów, czyli akcelerator cząstek znajdujący się w pobliżu Europejskiego Laboratorium Fizyki Cząstek CERN w Genewie, które jest jednym z największych ośrodków naukowych na świecie.

1.1. Wielki Zderzacz Hadronów (LHC)

Akcelerator LHC (ang. Large Hadron Collider) znajduje się w kołowym tunelu, którego obwód wynosi 27 km i jest usytuowany średnio ok. 100 m pod powierzchnią ziemi. Jest to akcelerator kołowy (kolajder), którego idea opiera się na zderzeniach dwóch przeciwbieżnych wiązek hadronów. W głównym trybie pracy zderzenia następują między wiązkami protonowymi. LHC może również zderzać wiązki jonów ołowiu. Zderzenia typu proton-proton mają tę przewagę nad zderzeniami np. elektron-pozyton, że proton będąc ok. 2000 razy cięższy od elektronu ma dużo mniejsze straty energii spowodowane promieniowaniem synchrotronowym. To umożliwia uzyskanie dużo większych energii zderzeń. W akceleratorze LHC energia ta docelowo ma wynosić 14 TeV (7 TeV na wiązkę). W tej chwili w LHC energia zderzeń wynosi już 7 TeV, co stanowi połowę maksymalnej planowanej energii i już jest rekordem w skali światowej. Rekordowa jest również świetlność, która już wynosi $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, przy czym docelowa ma być jeszcze o rząd wielkości większa.

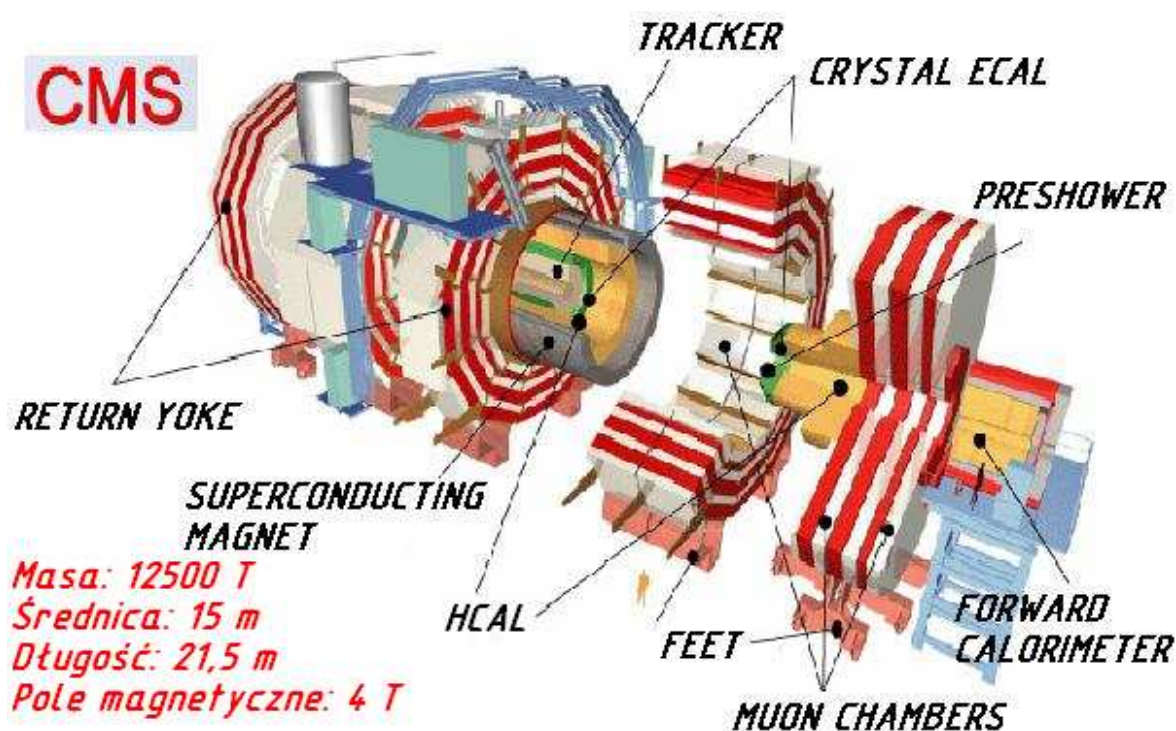
Wiązki protonów uzyskiwane są w kilkietapowym procesie. Zjonizowane atomy wodoru, czyli protony, są wstrzykiwane do wstępnego akceleratora PS Booster. Później, wiązka przechodzi przez kolejne dwa akceleratory całego kompleksu, m.in. przez SPS (Super Proton Synchrotron). Na końcu, po osiągnięciu energii 450 GeV, wiązki wstrzykiwane są do LHC (jedna zgodnie z ruchem wskazówek zegara, druga przeciwnie), gdzie uzyskują ostateczne energie zderzeń. Protony podróżują w tzw. paczkach. Każda wiązka składa się z 2808 paczek

zawierających po $1,1 \cdot 10^{11}$ protonów. Magnesy dipolowe utrzymują cząstki na orbitach w przybliżeniu kołowych, magnesy kwadrupolowe ogniskują wiązkę, zaś zadaniem wnek rezonansowych jest zapewnienie ścisłego upakowania paczkom oraz przyspieszanie cząstek.

Wiązki protonów przecinają się w czterech punktach, z którymi związane są najważniejsze detektory: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid) oraz LHCb (Large Hadron Collider beauty). ATLAS i CMS są detektorami ogólnego przeznaczenia.

1.2. Eksperyment CMS

Akronim CMS pochodzi od angielskiej nazwy detektora i jednocześnie eksperymentu związanego z nim - Compact Muon Solenoid. Nazwa nawiązuje m.in. do faktu, że detektor ten został zbudowany wokół ogromnego nadprzewodzącego solenoidu. Cewka zapewnia olbrzymie pole magnetyczne, które osiąga do 4 T (obecnie podstawą jest pole 3,8 T), czyli wartość ok. 100000 razy większą od pola magnetycznego Ziemi. CMS ma kształt beczki z dwiema pokrywami (Rysunek 1.1). Budowa detektora jest bardzo złożona, ponieważ składa się on z wielu poddetektorów.



Rysunek 1.1: Detektor CMS. Zaznaczono: jarzmo magnesu (return yoke), tracker (detektor śladowy), crystal ECAL (kalorymetr elektromagnetyczny), preshower (wstępna część kalorymetru elektromagnetycznego), forward calorimeter (kalorymetr hadronowy w obszarze pokryw), muon chambers (komory mionowe), feet (elementy nośne), HCAL (kalorymetr hadronowy), superconducting magnet (nadprzewodzący magnes).

Wśród najważniejszych detektorów wchodzących w skład eksperymentu CMS znajdują się [1]:

- Detektor śladowy - usytuowany jest najbliżej przecięcia wiązek i służy do wyznaczania pozycji wierzchołków oddziaływania oraz torów produkowanych w zderzeniu cząstek.

- Kalorymetr elektromagnetyczny - jest odpowiedzialny za pomiar energii elektronów i fotonów.
- Kalorymetr hadronowy - służy do pomiaru energii cząstek oddziałujących silnie.
- Komory mionowe - w skład komór wchodzi trzy typy detektorów gazowych. Miony oddziałują słabo i elektromagnetycznie i ze względu na relatywnie dużą masę nie deponują energii w postaci kaskady w kalorymetrze elektromagnetycznym. Umożliwia to penetrację wszystkich warstw detektora CMS. W związku z tym, komory mionowe są umieszczone za cewką w obszarze beczki i pokryw. Możemy wśród nich wyróżnić:
 - Komory DT (Drift Tube) - są jedynie w obszarze beczki.
 - Komory CSC (Cathode Strip Chamber) - znajdują się jedynie w obszarze pokryw.
 - Komory RPC (Resistive Plate Chamber) - usytuowane są w obszarze beczki i pokryw. Doskonała rozdzielczość czasowa pozwala wykorzystać je do identyfikacji przecięcia wiązek.

Głównym celem eksperymentu CMS [2] jest wyjaśnienie zagadnienia spontanicznego łamania symetrii elektroslabej, na skutek czego cząstki nabierają masy. W Modelu Standardowym realizowane jest ono dzięki cząstce Higgsa. CMS poszukuje również cząstek supersymetrycznych oraz wszelkich przejawów "nowej" fizyki. Precyzyjne testy Modelu Standardowego są także ważnym elementem programu fizycznego CMS.

Rozdział 2

Mionowy system wyzwalań (tryger mionowy)

Zderzenia w LHC zachodzą z częstością 40 MHz, co oznacza, iż detektor CMS produkowałby ok. 100 TB danych na sekundę (przy czym jeden przypadek mieści się na 3,5 calowej dyskietce). Ze względu na ograniczenia sprzętowe, zapisanie tak ogromnej liczby danych nie jest możliwe. Implikuje to konieczność obecności systemu wyzwalań, który służy do selekcji przypadków. Musi on decydować, które przypadki są ciekawe i należy je zapisać. Ogromnym wyzwaniem jest tutaj czas, jaki system wyzwalań, czyli **tryger**, ma do dyspozycji na podjęcie decyzji. System wyzwalań CMS dzielimy na podsystemy:

- Tryger pierwszego stopnia (Level-1 Trigger) - jest to część trygera, która podejmuje decyzję co 25 ns, czyli przy każdym przecięciu wiązek. Tryger ten redukuje częstość przypadków do ok. 100 kHz. Możemy tu wyróżnić tryger kalorymetryczny i mionowy.
- Wyższe stopnie trygera (HLT - High-Level Trigger) - przypadki, które pozostały po selekcji przez Level-1, poddawane są analizie (tryger ten działa w czasie rzeczywistym) z wykorzystaniem zaawansowanych algorytmów [3]. Ta część algorytmu trygera wykonuje się na farmie komputerów PC. Ostatecznie, w wyniku selekcji, uzyskiwana powinna być częstość rzędu 100 przypadków na sekundę. Zatem jest ona zredukowana o 5 rzędów wielkości w stosunku do częstości przypadków produkowanych w wyniku zderzeń protonów.

Mionowy system wyzwalań w oparciu o komory RPC, zwany dalej trygerem mionowym RPC, jest częścią (podtrygerem) trygera pierwszego stopnia.

2.1. Tryger mionowy pierwszego stopnia

Powstające w wyniku zderzeń protonów miony mogą być sygnaturą ważnego procesu z punktu widzenia poszukiwania "nowej" fizyki. W szczególności, cztery wysokopędowe miony mogą oznaczać obecność bozonu Higgsa [3]. Jeden z najbardziej prawdopodobnych kanałów rozpadu bozonu Higgsa (nazywany też złotym kanałem) polega na rozpadzie Higgsa na 2 bozony Z^0 (przy czym jeden może być wirtualny - Z^*), które rozpadają się na parę mionów: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$.

Tryger mionowy pierwszego stopnia służy do selekcji wysokopędowych mionów. Każdy typ komór mionowych posiada swój własny tryger: DT, CSC oraz RPC. W oparciu o dane

z CSC oraz DT rekonstruowane są tory mionów. Na podstawie tego przypisuje się im pęd poprzeczny. Komory RPC są dedykowane do systemu wyzwalań.

Każdy tryger wchodzący w skład Level-1 wysyła zrekonstruowane przez siebie miony do globalnego trygera mionowego GMT (Global Muon Trigger). Z komór DT oraz CSC wysyłane są po cztery miony oraz osiem z komór RPC (4 z obszaru pokryw i 4 z obszaru beczki). Na podstawie jakości rekonstrukcji oraz przypisanego pędu tryger GMT analizuje te obiekty i wybiera cztery najlepsze, a następnie wysyła je do trygera globalnego GT (Global Trigger). Tryger globalny podejmuje decyzję na podstawie danych z trygera mionowego oraz kalorymetrycznego [4].

2.2. Zasada działania trygera RPC

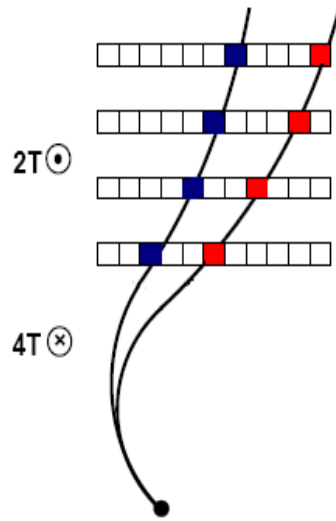
Tryger mionowy w oparciu o komory RPC nazywa się PACT (PAttern Comparator Trigger) [5]. Jest on w całości projektem Warszawskiej Grupy CMS, która cały czas ponosi za niego odpowiedzialność. Jak sama nazwa wskazuje, tryger ten opiera się o dane z komór RPC, które pokrywają obszar beczki i pokryw, czyli $|\eta| < 2,1$. Parametr η zwany jest pseudospieszczością i zdefiniowany jest jako: $\eta = -\ln\left(\text{tg}\frac{\theta}{2}\right)$, gdzie θ jest kątem polarnym liczonym względem wiązki. Komory te są detektorami gazowymi, których działanie opiera się na powstającej lawinie elektronów. Indukowany na paskowej elektrodzie sygnał (zwany dalej zapaleniem paska) jest następnie rejestrowany przez układy elektroniczne.

Nadprzewodząca cewka w detektorze CMS zapewnia pole magnetyczne, które jest użyteczne przy określaniu pędu poprzecznego cząstek oraz ich znaku. Stopień zakrzywienia toru mionów zależy właśnie od wartości pędu poprzecznego. Trajektorie mionów o mniejszym pędzie są gięte w znacznym stopniu. Wraz ze wzrostem wartości pędu, zmniejsza się stopień gięcia trajektorii.

Tryger PACT operuje wcześniej zdefiniowanymi wzorcami pędowymi, które danej sekwencji zapalonych pasków w komorach przypisują odpowiedni pęd poprzeczny mionu. Optymalizacja algorytmu związanego z generowaniem wzorców pędowych jest dużym wyzwaniem i niezwykle istotnym problemem [5], [6]. Ugięta w polu magnetycznym cząstka zapala odpowiednie paski (Rysunek 2.1) i na tej podstawie tryger PACT przypisuje wzorec odpowiadający danej sekwencji zapaleń. To zaś, implikuje przypisanie kodu pędowego, czyli daje odpowiedź trygera, iż mion został zrekonstruowany z danym, oszacowanym pędem poprzecznym. Pęd szacowany jest z góry, czyli możemy mówić jedynie, że rzeczywisty pęd poprzeczny mógł być aż tak duży, jak wartość, która odpowiada zwróconemu przez tryger kodowi pędowemu. Zdefiniowane w trygerze RPC kody pędowe oraz odpowiadające im wartości pędu poprzecznego p_t przedstawia Tabela 2.1.

Biorąc pod uwagę przekrój podłużny przez detektor CMS, segmentacja trygera RPC polega na podziale obszaru, w którym znajdują się komory RPC, na wieże (komory w danej wieży są rozmieszczone w kilku płaszczyznach) według wartości pseudospieszczości η . Segmentację tę przedstawia Rysunek 2.2. Ze względu na symetrię detektora możemy wyróżnić 33 wieże, mimo że na rysunku widnieje jedynie połowa.

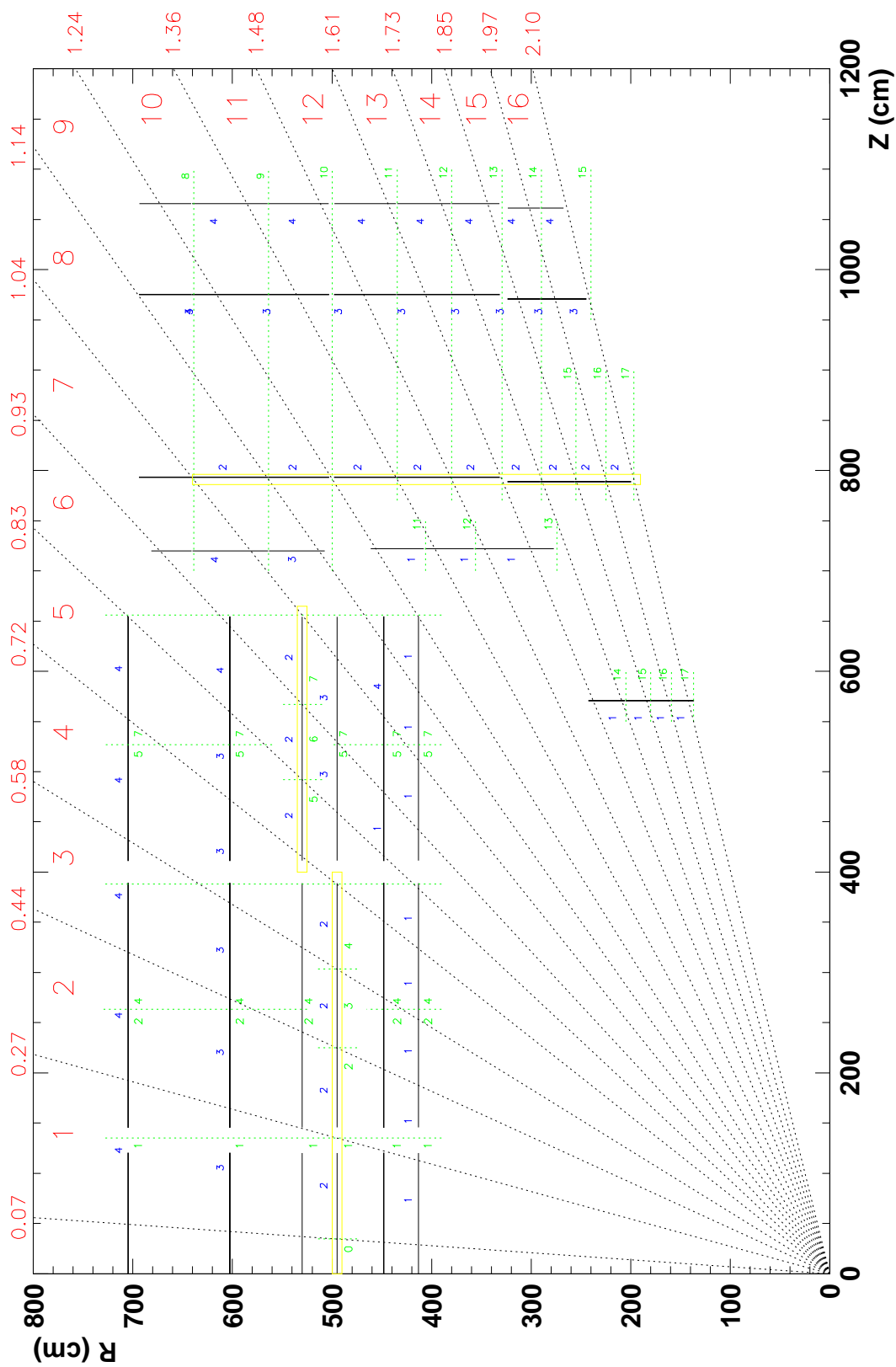
Obecnie, ze względu na ograniczenia finansowe, zbudowany jest niepełny system RPC. Ograniczenia dotyczą ostatniej płaszczyzny w obszarach pokryw oraz komór w obszarze najbardziej zbliżonym do wiązki ($\sim 1,6 < |\eta| < 2,1$).



Rysunek 2.1: Schematyczna ilustracja działania trygera opartego o komory RPC. Koincydencja zapalonych pasków umożliwia wnioskowanie o pędzie poprzecznym mionu.

Kod	p_t [GeV/c]	Kod	p_t [GeV/c]
1	0,0	17	18
2	1,5	18	20
3	2,0	19	25
4	2,5	20	30
5	3,0	21	35
6	3,5	22	40
7	4,0	23	45
8	4,5	24	50
9	5,0	25	60
10	6,0	26	70
11	7,0	27	80
12	8,0	28	90
13	10,0	29	100
14	12,0	30	120
15	14,0	31	140
16	16,0	-	-

Tabela 2.1: Kody pędowe i odpowiadające im wartości pędu poprzecznego p_t .



Rysunek 2.2: Segmentacja trygera RPC.

Rozdział 3

Efektywność trygera RPC

Głównym celem prezentowanej pracy było zbadanie efektywności działania trygera RPC. Oczywiście, pożądana jest jak najwyższa efektywność, która określa wydajną rekonstrukcję mionów. Pozwala ona zidentyfikować interesujące nas przypadki. Jeżeli przez R oznaczymy liczbę mionów zrekonstruowanych przez tryger RPC odpowiadających mionom, które faktycznie przelatują przez detektor, a G będzie odpowiadało liczbie wszystkich mionów przelatujących przez komory RPC to przez efektywność E_{RPC} trygera RPC możemy rozumieć:

$$E_{RPC} = \frac{R}{G} \quad (3.1)$$

Badania efektywności przeprowadzone zostały w oparciu o próbkę wygenerowanych mionów oraz analizatora napisanego w języku $C++$ przez autora pracy.

3.1. Próbka mionów

Próbka została wygenerowana w środowisku CMSSW używając platformy *Geant4*, która służy do symulacji przejścia cząstek przez materię opierając się o metody Monte Carlo. Wsymulowano ok. 3 mln mionów dodatnich i ujemnych w pełnym zakresie kąta $|\varphi| \leq \pi$ dla pseudospieszości $|\eta| < 2,1$. W symulacji założono wydajność komór RPC równą 1, brak szumów komór oraz brak klastrów, czyli zapaleń więcej niż jednego paska przez pojedynczy mion.

3.2. Wzorce pędowe i analizator

Komory RPC rozmieszczone są w każdej wieży w kilku płaszczyznach pogrupowanych w tzw. stacjach mionowych (wspólnych dla wszystkich systemów). Każdej wieży odpowiada jedna płaszczyzna referencyjna, która w całości pokrywa dany zakres pseudospieszości i na jej podstawie wieże są numerowane. Z daną płaszczyzną związane są oczywiście paski, które zapala przelatujący mion. W symulacji użyto algorytmu, który wymaga zapalenia przez mion co najmniej:

- 3 z 6 płaszczyzn (w trzech różnych stacjach) lub 3 z 4 (w dwóch pierwszych stacjach) dla wież: 0-7,
- 3 z 4 płaszczyzn dla wieży 8,
- 3 z 3 płaszczyzn dla wież: 9-12,

- 3 z 4 płaszczyzn dla wież: 13-16. Ta opcja dostępna będzie po uzupełnieniu systemu RPC o brakujące komory.

Analizator, na podstawie koincydencji czasowo-przestrzennej przypisuje wygenerowanemu mionowi o ustalonym pędzie poprzecznym miony zrekonstruowane przez tryger. Jeżeli na jeden mion wygenerowany przypada więcej, niż jeden mion zrekonstruowany, wybiera się przypadek o wyższym pędzie poprzecznym (odpowiadającym zwróconemu przez tryger kodowi pędowemu). Zrekonstruowany mion jest dodawany do odpowiedniego histogramu (licznika) oznaczonego zgodnie z numerem wieży oraz cięciem na pęd poprzeczny (patrz: 3.3). Wartość pędu poprzecznego na histogramie jest wartością pędu mionu generowanego. Wszystkie zaś miony generowane dla danej wieży i cięcia na pęd poprzeczny są dodawane do histogramu mianownika. Na końcu, histogramy w programie *ROOT* [7] dzielone są przez siebie i w ten sposób otrzymujemy histogram efektywności dla konkretnej wieży oraz cięcia na pęd poprzeczny.

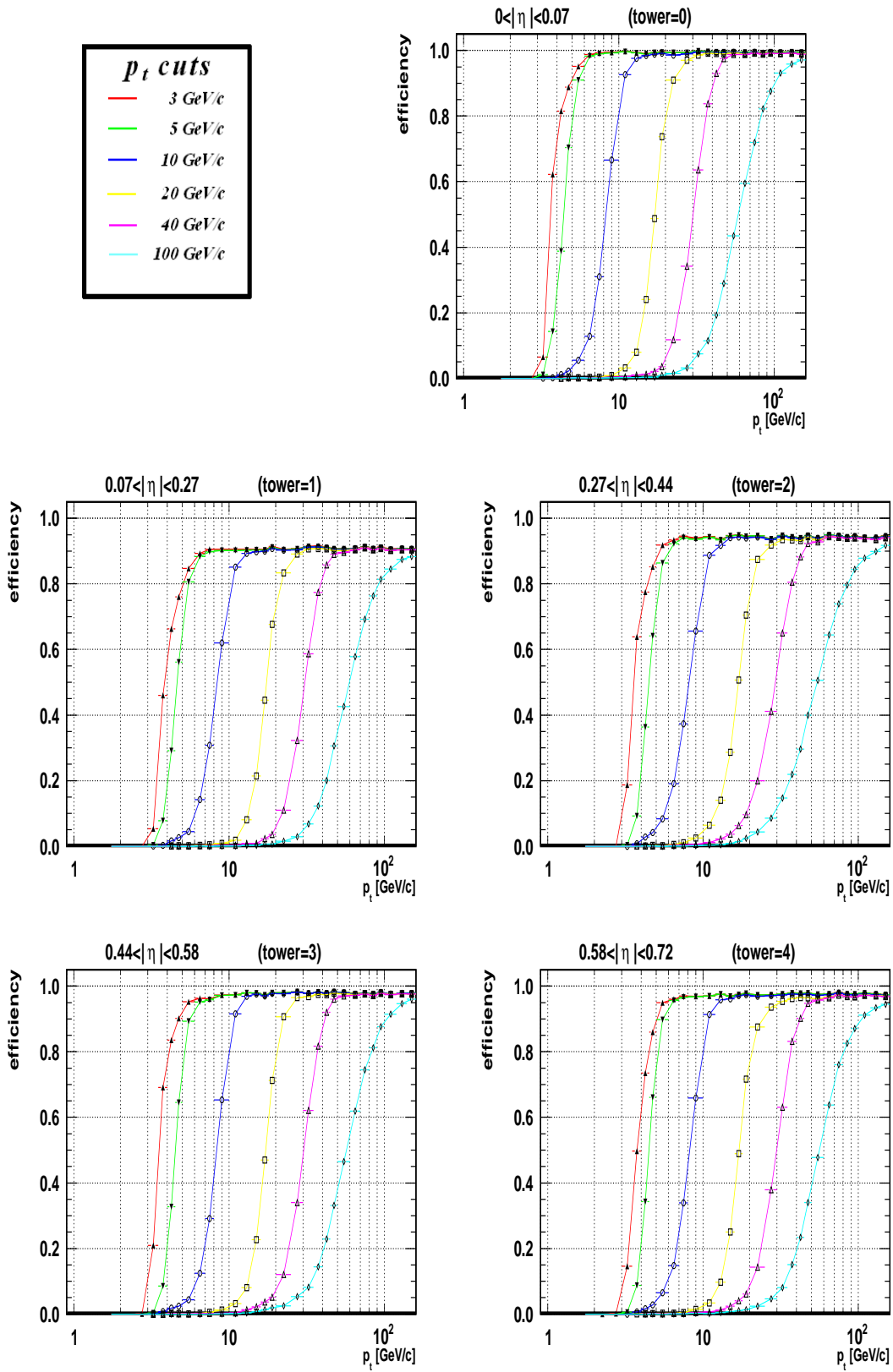
3.3. Cięcia na pęd poprzeczny

Przez cięcie na pęd poprzeczny należy rozumieć taką wartość pędu, dla której zrekonstruowane przypadki o wyższej wartości pędu (odpowiadającej przypisanemu kodowi pędowemu) są dodawane do histogramu związanego z danym cięciem. Przy tworzeniu krzywych efektywności wzięto pod uwagę cztery następujące cięcia na pęd poprzeczny:

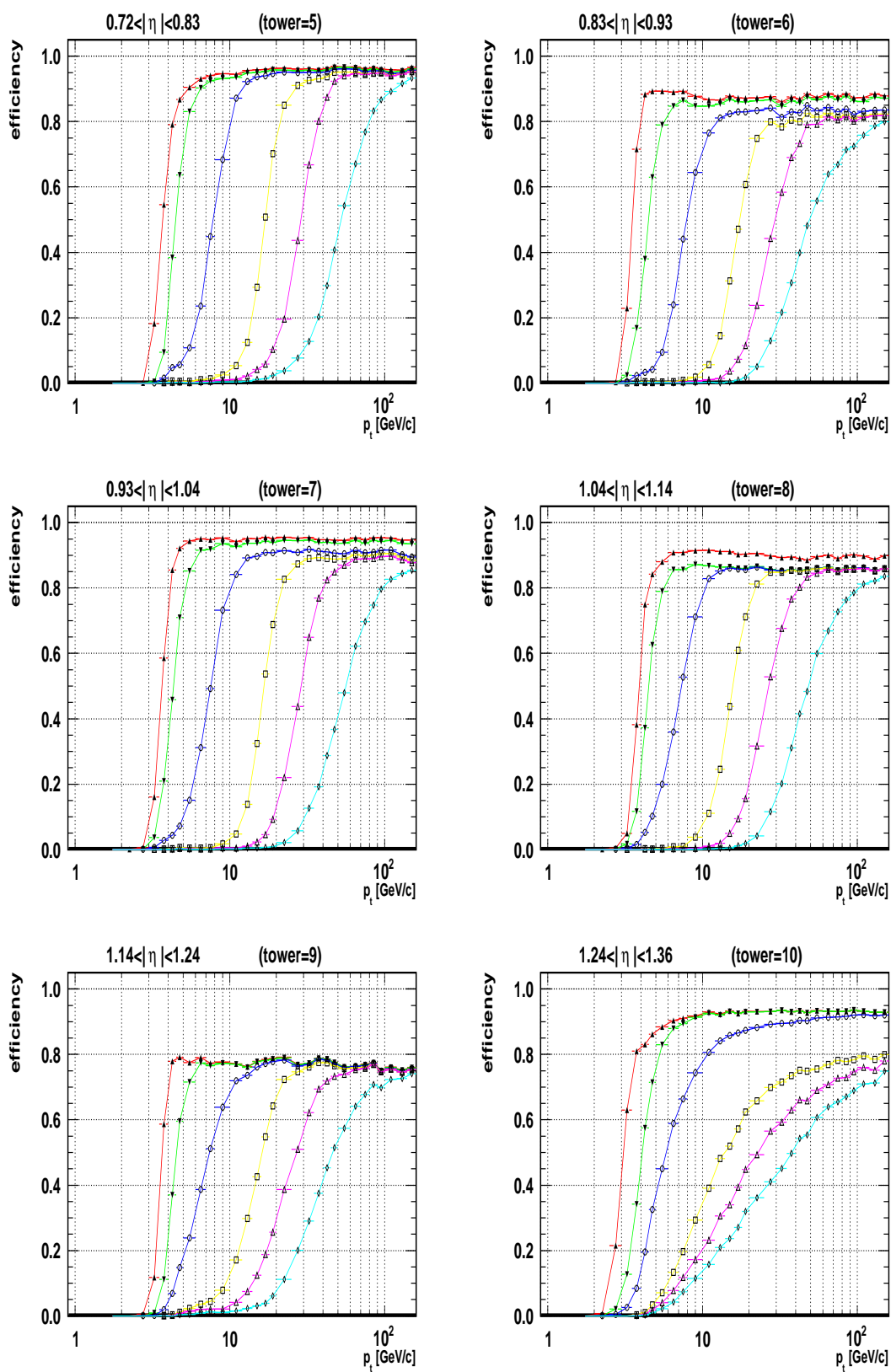
- $p_t^{cut} = 3 \text{ GeV}/c$,
- $p_t^{cut} = 5 \text{ GeV}/c$,
- $p_t^{cut} = 10 \text{ GeV}/c$,
- $p_t^{cut} = 20 \text{ GeV}/c$,
- $p_t^{cut} = 40 \text{ GeV}/c$,
- $p_t^{cut} = 100 \text{ GeV}/c$.

3.4. Krzywe efektywności

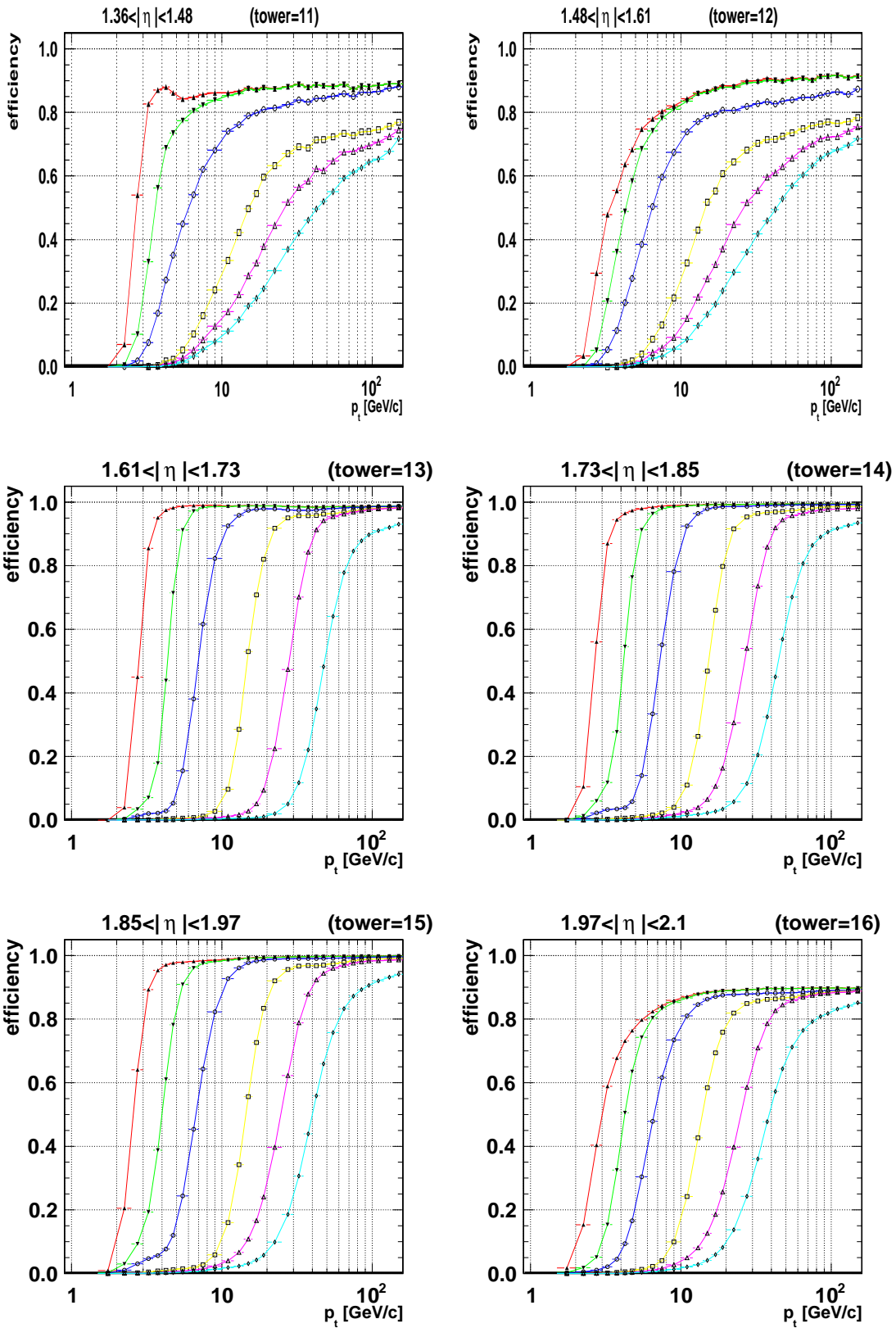
Rysunki stanowiące otrzymany wynik badań efektywności trygera RPC sporządzono umieszczając wszystkie sześć krzywych odpowiadających użytym cięciom na jednym wykresie dotyczącym konkretnej wieży. W ten sposób uzyskano 17 rysunków dla pełnego zakresu η . Komplet krzywych wraz z opisem oznaczeń przedstawiają Rysunki 3.1-3.3.



Rysunek 3.1: Krzywe efektywności dla wież 0-4 z zastosowanymi sześcioma różnymi cięciami na pęd poprzeczny.



Rysunek 3.2: Krzywe efektywności dla wież 5-10 z zastosowanymi sześcioma różnymi cięciami na pęd poprzeczny.



Rysunek 3.3: Krzywe efektywności dla wież 11-16 z zastosowanymi sześcioma różnymi cięciami na pęd poprzeczny.

Rozdział 4

Podsumowanie i wnioski

Uzyskane krzywe efektywności pokazują skuteczność trygera w oparciu o komory mionowe RPC. Widać, że najgorszą efektywnością cechuje się wieża nr 9, która obejmuje obszar graniczny beczki i pokryw detektora CMS. Efektywności dla wszystkich cięć nie przekraczają tam wartości 0,8, podczas gdy efektywności dla innych wież osiągają wartość ok. 0,9-0,95. W obszarze wieży dziewiątej odnosimy się jedynie do trzech płaszczyzn, przy czym wymagane jest zapalenie wszystkich.

Idealna krzywa efektywności dla danego cięcia na pęd powinna przyjmować wartość 0 dla pędów mniejszych od cięcia oraz wartość 1 dla większych od rozważanego cięcia. W związku z tym oczekujemy, aby uzyskiwane krzywe dla trygera RPC były maksymalnie strome w punkcie odpowiadającym wartości cięcia, a następnie były jak najbardziej gładkie i znajdowały się możliwie najbliżej wartości 1.

Odstępstwa od naszych oczekiwań wynikają przede wszystkim z faktu, iż tryger RPC rekonstruuje mion w sposób dający jedynie górne ograniczenie na pęd. To oznacza, że mion, który ma pęd 5 GeV/c może być zrekonstruowany jako mion wysokopędowy, np. 100 GeV/c. Tendencja ta ma odzwierciedlenie w przedstawionych wynikach. Dążenie do ideału ogranicza w ogóle przestrzenną zdolność rozdzielczą komór RPC.

Podsumowując, uzyskane wyniki pokazują efektywność w pełnym zakresie pseudospieszości. Wyraźnie widać, iż dla znacznej większości obszaru trygera RPC efektywności te przekraczają wartość 0,9, co jest wynikiem zadowalającym. Należy jednak pamiętać, że w symulacjach wykonanych przez autora, pominięto nieefektywności komór, szumy komór oraz klastryzację. W odrębnych studiach warto byłoby zbadać wygląd krzywych dla realistycznych warunków dotyczących modelu działania komór, występowania klastrów oraz oddziaływania z komorami RPC innych cząstek niż miony. Należałoby również przeprowadzić badania dotyczące częstości wyzwoleń trygera RPC w funkcji pseudospieszości oraz wartości cięć na pęd poprzeczny. Badania te będą kontynuowane przez autora.

Bibliografia

- [1] The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments, Volume 2: CMS, LHCb, LHCf, and TOTEM, *The CMS experiment at the CERN LHC*, 2008 JINST 3 S08004.
- [2] G.L. Bayatian *et al.* (CMS Collaboration), *CMS Technical Design Report, Volume II: Physics Performance*, J.Phys. G. G34 (2007).
- [3] CMS Collaboration, *CMS The TriDAS Project TDR, Volume 2: Data Acquisition and High-Level Trigger*, CERN/LHCC 2002-26, CMS TDR 6.2.
- [4] A.Kalinowski, *Optymalizacja algorytmu trygera mionowego detektora CMS w obecności szumów komór RPC*, praca magisterska, Warszawa 2002.
- [5] K.Buńkowski, *Optimization, Synchronization, Calibration and Diagnostic of the RPC PAC Muon Trigger System for the CMS detector*, rozprawa doktorska, Warszawa 2009.
- [6] T.Frubes, *Mionowy system wyzwalania detektora CMS w oparciu o komory RPC - emulacja algorytmu i optymalizacja wzorców pędowych*, praca magisterska, Warszawa 2008.
- [7] ROOT, An Object-Oriented Data Analysis Framework, <http://root.cern.ch>.