

Uniwersytet Warszawski

Wydział Fizyki

Dominik Bartkiewicz

Nr albumu: 234454

Tryger RPC jako część systemu
mionowego CMS - analiza
pierwszych danych LHC przy
energii 7 TeV.

*Praca magisterska na kierunku Fizyka
specjalność fizyka cząstek elementarnych i oddziaływań
fundamentalnych*

Praca wykonana pod kierunkiem

dr. Marcina Koneckiego

Instytut Fizyki Doświadczalnej UW,

dr. Piotra Zalewskiego

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Warszawa, sierpień 2012

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 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 pracy:

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawione są pomiary efektywności mionowego systemu wyzwalania opartego o komory RPC w eksperymencie CMS przy akceleratorze LHC. Całość analizy została przeprowadzona na danych typu MinimumBias, ze zderzeń proton–proton przy energii w środku masy 7 TeV, zebranych w roku 2011.

Słowa kluczowe

CMS, LHC, RPC, PAC

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

13.2 Fizyka

Tytuł pracy w języku angielskim

RPC Trigger as a part of the CMS muon system - an analysis of the first LHC data at $\sqrt{S}=7$ TeV.

Spis treści

1. Wstęp	3
1.1. Akcelerator LHC	3
1.2. Detektor CMS	5
1.3. Trygery detektora CMS	8
1.3.1. Tryger mionowy	8
1.3.2. Tryger mionowy RPC	11
2. Efektywność i selektywność trygera RPC	14
2.1. Efektywności i selektywności trygera PAC	14
2.2. Podział efektywności	15
2.3. Selekcja przypadków i zastosowane cięcia	16
2.4. Wyznaczenie efektywności i selektywności trygera PAC	24
2.4.1. Estymacja efektywności ϵ_{HW}	24
2.4.2. Wyznaczenie efektywności ϵ_{PAC}	27
2.4.3. Wyznaczenie selektywności wzorców trygera PAC	30
2.4.4. Estymacja całkowitej efektywności ϵ i selektywności systemu PAC	34
3. Podsumowanie	41

1. Wstęp

1.1. Akcelerator LHC

LHC (Large Hadron Collider) [1] jest największym na świecie akceleratorem cząstek elementarnych, znajdującym się koło Genewy na granicy francusko-szwajcarskiej w ośrodku CERN (Europejska Organizacja Badań Jądrowych). CERN, od lat pięćdziesiątych XX wieku, zajmuje się badaniami fundamentalnych praw przyrody. Obecnie stowarzyszonych jest z nim ponad 600 instytucji naukowych z całego świata. Polska od roku 1991 jest państwem członkowskim.

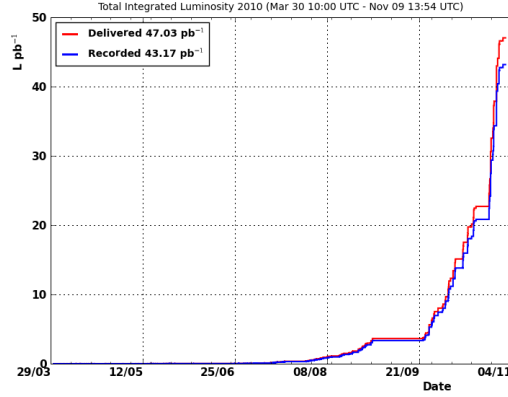
Akcelerator LHC został zaprojektowany do przyspieszania przeciwbieżnych wiązek protonów do energii 14 TeV w środku masy układu zderzających się protonów. Maksymalna świetność, z którą jest w stanie pracować akcelerator i związane z nim detektory została określona na $10\text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$. Akcelerator LHC jest umieszczony w podziemnym tunelu o obwodzie 27 kilometrów na głębokości około 100 metrów, wybudowanym dla poprzedniego eksperymentu LEP (Large Electron Positron).

Wewnątrz tunelu, we wspólnym kriostacie, umieszczone są dwie próżniowe rury, w których przyspieszane są dwie przeciwbieżne wiązki protonów, które przecinają się w czterech punktach. W punktach przecięcia wiązek następują zderzenia proton–proton. Dane z tych zderzeń są zbierane przy użyciu czterech dużych eksperymentów: Compact Muon Solenoid (CMS) [2], A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS) [3], A Large Ion Collider Experiment (ALICE)[4], Large Hadron Collider beauty (LHCb) [5] i dwóch mniejszych pomocniczych: TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement (TOTEM) [6] i Large Hadron Collider forward (LHCf) [7].

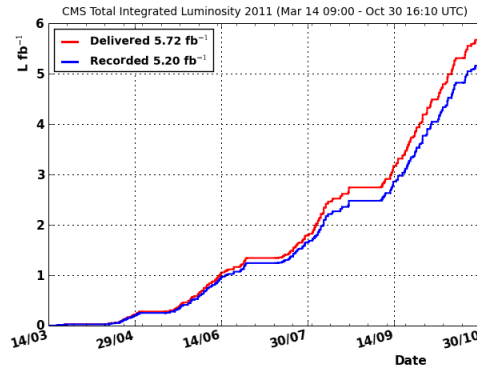
LHC służy przede wszystkim do badania bardzo rzadkich procesów o bardzo wysokich energiach i małych przekrojach czynnych rzędu femtobarnów. Do efektywnego badania takich procesów niezbędne jest zapewnienie wystarczającej świetności. W celu osiągnięcia wymaganej świetności zderzenia następują co 25 ns. Przy założonych parametrach pracy akceleratora w każdym pojedynczym przecięciu wiązek zachodzi około 20 oddziaływań proton – proton.

30 marca 2010 roku w detektorach akceleratora LHC po raz pierwszy w historii nastąpiły zderzenia przy energii 7 TeV w środku masy. W okresie od 30 marca do 9 listopada 2010 roku LHC dostarczyło ponad 47 pb^{-1} (Rysunek 1.1 [8]) przy energii

w środku masy 7 TeV. Uzyskana maksymalna chwilowa świetłość wyniosła ponad $200 \mu b^{-1} s^{-1}$. W roku 2011 akcelerator dostarczył $5.7 fb^{-1}$ przy chwilowej świetłości dochodzącej do $3.55 nb^{-1} s^{-1}$ co pozwoliło zebrać $5.22 fb^{-1}$ w detektorze CMS (Rysunek 1.2 [8]).



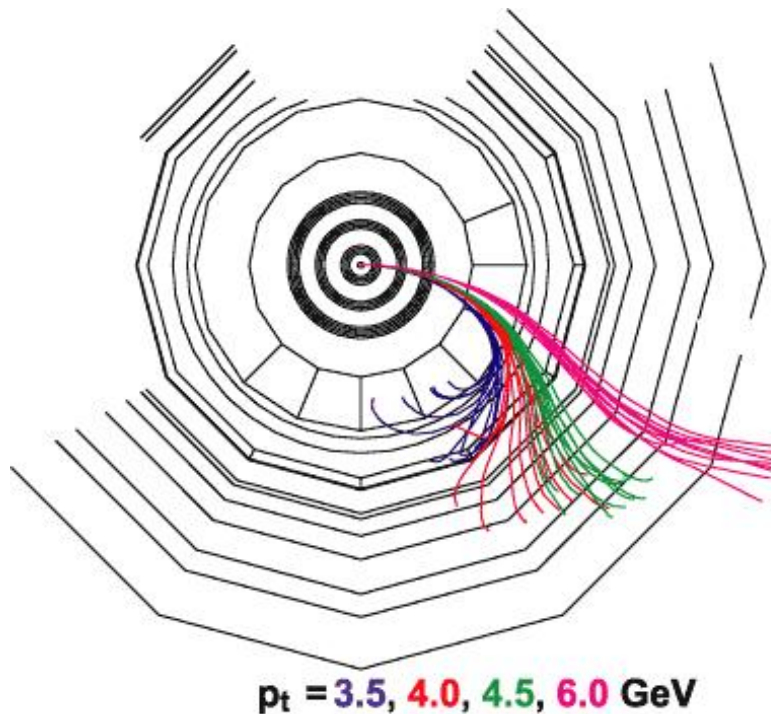
Rysunek 1.1: Scałkowana świetłość względem czasu w roku 2010, dostarczona (kolor czerwony), zarejestrowana przez detektor CMS (kolor niebieski). Przy stabilnych wiązkach o energii 7 TeV w środku masy oddziałujących protonów.



Rysunek 1.2: Scałkowana świetłość względem czasu w roku 2011, dostarczona (kolor czerwony), zarejestrowana przez detektor CMS (kolor niebieski). Przy stabilnych wiązkach o energii 7 TeV w środku masy oddziałujących protonów.

1.2. Detektor CMS

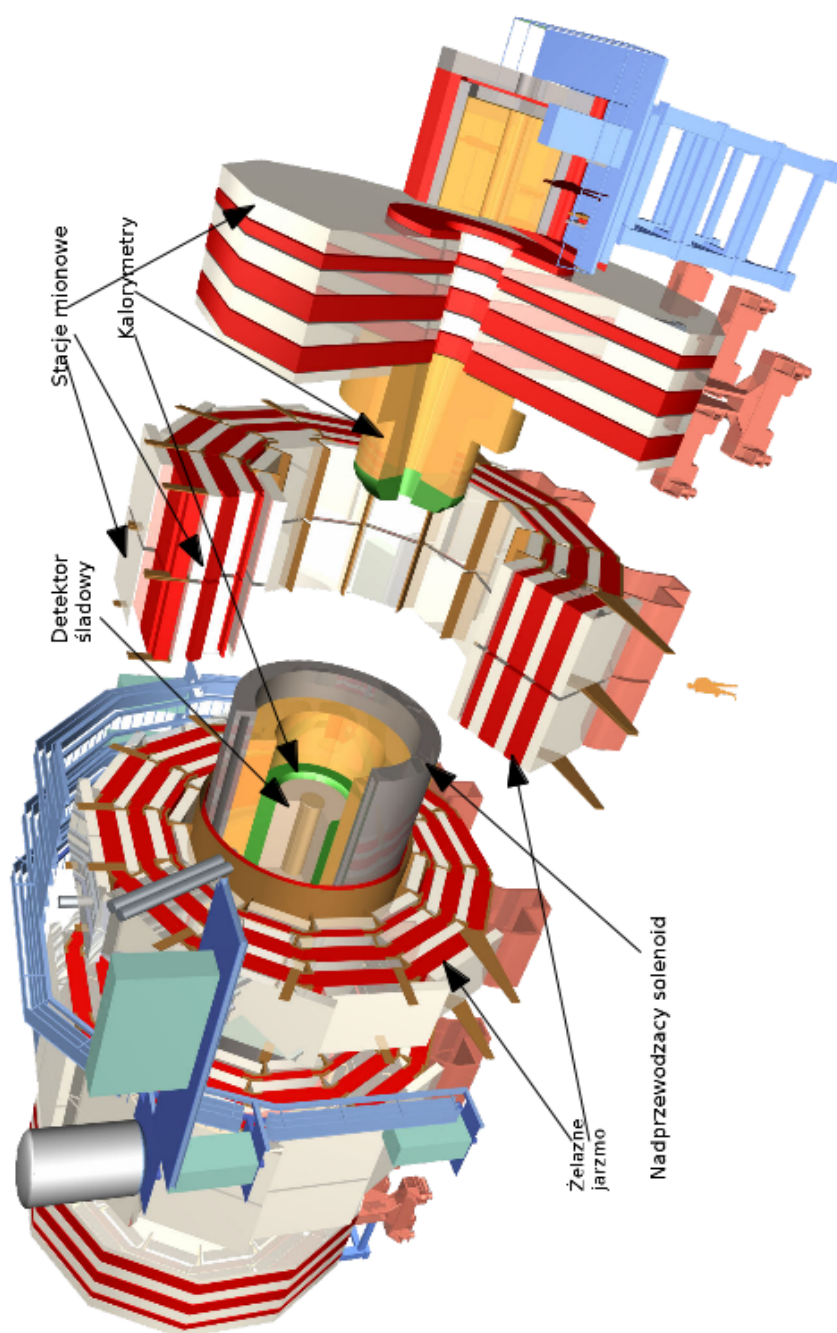
Detektor CMS (Compact Muon Solenoid) jest detektorem ogólnego zastosowania [2],[9]. Wewnątrz detektora pole magnetyczne o natężeniu 3.8T, wytwarzane przez magnes nadprzewodzący, skierowane jest wzdłuż osi wiązek i ma kształt solenoidalny. W stalowym jarzmie zwrotnym magnesu pole magnetyczne ma przeciwny zwrot w stosunku do wnętrza detektora, a jego natężenie wynosi w przybliżeniu 2T (Rysunek 1.3). Pomędzy warstwami stali składającymi się na jarzmo zwrotne magnesu umieszczone są detektory mionowe.



Rysunek 1.3: Przekrój detektora prostopadły do osi wiązek z zaznaczonymi przykładowymi śladami mionów o różnych pędach.

Najbliżej punktu oddziaływania znajduje się krzemowy detektor pikselowy złożony z 65 milionów pikseli o wymiarach $150 \mu m \times 150 \mu m \times 250 \mu m$. Detektor pikselowy otoczony jest krzemowym paskowym detektorem śladowym składającym się z 10 milionów podłużnych sensorów pogrupowanych w 10 warstw. Dane z detektorów pikselowego i paskowego pozwalają na dokładne określenie punktu oddziaływania, położenia wierzchołków wtórnych i pędów cząstek naładowanych, powstających w

zderzeniach. Kolejną warstwę stanowi kalorymetr elektromagnetyczny zbudowany z 68000 kryształów wolframianu ołowiu mierzący energię fotonów i elektronów. Zaś następną tworzy kalorymetr hadronowy zbudowany z kilkudziesięciu warstw plastikowych scyntylatorów oddzielonych warstwami mosiądzu, który mierzy energię hadronów. Zewnętrzną warstwę detektora stanowią podsystemy mionowe wyspecjalizowane w wykrywaniu mionów. Widok całego detektora przedstawiony jest na Rysunku 1.4).



Rysunek 1.4: Widok detektora CMS [10].

1.3. Trygery detektora CMS

Ze względu na duży całkowity przekrój czynny na zderzenia proton–proton, oddziaływań zachodzących w CMS jest tak wiele, że dane otrzymywane z detektorów muszą, przed zapisaniem, być poddawane selekcji [11] [12]. Zapis i analiza wszystkich danych jest technicznie niemożliwa.

System wyzwalania (tryger) detektora CMS jest dwustopniowy i pozwala zredukować początkową częstość przypadków z 20 MHz (40MHz przy pełnej świetłości) do wartości rzędu 100 Hz, umożliwiając zapisanie ich przez System Akwizycji Danych (DAQ).

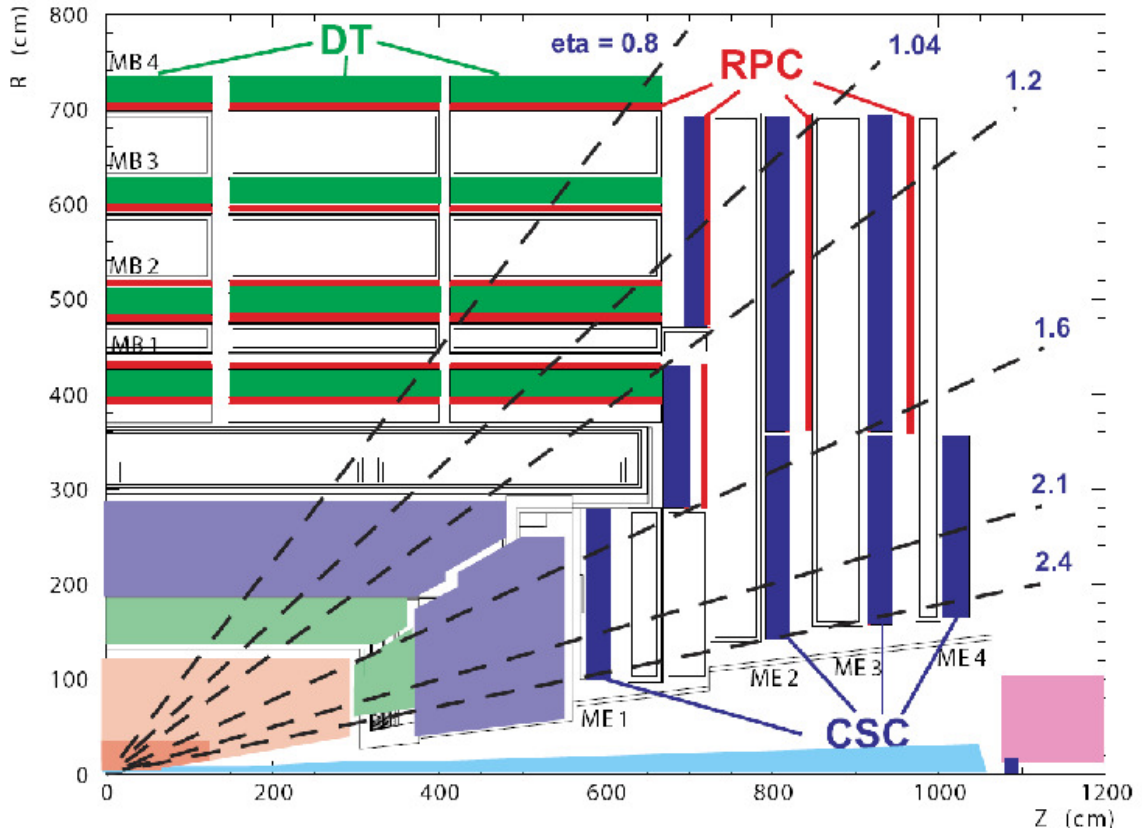
Wstępna selekcja zachodzi w realizowanym przez dedykowaną elektronikę układzie wyzwalania pierwszego poziomu (TriggerLevel1, L1). Ze względu na zaprojektowaną pojemność buforów przetwarzania potokowego, system ma mniej niż $3\mu s$ na podjęcie decyzji o przepuszczeniu lub odrzuceniu przypadku. Na tym etapie wykorzystywane są tylko zgrubne, szybko dostępne dane z kalorymetrów i detektorów mionowych. Strumień danych po wyjściu z trygera L1 jest obecnie rzędu 60 kHz i nie może przekroczyć 100kHz. Następnie przypadki są analizowane przez układ wyzwalania wyższego poziomu (High Level Trigger, HLT), który na podstawie pełnych danych ze wszystkich detektorów podejmuje ostateczną decyzję o zapisaniu lub odrzuceniu przypadku. HLT realizowany jest przez przeznaczony do tego celu klaster komputerowy, dzięki takiemu rozwiązaniu HLT potrafi wykrywać złożone sygnatury.

1.3.1. Tryger mionowy

Charakterystyczne dla wielu dotychczas nieobserwowanych procesów jest występowanie w stanach końcowych wysokoenergetycznych leptonów. Dotyczy to zarówno zjawisk przewidywanych przez Model Standardowy np. bozon Higgsa jak i wykracających poza niego. Miony jako cząstki przenikliwe są stosunkowo łatwe do identyfikacji, ponieważ jako praktycznie jedyne cząstki naładowane docierają z punktu oddziaływania do zewnętrznych warstw detektora poprzez kalorymetry oraz stalowe jarzmo magnesu. Z tych powodów tryger mionowy jest bardzo ważną częścią systemu wyzwalania detektora CMS.

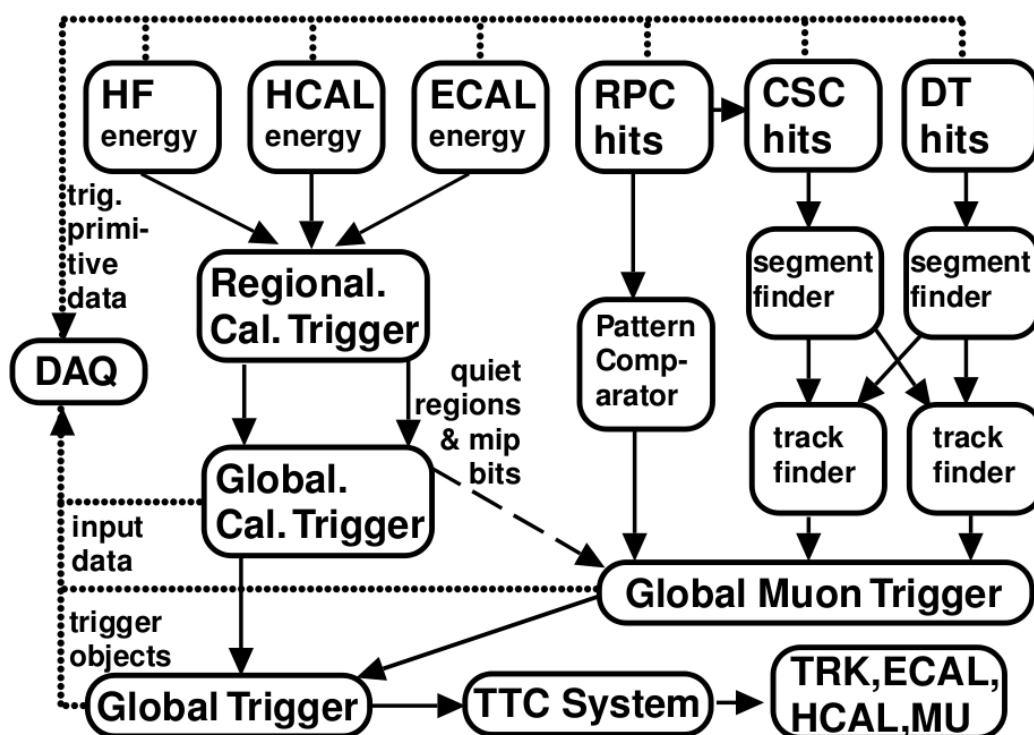
System wyzwalania na miony, Global Muon Trigger (GMT), w detektorze CMS wchodzi w skład Trigger L1 (Rysunek 1.6) i składa się z trzech części: części opartej

o komory dryfowe (Drift Tube) pokrywające środkową część detektora – beczkę ¹ (ang. barrel) $|\eta| < 1.2$, z części opartej o komory CSC (Cathode Strip Chambers) w wiezkach (ang. endcaps) $0.8 < |\eta| < 1.6$ i z części RPC (Resistive Plate Chambers) pokrywającej zarówno beczkę jak i wiezka $|\eta| < 1.6$ (Rysunek 1.5). GMT wybiera 4 miony o najwyższym pędzie spośród mionów dostarczonych przez trzy podsystemy. Rysunek 1.6 zawiera schemat działania i przepływ danych pomiędzy podsystemami tworzącymi GMT.



Rysunek 1.5: 1/4 przekroju podłużnego detektora CMS z zaznaczonymi systemami mionowymi. Kolorem zielonym zaznaczono komory DT (Drift Tube), niebieskim – CSC (Cathode Strip Chambers), a czerwonym – RPC (Resistive Plate Chambers)[11]

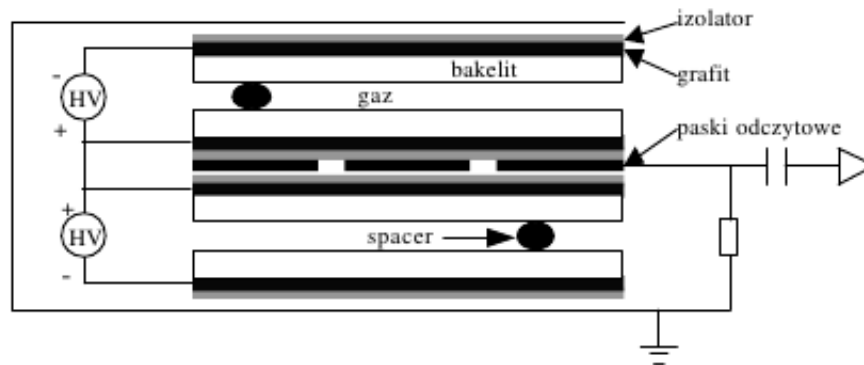
¹Pseudopęd $\eta = -\ln \tan \theta/2$ jest miarą kąta polarnego θ



Rysunek 1.6: Schemat układu wyzwalania pierwszego stopnia opisujący przepływ danych między elementami w poszczególnych podsystemach [11]. Decyzja globalnego trygera Level 1 jest podejmowana na podstawie informacji z globalnych trygerów: kalorymetrycznego i mionowego. Globalny tryger mionowy przetwarza dane z trzech systemów (DT, RPC, CSC) i przesyła dalej najwyżej cztery najlepsze mionowe kandydaty.

1.3.2. Tryger mionowy RPC

Komory RPC składają się z dwóch warstw izolatora – bakelitu. Pomiedzy warstwami znajduje się mieszanina gazów złożona w większości z $C_2H_2F_4$. Zewnętrzne warstwy bakelitu pokryte są warstwą grafitu tworzącego elektrody, które podłączone są do źródła wysokiego napięcia. W celu zwiększenia efektywności każda warstwa detekcyjna RPC złożona jest z dwóch takich komór (double gap), pomiędzy którymi umieszczone są przewodzące, skierowane wzdłuż osi wiązki paski pozwalające na odczytywanie sygnałów wzbudzonych przez przechodzące przez gaz naładowane cząstki (Rysunek 1.7). Komory RPC charakteryzują się bardzo dobrą rozdzielczością czasową rzędu nanosekund. W celu ustawienia właściwych punktów pracy komór RPC mierzone są: napię-

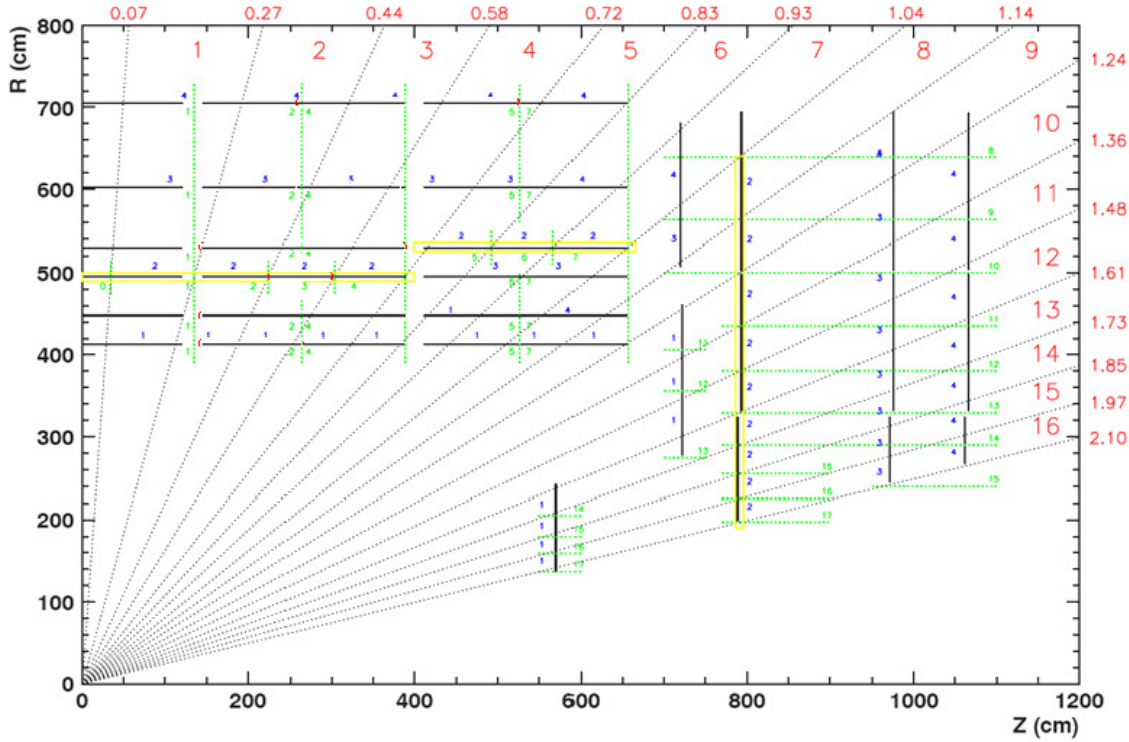


Rysunek 1.7: Schemat budowy komory RPC.

cia komór, ciśnienie gazu roboczego, temperatura, wilgotność. Pozwala to na korektę napięć w komorach w następnym cyklu zbierania danych.

Sygnały z komór RPC są zbierane przez znajdujące się bezpośrednio przy komorach układy elektroniki odczytu (Front-End Boards, FEB) i przesyłane do układów odpowiedzialnych za dalszą propagację sygnałów (LinkBoard, LB). Do obsługi danych z jednej komory potrzeba od 3 do 6 FEBów. Rolą LinkBoard jest kompresja danych spływających z FEB i przekazanie ich poprzez układy powielające sygnał optyczny (spliter) do odpowiednich płyt z elektroniką trygera (TriggerBoard, TB). Komory RPC są podzielone na 25 wież względem η (Rysunek 1.8) i na 12 sektorów względem ϕ . Obszar detektora ograniczony do jednego sektora w ϕ i wieży w η jest nazywany stożkiem logicznym. Każdemu ze stożków logicznych odpowiada jeden ob-

sługujący go komparator PAC (PAttern Comparator). Cały system PAC składa się z 84 płyt TriggerBoard, 1224 płyt LinkBoard i obsługuje prawie 100000 kanałów z blisko tysiąca komór RPC. Dodatkowo system zawiera blisko 200 płyt sterujących pracą LinkBoard (ControlBoard, CB).



Rysunek 1.8: Schemat rozmieszczenia komór RPC w detektorze CMS. Kolorem czerwonym (od 1-16) opisano wieże, kolorem żółtym zaznaczono płaszczyzny referencyjne. Rysunek przedstawia pełną wersję systemu, obecnie system składa się jedynie z wież od -12 do 12 i nie posiada czwartej warstwy komór w wieżkach

Od idealnego systemu wyzwalania oczekujemy: selektywności i efektywności. Oznacza to, że idealny tryger powinien odrzucać wszystkie przypadki niespełniające określonego kryterium pozostawiając wszystkie przypadki spełniające to kryterium. Warunkiem fizycznym testowanym przez system PAC jest przejście mionu z pędem poprzecznym większym od zadanego progu, obecnie jest on równy 16 GeV. Dlatego tak ważne dla selektywności układu wyzwalania jest prawidłowe przypisywanie wartości p_T do mionu. System PAC zwraca wartość pędu poprzecznego w postaci pięciobitowego słowa (kod pędowy). Tabela 1.1 przedstawia mapowanie kodów pędowych na

wartości pędu poprzecznego.

Tryger RPC jest oparty o algorytm PAC polegający na porównywaniu śladów zostawionych przez miony z zapisanym w programowalnych układach logicznych typu FPGA (Field Programmable Gate Array) zestawem wzorców. Co 25 ns tryger RPC wyszukuje do czterech mionów o najwyższym pędzie poprzecznym w beczce i w wiecach [13, 14].

Ze względu na ograniczoną pojemność układów FPGA, z których wykonana jest elektronika układu wyzwalania, pojedynczy układ PAC jest w stanie pomieścić kilkanaście tysięcy wzorców, nie wszystkie możliwe wzorce są w niej zapisane. Procedura generowania wzorców oparta jest na symulacjach Monte Carlo. Dla każdego z przedziałów pędowych (Tabela 1.1) wybierane są najczęściej występujące wzorce tak, aby uzyskać efektywność równą lub większą od 95%. Jeżeli w układzie FPGA nie zmieściłyby się wszystkie tak wybrane wzorce, to te o najniższym kodzie pędowym są grupowane [15]. Grupowanie polega na zastąpieniu kilku wzorców różniących się pozycją zapalonego paska w pojedynczej płaszczyźnie przez jeden wzorec będący ich sumą logiczną. Powoduje to znaczące zmniejszenie liczby bramek logicznych niezbędnych do ich zapisania, kosztem pogorszenia rozdzielczości przestrzennej odpowiedzi trygera.

Pt Code	Pt [GeV]	Pt Code	Pt [GeV]	Pt Code	Pt [GeV]	Pt Code	Pt [GeV]
0	0	8	4.5	16	16	24	50
1	0	9	5.0	17	18	25	60
2	1.5	10	6.0	18	20	26	70
3	2.0	11	7.0	19	25	27	80
4	2.5	12	8.0	20	30	28	90
5	3.0	13	10	21	35	29	100
6	3.5	14	12	22	40	30	120
7	4.0	15	14	23	45	31	140

Tabela 1.1: Dolne granice kodów pędowych trygera RPC. Kod pędowy 0 odpowiada brakowi mionu i nie jest obecnie wykorzystywany przez system PAC.

2. Efektywność i selektywność trygera RPC

Efektywność trygera można zdefiniować jako stosunek liczby wyzwolonych przez tryger przypadków z mionami do wszystkich przypadków, w których występowały miony. Efektywność zależy od η i ϕ mionu, jego pędu oraz od aktualnego stanu detektora: komór RPC, systemu linkowego, układów trygera i systemu akwizycji danych. Podczas pracy komór RPC jest jednocześnie monitorowana liczba wzbudzeń każdej z komór, co umożliwia dynamiczne wyłączanie szumiących elektrod odczytu (maskowanie pasków).

2.1. Efektywności i selektywności trygera PAC

W pracy starałem się wyznaczyć bezpośrednio z danych parametry opisujące efektywność i selektywność systemu PAC. Wartość ϵ_{PAC} charakteryzuje jakość używanych wzorców. W celu obliczenia ϵ_{PAC} należy porównać odpowiedź rzeczywistego systemu PAC z odpowiedzią systemu, który posiadałby wszystkie możliwe wzorce. W tym celu dane z komór RPC zostały użyte do emulowania odpowiedzi systemu PAC z pełnym zestawem wzorców (Wide Patterns). Pełen zestaw wzorców wymaga jedynie koincydencji sygnału z czterech z spośród sześciu płaszczyzn albo z trzech dla wzorców nisko pędowych lub o dużej wartości η . Tylko miony których ślady, pozostawione w komorach RPC odpowiadają przynajmniej jednemu z szerokich wzorców mogą spowodować wyzwolenie trygera PAC i są nazywane "PAC Triggerable Muons".

Najprostszą metodą wyznaczania efektywności trygera jest porównanie jego odpowiedzi z odpowiedziami pozostałych systemów detekcji mionów. Taka metoda umożliwia wyeliminowanie nieefektywności detekcji każdego z podsystemów, ponieważ są one od siebie niezależne. Niestety pokrycia geometryczne, poszczególnych podsystemów są ze sobą powiązane. Wariantem tej metody przedstawionym w tej pracy jest analiza trygerów RPC względem zrekonstruowanych mionów w próbie MinimumBias. Używanie danych MinimumBias zmniejsza wpływ obciążeń od systemów wyzwalań.

Inną metodą używaną do wyznaczania efektywności jest metoda "tag and probe" (znacznik-próba). Pozwala ona mierzyć efektywność systemu wyzwalań z uwzględ-

nieniem efektywności geometrycznej detektora oraz z pominięciem obciążeń wynikających z błędnej identyfikacji cząstek. Analiza "tag and probe" polega na badaniu mionów pochodzących z rozpadów dobrze poznanych rezonansów takich jak J/Ψ , Z^0 . Wadą tej metody jest konieczność przeprowadzania analiz na danych poddanych mocnym cięciom, co może przekładać się na uzyskiwane wyniki. Metoda ta nie mogła być wykorzystana do analizy efektywności wzorców PAC ze względu na zbyt małą liczbę zarejestrowanych przypadków w rozpatrywanym okresie.

2.2. Podział efektywności

Dla ułatwienia wyznaczenia i analizy efektywności trygera RPC można zapisać w postaci iloczynu dwóch wielkości, które są niezależne.

$$\epsilon = \epsilon_{HW} * \epsilon_{PAC} \quad (2.1)$$

Gdzie ϵ_{PAC} oznacza efektywność wzorców i odpowiada prawdopodobieństwu znalezienia wzoru zapaleń pozostawionego przez cząstkę wśród wzorców zapisanych w elektronice systemu PAC, zaś ϵ_{HW} to łączna efektywność sprzętu realizującego tryger RPC.

$$\epsilon_{HW} = \epsilon_{acceptance} * \epsilon_{chambers} * \epsilon_{synchronization} * \epsilon_{data_taking} \quad (2.2)$$

$\epsilon_{acceptance}$ Ułamek liczby mionów jaki przetnie wystarczającą liczbę płaszczyzn (przynajmniej 3 dla wzorców nisko pędowych i wzorców o dużym η lub 4 dla baryły) w stożku logicznym. Wartość $\epsilon_{acceptance}$ jest stała dla mionów o ustalonym rozkładzie pędów i kierunków.

$\epsilon_{chambers}$ Prawdopodobieństwo, że mion przechodzący przez komorę RPC zostawi sygnał. Wartość $\epsilon_{chambers}$ zależy również do wydajności FEB-ów i od liczby uszkodzonych lub czasowo wyłączonych z pracy pasków lub całych komór.

$\epsilon_{synchronization}$ Prawdopodobieństwo, że sygnały pozostawione przez mion dotrą do PAC w odpowiednim czasie i zostaną przypisane do właściwego przecięcia wiązek (ang. BunchCrossing, BX). Obecnie jest ono bliskie 100%.

ϵ_{data_taking} Określa prawdopodobieństwo z jakim dane z komór zostaną w prawidłowy sposób przetworzone i dostarczone z Link Boards do PAC

2.3. Selekcja przypadków i zastosowane cięcia

Całość analizy została przeprowadzona na danych MinimumBias. Dane tego typu są wyzwalane przez zestaw odpowiednich trygerów HLT, Tabela 2.3 przedstawia te trygery wraz z trygerami Level1, na których są oparte.

HLT_path	L1_seed
HLT_60Jet10_v1	L1_DoubleForJet32_EtaOpp
HLT_70Jet10_v1	L1_DoubleForJet32_EtaOpp
HLT_70Jet13_v1	L1_DoubleForJet32_EtaOpp
HLT_JetE30_NoBPTX3BX_NoHalo_v10	L1_SingleJet20_Central_NotBptxOR_NotMuBeamHalo
HLT_JetE30_NoBPTX_NoHalo_v10	L1_SingleJet20_Central_NotBptxOR_NotMuBeamHalo
HLT_JetE30_NoBPTX_v8	L1_SingleJet20_Central_NotBptxOR
HLT_JetE50_NoBPTX3BX_NoHalo_v5	L1_SingleJet32_NotBptxOR_NotMuBeamHalo
HLT_Physics_v2	-
HLT_PixelTracks_Multiplicity100_v7	L1_ETT220
HLT_PixelTracks_Multiplicity80_v7	L1_ETT220
HLT_Random_v1	-
HLT_ZeroBias_v4	L1_ZeroBias

Tabela 2.1: Nazwy ścieżek trygerów HLT i ich bazowe trygery L1 wykorzystywane do zbierania danych MinimumBias.

Wykorzystywane trygery bazują na następujących trygerach pierwszego stopnia:

- L1_ZeroBias - tryger wyzwalany przejściem wiązek przez detektor
- L1_DoubleForJet32_EtaOpp - wymaganie dwóch przeciwbieżnych jetów o energii przynajmniej 32GeV każdy
- L1_ETT220 - tryger oparty o pomiar całkowitej energii poprzecznej z progiem 220 GeV.
- Trygery techniczne (L1_SingleJet20_Central_NotBptxOR_NotMuBeamHalo, L1_SingleJet32_NotBptxOR_NotMuBeamHalo) – oparte o odpowiednie koincidencje tygerów jetowych i sygnałów z detektorów monitorujących wiązki BPTX.

Taki wybór trygerów pozwala na zbieranie danych (brak trygerów mionowych, różne warunki wyzwalania) w minimalny sposób obciążonych przez detektor i sys-

temy wyzwalania. Z punktu widzenia przeprowadzanej analizy istotne jest, że żaden z używanych trygerów nie bazuje na mionowych systemach wyzwalania.

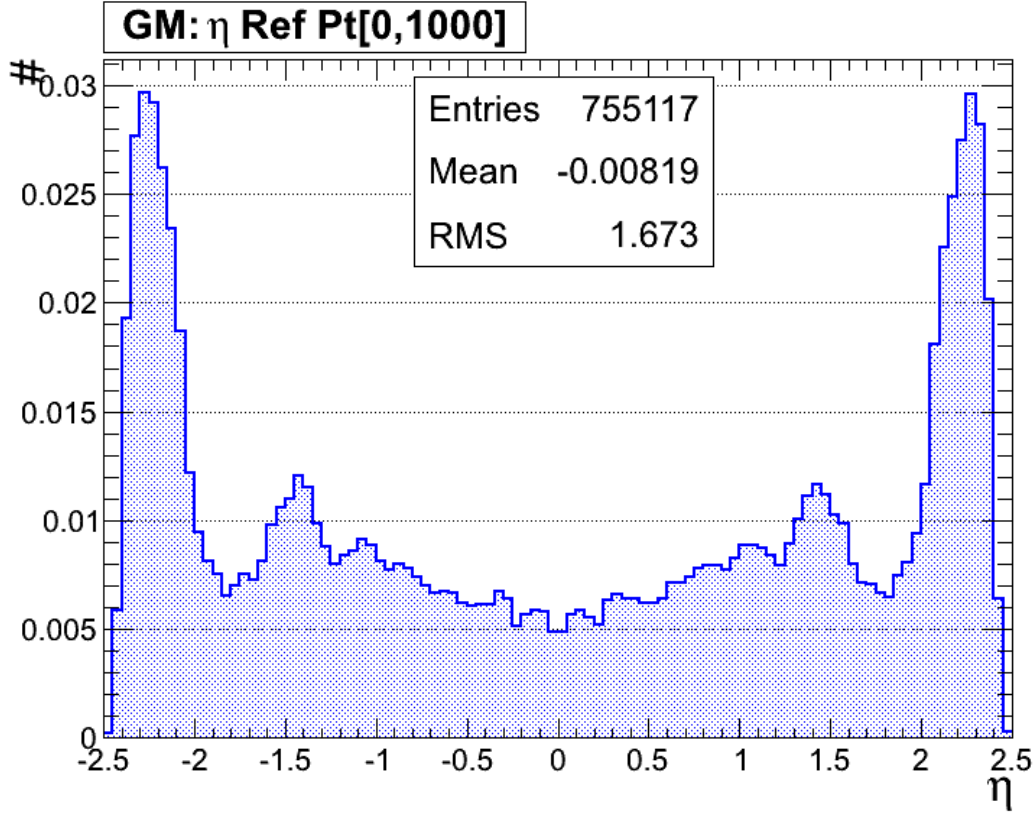
We wstępnej selekcji wymagano dobrej rekonstrukcji wierzchołka pierwotnego: pozycja wzdłuż osi detektora oddalona o mniej niż $15\mu m$ i odległości radialnej od wiązki d_0 mniejsze niż $2\mu m$

Dalszej analizie poddawane były jedynie te przypadki, w których zrekonstruowany tor mionu pasował do sygnałów w podsystemach detekcji mionów i w detektorze śladowym (GlobalMuon). W celu wyeliminowania sygnałów pochodzących z przebieg kaskad hadronowych z kalorymetrów i mionów pochodzących z rozpadów w locie żądano dodatkowo:

- Poprawnej rekonstrukcji kierunku lotu mionu
- Parametr zderzenia mniejszy niż 0.2 mm (odległość wierzchołka wtórnego od wiązki)
- Wartości χ^2 dopasowania toru mionu mniejszej niż 10 (na stopień swobody)
- Użycia śladów z podsystemów mionowych w rekonstrukcji toru mionu.

Rozkłady liczby mionów po zastosowanych cięciach są przedstawione na Rysunkach 2.1 i 2.2. Pomimo używania danych MinimumBias sam proces rekonstrukcji mionu (wymaganie sygnałów w stacjach mionowych) wprowadza obciążenia w próbcę. Są tym spowodowane charakterystyczne nieciągłości w rozkładzie liczby mionów względem η ($|\eta| \approx 0.25$, $|\eta| \approx 0.6$) w obszarach gdzie nie ma systemów mionowych. Dużą część mionów stanowią miony o niskim pędzie poprzecznym i wartości η poza zakresem dostępnym dla trygera PAC. Przedstawione na Rysunku 2.2 rozkłady pędu poprzecznego mionów dla trzech obszarów detektora pokazują eksponencjalny spadek wraz ze wzrostem wartości pędu. Widać też większy udział mionów nisko pędowych w obszarze wieczek detektora.

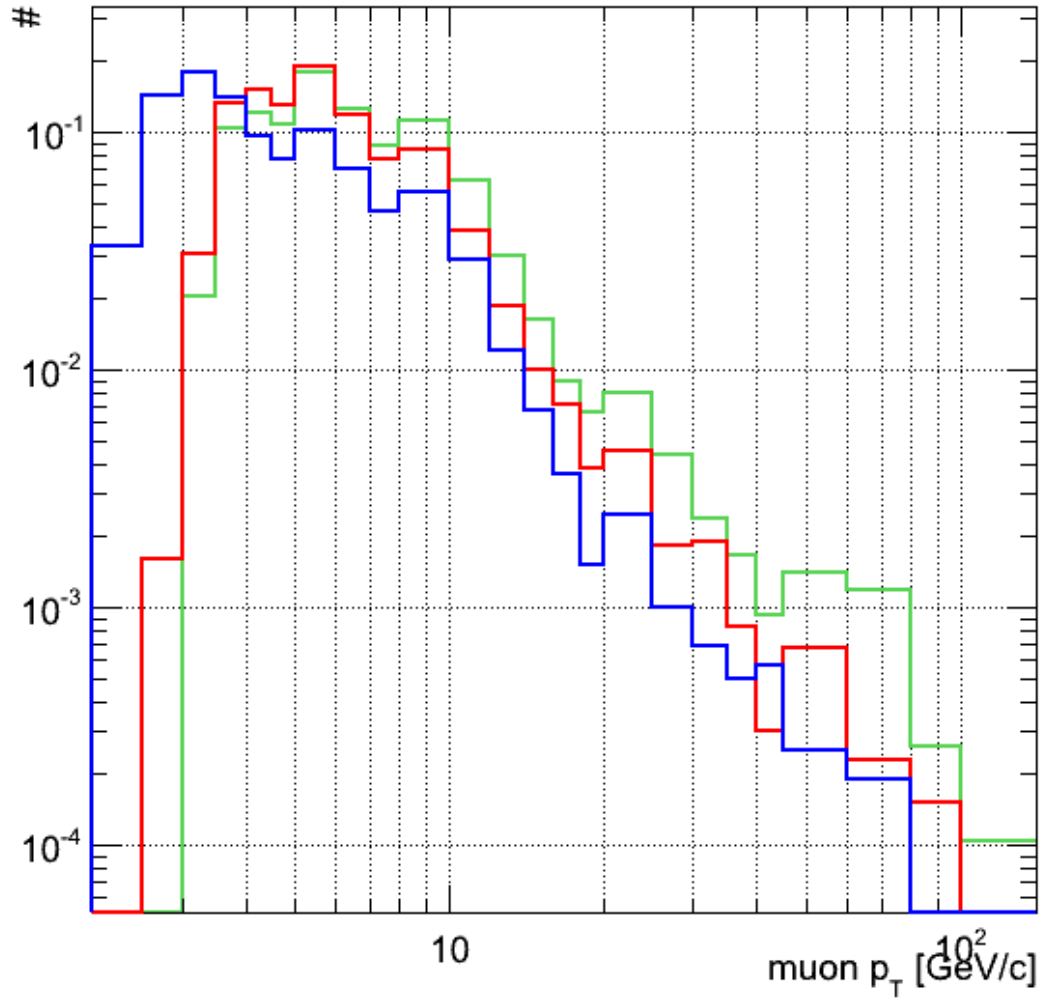
Rekonstrukcja mionów odbywa się off-line i jest niezależna od systemów wyzwalania, co sprawia, że zrekonstruowane cząstki nie zawierają informacji o związanych z nimi trygerach. Dlatego dla każdego zrekonstruowanego mionu poszukiwano pasujących przestrzennie sygnałów z systemów wyzwalania w celu skojarzenia ich ze sobą. W tym celu ekstrapolowano tor lotu mionu z punktu oddziaływania do drugich



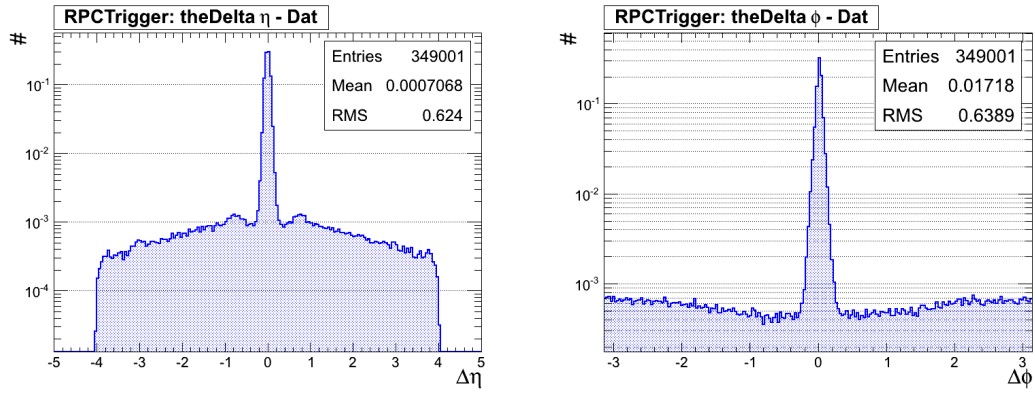
Rysunek 2.1: Rozkład liczby mionów w zależności od η .

stacji mionowych, uwzględniając rozkład natężenia pola magnetycznego w detektorze. Miarą odległości między sygnałem z trygera, a zrekonstruowanym mionem może być ΔR zdefiniowana jako $\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2}$. Rozkłady $\Delta\phi$, $\Delta\eta$, ΔR dla systemu zawierają Rysunki 2.3 i 2.7. Na rysunku 2.7 widać wyraźne maksima dla wartości $\Delta R \approx 0$ o szerokości podstawy 0.35 i tło pochodzące od trygerów niezwiązanych z zrekonstruowanym mionem. Wzrost liczby przypadków wraz z wielkością ΔR jest efektem czysto geometrycznym związanym z powiększaniem się pola pierścienia w przestrzeni $\eta\phi$. Analogiczne histogramy dla pozostałych systemów i emulatora trygera PAC z szerokimi wzorcami przedstawiają Rysunki 2.4 – 2.6 i 2.8 – 2.10.

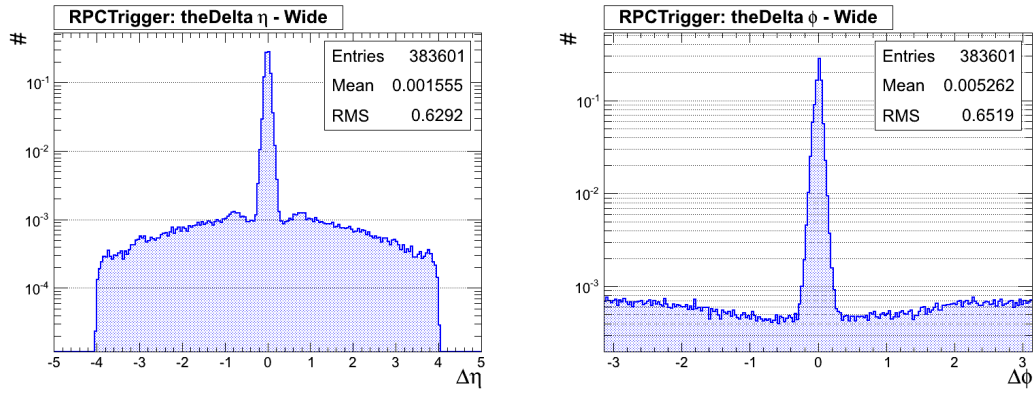
Na podstawie Rysunków 2.7 – 2.10 przyjęto wartość $\Delta R = 0.35$ jako wartość graniczną przypisania trygera L1 do zrekonstruowanego mionu. Przyjmowano, że dla odległości $\Delta R < 0.35$ sygnał z podsystemów L1 następował na skutek przejścia mionu zrekonstruowanego i spełniającego żądane warunki.



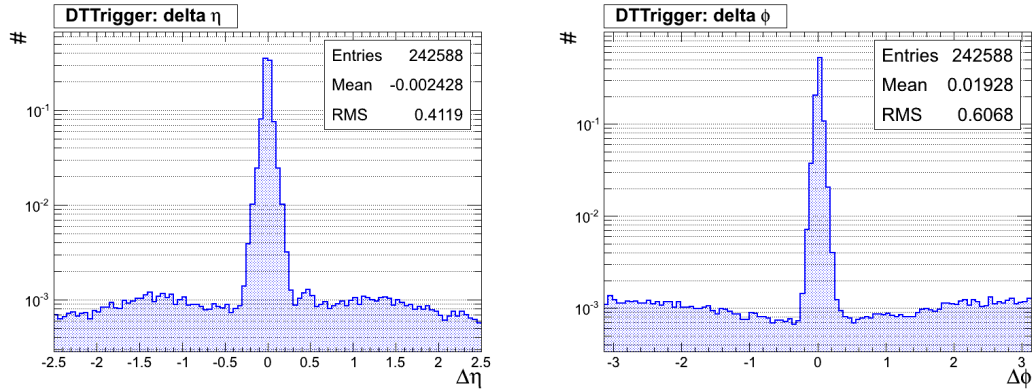
Rysunek 2.2: Widmo pędowe mionów po zastosowanych cięciach. Kolor zielony obszar centralny detektora ($|\eta| < 0.83$), kolor czerwony obszar przejściowy detektora ($0.83 \leq |\eta| < 1.24$), kolor niebieski obszar wieżek detektora ($1.24 \leq |\eta| < 1.61$).



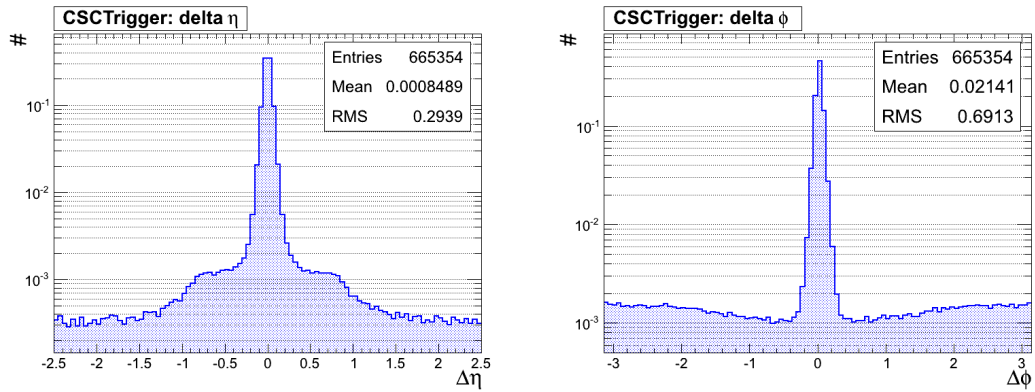
Rysunek 2.3: Rozkłady różnic $\Delta\phi$, $\Delta\eta$ między kandydatem z systemu RPC a Global Mionem. Rysunek po lewej stronie przedstawia różnice między wartością kąta ϕ zrekonstruowanego mionu w drugiej stacji mionowej, a wartościami ϕ trygerów RPC w przypadku, rysunek prawy analogicznie dla η .



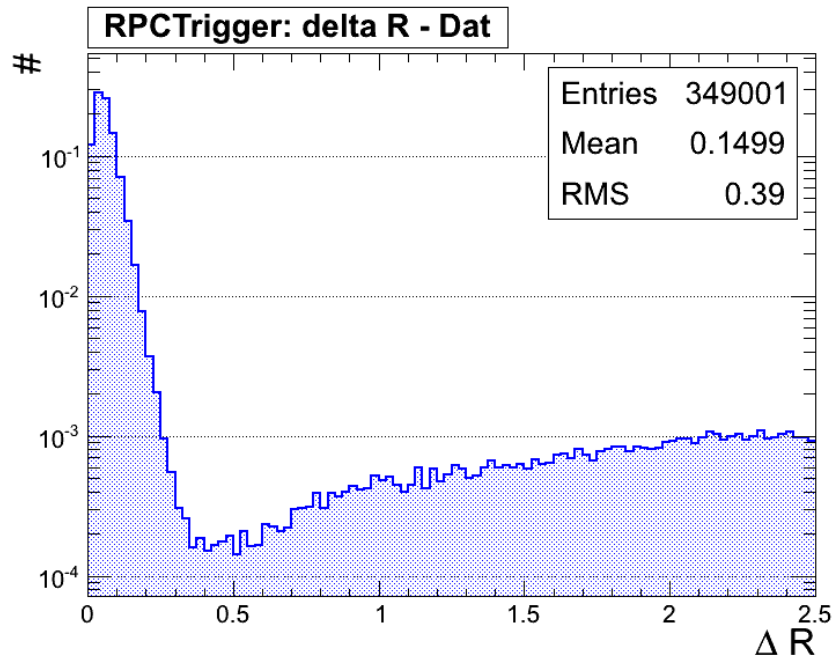
Rysunek 2.4: Rozkłady różnic $\Delta\phi$, $\Delta\eta$ między kandydatem z emulatora systemu RPC używającego szerokich wzorców a Global Mionem. Rysunek po lewej stronie przedstawia różnice między wartością kąta ϕ zrekonstruowanego mionu w drugiej stacji mionowej, a wartościami ϕ trygerów RPC w przypadku, rysunek prawy analogicznie dla η .



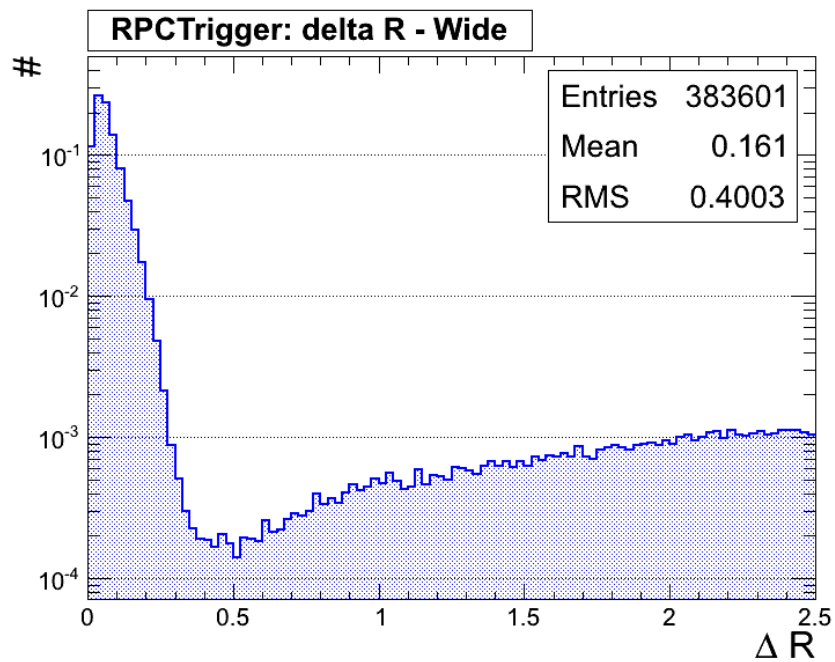
Rysunek 2.5: Rozkłady różnic $\Delta\phi$, $\Delta\eta$ między kandydatem z systemu DT a Global Mionem. Rysunek po lewej stronie przedstawia różnice między wartością kąta ϕ zrekonstruowanego mionu w drugiej stacji mionowej, a wartościami ϕ trygerów DT w przypadku, rysunek prawy analogicznie dla η .



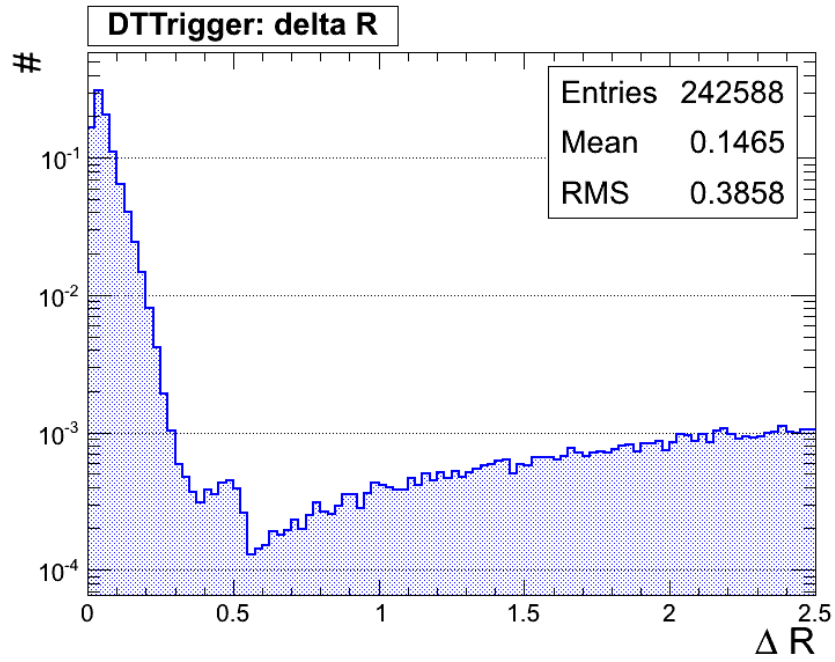
Rysunek 2.6: Rozkłady różnic $\Delta\phi$, $\Delta\eta$ między kandydatem z systemu CSC a Global Mionem. Rysunek po lewej stronie przedstawia różnice między wartością kąta ϕ zrekonstruowanego mionu w drugiej stacji mionowej, a wartościami ϕ trygerów CSC w przypadku, rysunek prawy analogicznie dla η .



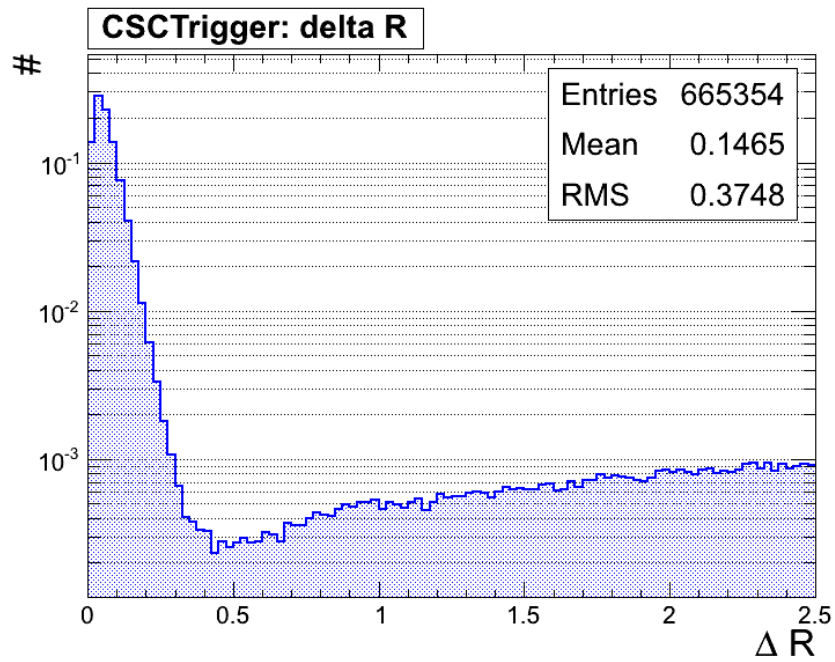
Rysunek 2.7: Rozkład ΔR między kandydatem z systemu RPC a Global Mionem.



Rysunek 2.8: Rozkład ΔR między kandydatem z emulatora systemu RPC używającego szerokich wzorców a Global Mionem.



Rysunek 2.9: Rozkład ΔR między kandydatem z systemu DT a Global Mionem.



Rysunek 2.10: Rozkłady ΔR między kandydatem z systemu CSC a Global Mionem.

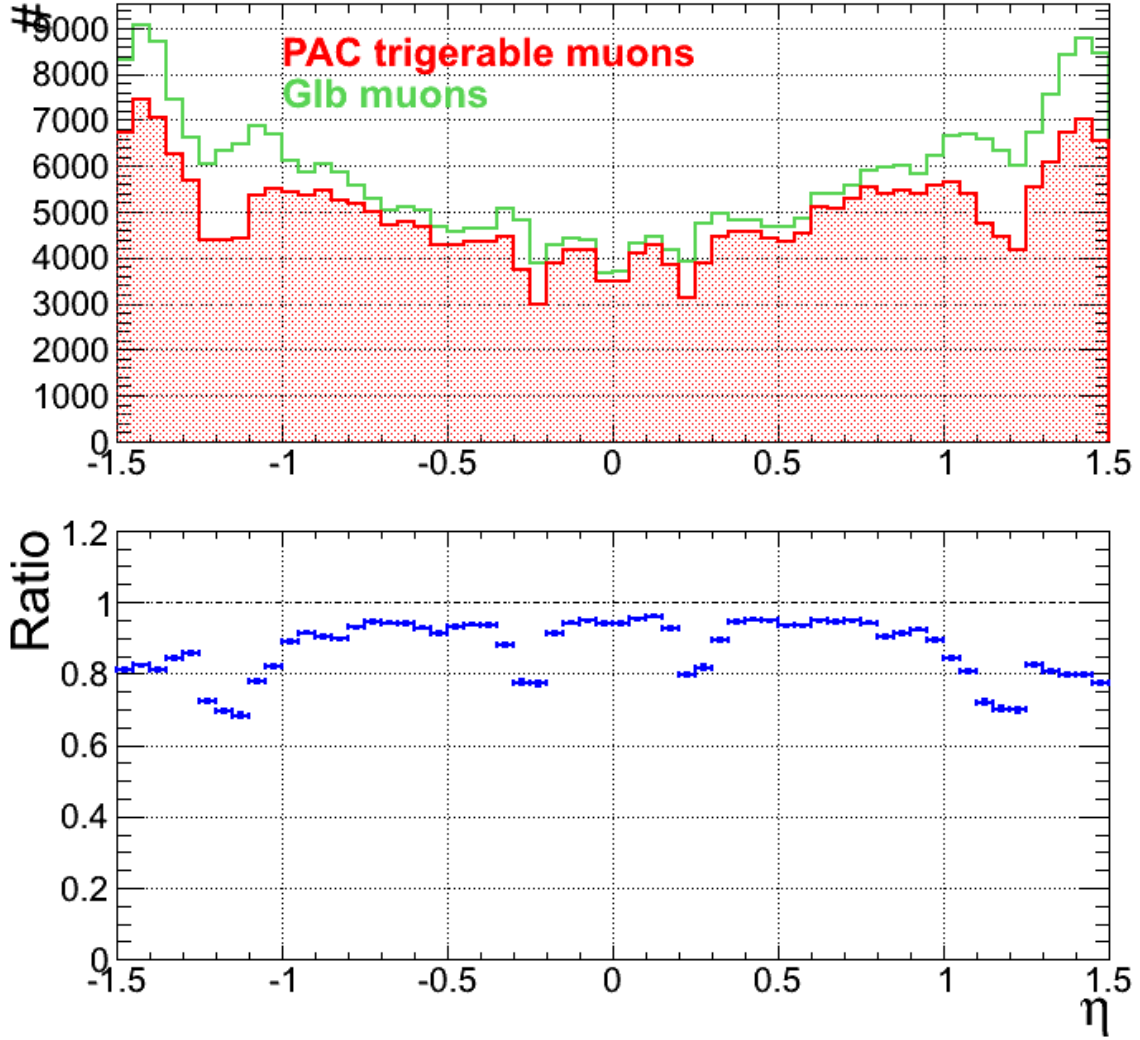
2.4. Wyznaczenie efektywności i selektywności trygera PAC

2.4.1. Estymacja efektywności ϵ_{HW}

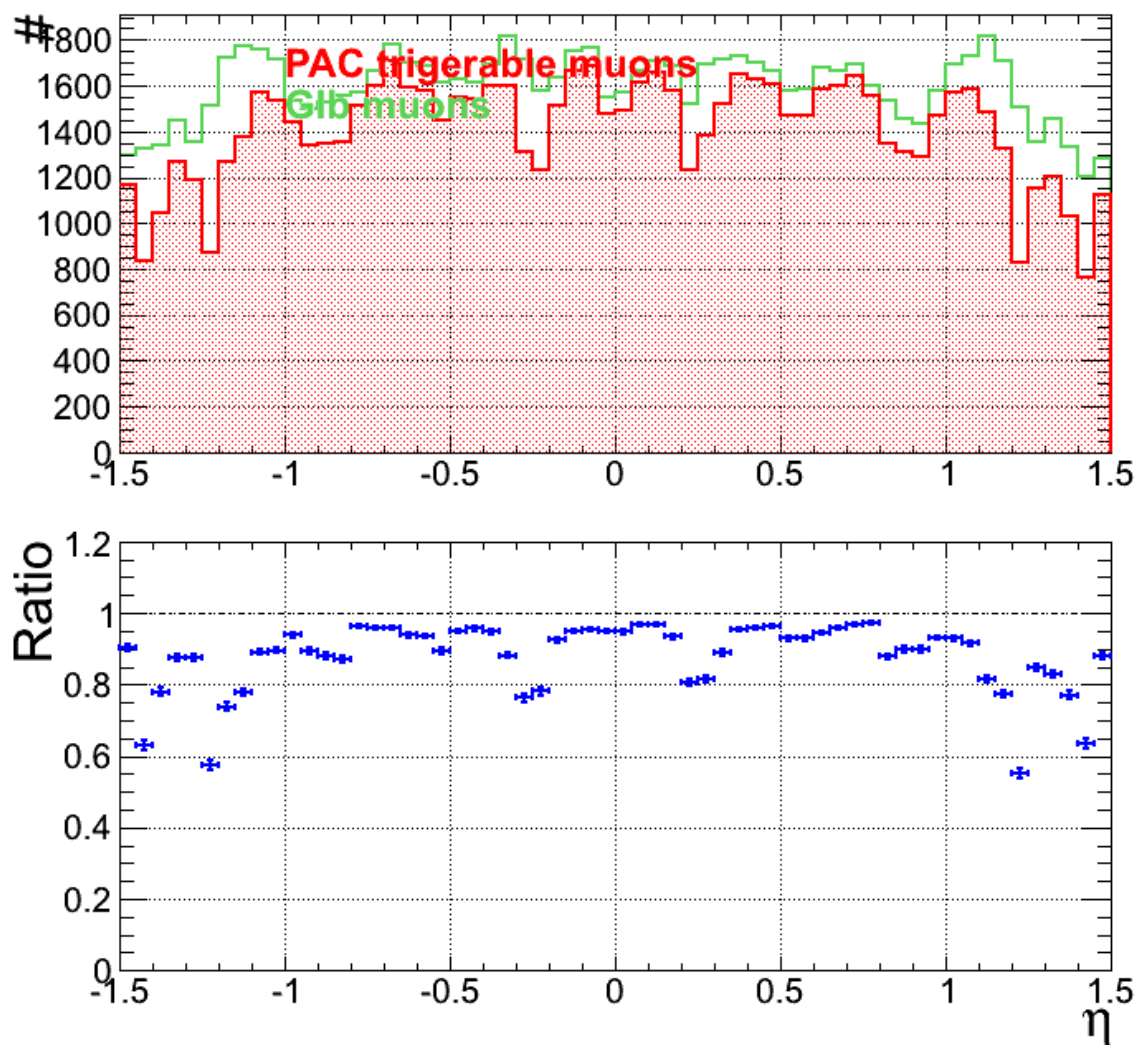
System PAC, aby móc potwierdzić z dostateczną pewnością przejście mionu, wymaga koincydencji sygnałów z przynajmniej czterech z sześciu płaszczyzn dla mionów o dużym pędzie poprzecznym, albo trzech z czterech dla mionów o niskim pędzie poprzecznym lub o dużych wartości $|\eta|$. Wykorzystanie emulatora systemu PAC z pełnym kompletem wzorców pozwala symulować pracę trygera o $\epsilon_{PAC} = 1$. Iloraz liczby mionów skojarzonych z emulatorem PAC do liczby wszystkich mionów jest wartością dobrze estymującą ϵ_{HW} . Jest to maksymalna efektywność jaką można osiągnąć tryger PAC przy danej efektywności komór i systemu akwizycji. Największy wpływ na wartości ϵ_{HW} ma efektywność geometryczna $\epsilon_{acceptance}$, następnie efektywność komór $\epsilon_{chambers}$.

Za estymatę efektywności sprzętowej przyjmujemy stosunek liczby wyselekcjonowanych globalnych mionów (Rozdział 2.3) skojarzonych z trygerem z emulatora (Rozdział 2.1) do liczby wszystkich wyselekcjonowanych mionów. Rozkłady tych wielkości, w zależności od pseudopośpieszności η , są przedstawione na górnym panelu Rysunku 2.11. Kolorem zielonym narysowany jest histogram liczby wyselekcjonowanych mionów (Glb muons) a kolorem czerwony histogram liczby wyselekcjonowanych mionów skojarzonych z odpowiedzią z emulatora (PAC triggerable muons). Na dolnym panelu narysowany jest stosunek tych histogramów, będący estymatą efektywności ϵ_{HW} w funkcji η . Wyraźnie widoczne jest obniżenie efektywności dla $\eta \approx \pm 0.25$ odpowiadającego obszarowi między kołem zerowym a kołem pierwszym (patrz schemat na Rysunku 1.8) oraz w obszarze przejściowym między beczką a pokrywami czyli dla $\eta \in [0.9, 1.2]$. Można zaobserwować też obniżoną efektywność w wieżkach detektora, która spowodowana jest faktem, że w tym obszarze tryger pracuje jedynie na trzech płaszczyznach. Rysunek 2.12 różni się od 2.11 jedynie dodatkowym wymaganiem, żeby pęd poprzeczny wyselekcjonowanych mionów był większy niż 7 GeV, powoduje to znaczące zmniejszenie liczby mionów w rejonie wieżek. Na dolnym panelu tego rysunku widać wyostrenie obszarów o obniżonej efektywności spowodowane mniejszym gięciem torów mionów o wyższym pędzie w płaszczyźnie $r\phi$. Można zaobserwować

również niewielki wzrost efektywności systemu w obszarach pełnego pokrycia geometrycznego (beczka).



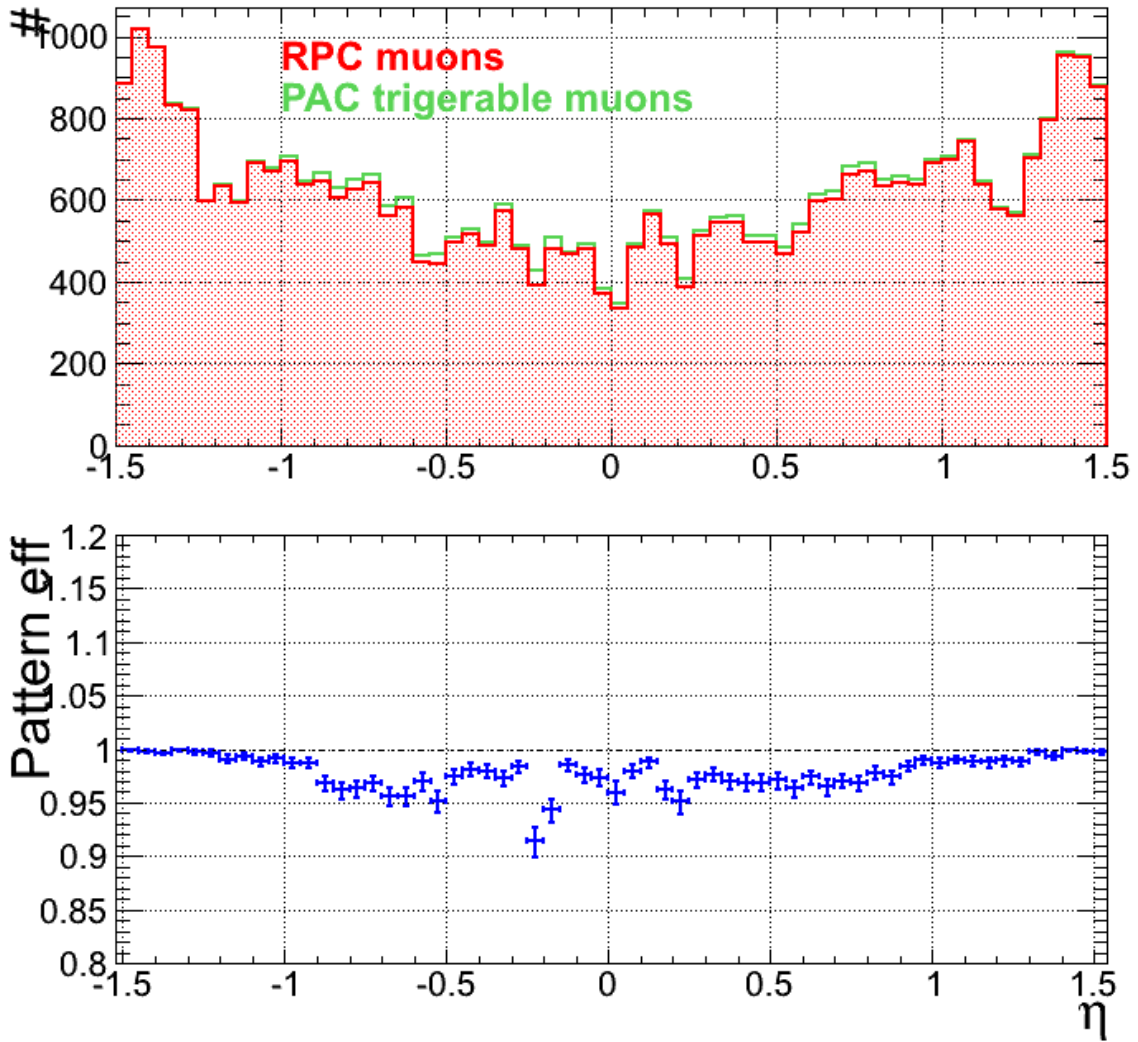
Rysunek 2.11: Górny panel. Histogramy liczby wyselekcjonowanych mionów w zależności od η (kolor zielony, Glb muons) oraz liczby mionów skojarzonych z emulatorem trygera (kolor czerwony, PAC triggerable muons). Dolny panel. Stosunek histogramów z górnego panelu. Estymata efektywności sprzętowej ϵ_{HW} w zależności od pseudopośpieszności η .



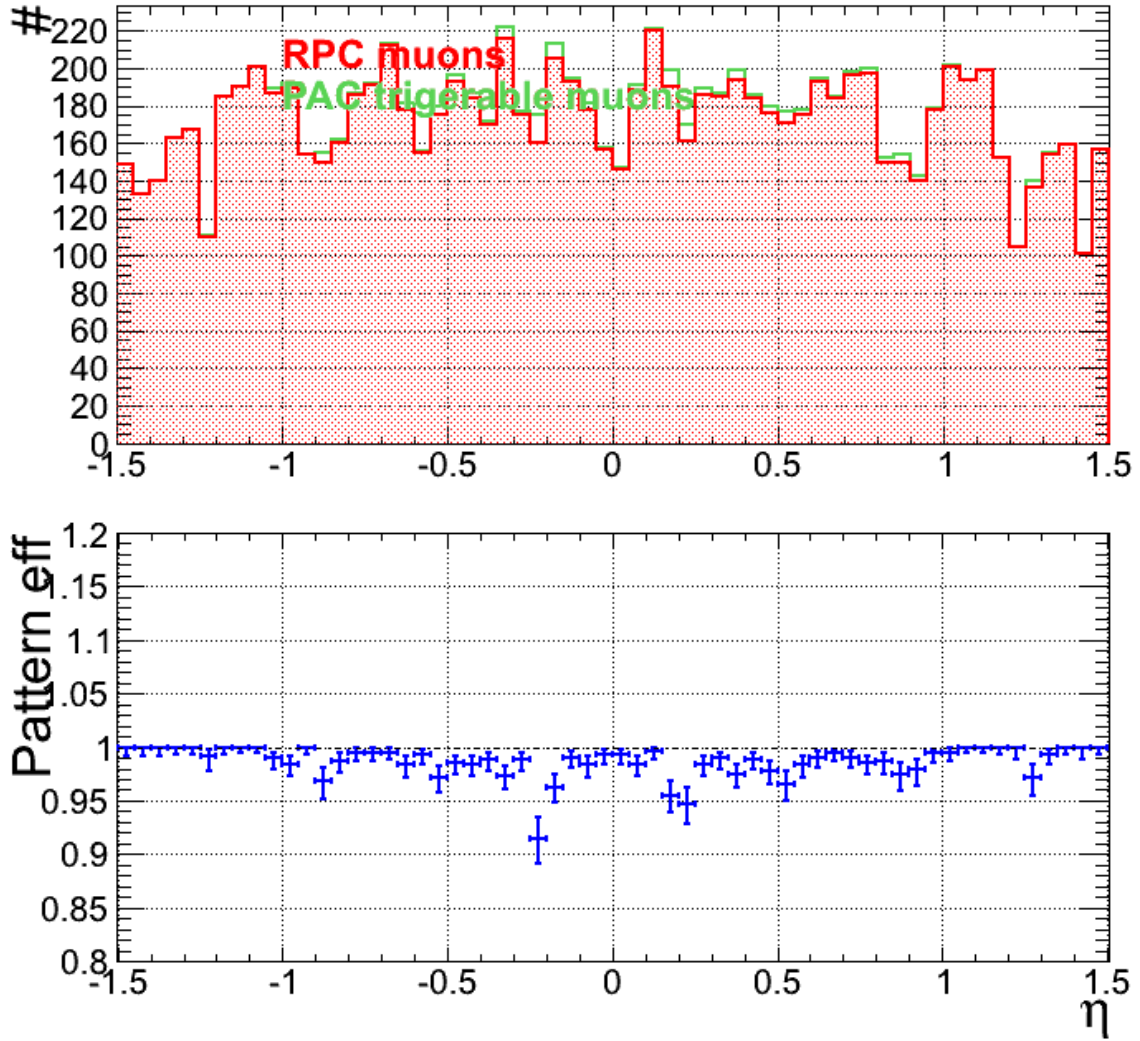
Rysunek 2.12: Górny panel. Histogramy liczby wyselekcjonowanych mionów o pędzie poprzecznym większym niż 7 GeV w zależności od η (kolor zielony, Glb muons) oraz liczby mionów skojarzonych z emulatorem trygera (kolor czerwony, PAC triggerable muons). Dolny panel. Stosunek histogramów z górnego panelu. Estymata efektywności sprzętowej ϵ_{HW} w zależności od pseudopośpieszności η dla $p_T > 7$ GeV.

2.4.2. Wyznaczenie efektywności ϵ_{PAC}

System tryger PAC daje możliwość zmiany wzorców wykorzystywanych do wyzwalania przypadków. Wyznaczenie bezpośrednio z danych efektywności ϵ_{PAC} pozwala na kontrolę procedury generowania wzorców i poprawnego działania całego trygera RPC. Metoda wyznaczenia efektywności wzorców polega na porównaniu rzeczywistej odpowiedzi trygera PAC z odpowiedzią emulatora tego systemu wykorzystującego pełen zestaw wzorców. Histogramy tych wielkości są przedstawione na górnym panelu Rysunku 2.13. Kolorem zielonym narysowany jest histogram liczby mionów skojarzonych z odpowiedzią emulatora (PAC triggerable muns), kolorem czerwonym rzeczywista odpowiedź PAC (RPC muons). Dolny panel tej ilustracji przedstawia iloraz tych histogramów czyli estimate efektywności ϵ_{PAC} . Można zauważyć charakterystyczne obniżenie efektywności na granicach zerowego koła. Poza tym obszarem efektywność przewyższa 95%. Bardzo wysoka efektywność w obszarze wieczek spowodowana jest możliwością zawarcia praktycznie wszystkich możliwych wzorców z trzech dostępnych tam płaszczyzn w procesorach PAC. Rysunek 2.14 różni się od 2.13 cięciem na pęd poprzeczny mionów wykorzystywanych w analizie, wymagane $p_T > 7 \text{ GeV}$. Użycie cięcia na wartości pędu poprzecznego 7 GeV gwarantuje przejście mionu przez wszystkie płaszczyzny mionowe. Przekłada się to na kilku procentowy wzrost efektywności w obszarze beczki. Uzyskane wyniki pokazują bardzo dobre działanie metody użytej do generowania wzorców wykorzystywanych w trygerze RPC [15].



Rysunek 2.13: Górny panel. Histogramy liczby wyselekcjonowanych mionów skojarzonych z emulatorem trygera (kolor czerwony, PAC triggerable muons) w zależności od η (kolor zielony, Glb muons) oraz liczby mionów skojarzonych z trygerem RPC (kolor czerwony, RPC muons). Dolny panel. Stosunek histogramów z górnego panelu. Efektywności wzorców ϵ_{PAC} w zależności od pseudopośpieszności η .



Rysunek 2.14: Górny panel. Histogramy liczby wyselekcjonowanych mionów o pędzie poprzecznym większym niż 7 GeV skojarzonych z emulatorem trygera (kolor czerwony, PAC triggerable muons) w zależności od η (kolor zielony, Glb muons) oraz liczby mionów skojarzonych z trygerem RPC (kolor czerwony, RPC muons). Dolny panel. Stosunek histogramów z górnego panelu. Efektywności wzorców ϵ_{PAC} w zależności od pseudopośpieszności η dla $p_T > 7$ GeV.

2.4.3. Wyznaczenie selektywności wzorców trygera PAC

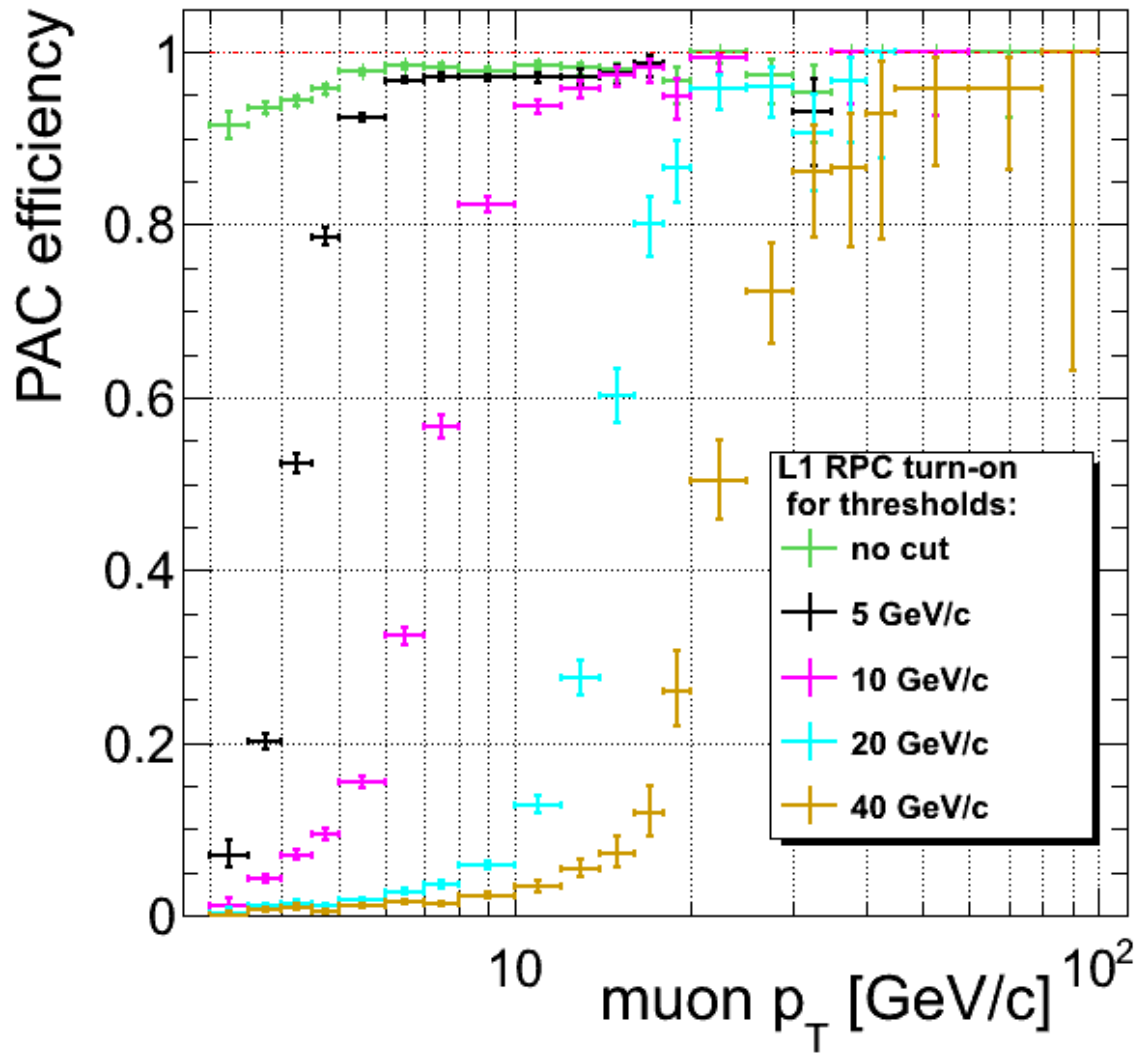
Najważniejszym wynikiem przeprowadzonej analizy było wyznaczenie selektywności wzorców wykorzystywanych w systemie PAC. Do badania selektywności trygera można użyć krzywych włączeniowych. Krzywe włączeniowe wzorców PAC pokazują zależności stosunku liczby wyselekcjonowanych mionów skojarzonych z rzeczywistym trygerem RPC którego kod pędowy odpowiadał pędowi poprzecznemu nie mniejszemu niż zadane cięcie do liczby wszystkich wyselekcjonowanych mionów mających odpowiadający im tryger z emulatora w funkcji pędu poprzecznego wyselekcjonowanego mionu (pomiar zdeterminowany przez dane z detektora śladowego). Jej kształt dla idealnego systemu byłby funkcją schodkową o plateau na wysokości 1 i o skoku dla wartości zastosowanego cięcia.

Rysunek 2.15 zawiera krzywe włączeniowe systemu PAC dla obszaru beczki przy cięciach na kod pędowy trygera RPC: 0 GeV, 5 GeV, 10 GeV, 20 GeV i 40 GeV. Punkty zaznaczone kolorem zielonym pokazują krzywą dla cięcia 0 GeV (równoważną wartości ϵ_{PAC} pokazanej w funkcji η na Rysunku 2.13) w zależności od pędu poprzecznego p_T . Dla wszystkich krzywych widać ostre zbocze narastające i plateau o wartości powyżej 0.95 przy pędach poprzecznych większych niż wartość cięcia.

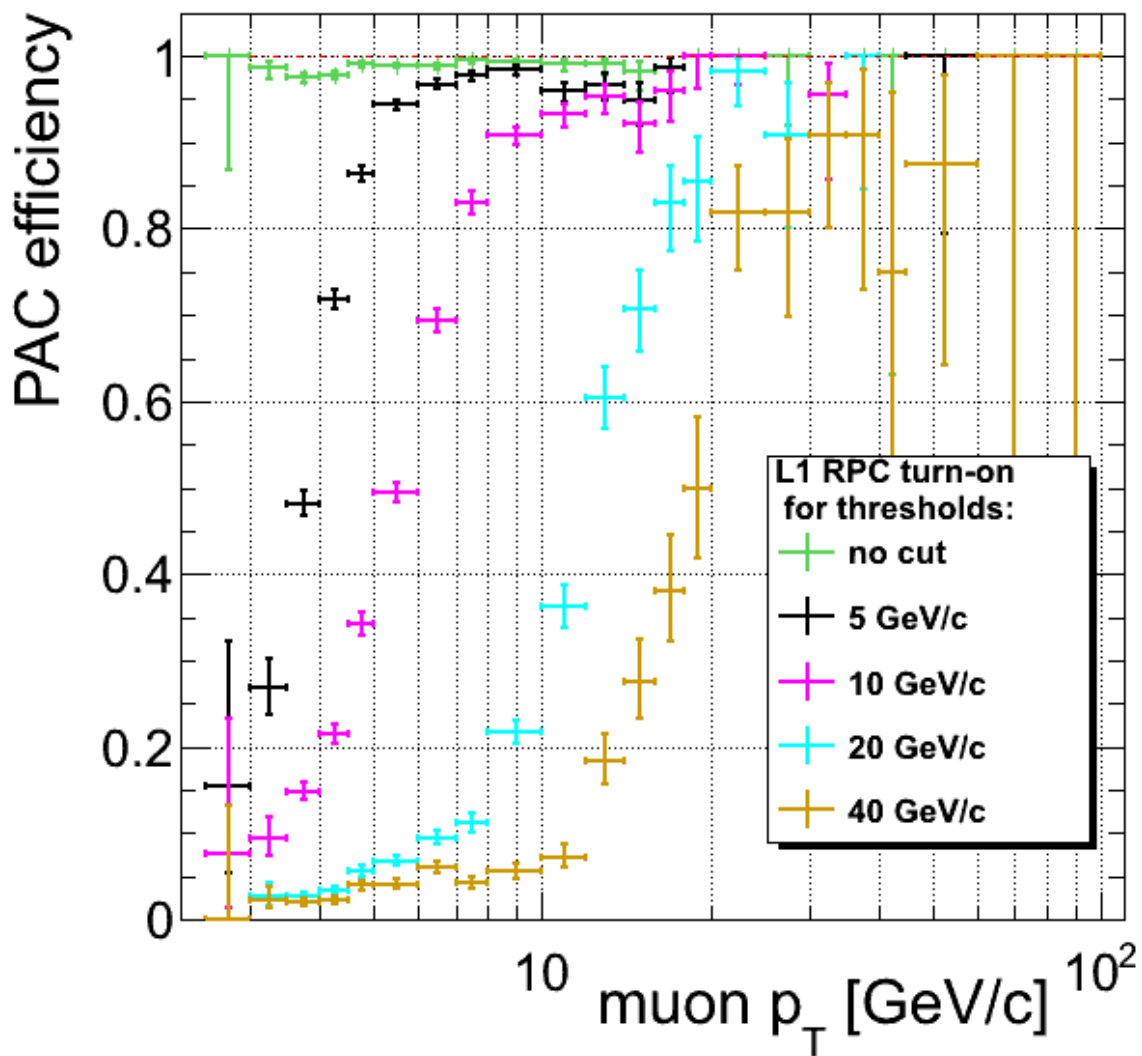
Uzyskane wyniki wskazują na bardzo dobrą rozdzielczość pędową trygera PAC w obszarze beczki oraz zadowalającą w pozostałych obszarach. Z Rysunku 2.15 można odczytać, że dla cięć 10 GeV i 20 GeV efektywność spada o rząd wielkości przy zmniejszeniu wartości p_T o czynnik dwa.

Dla pozostałych zakresów η analogiczne rysunki to Rysunek 2.16 dla obszar przejściowego $|\eta| \in [0.83; 1.24]$ i Rysunek 2.17 dla wieczek $|\eta| \in [1.24; 1.61]$. W obszarze wieczek gorsza selektywność jest związana z mniejszą liczbą płaszczyzn RPC. W planach jest rozbudowa systemu RPC o kolejną warstwę komór w wieczkach, najprawdopodobniej nastąpi to podczas trwania pierwszej długiej przerwy technicznej (Long Shutdown, LS1) zaplanowanej na lata 2013 i 2014.

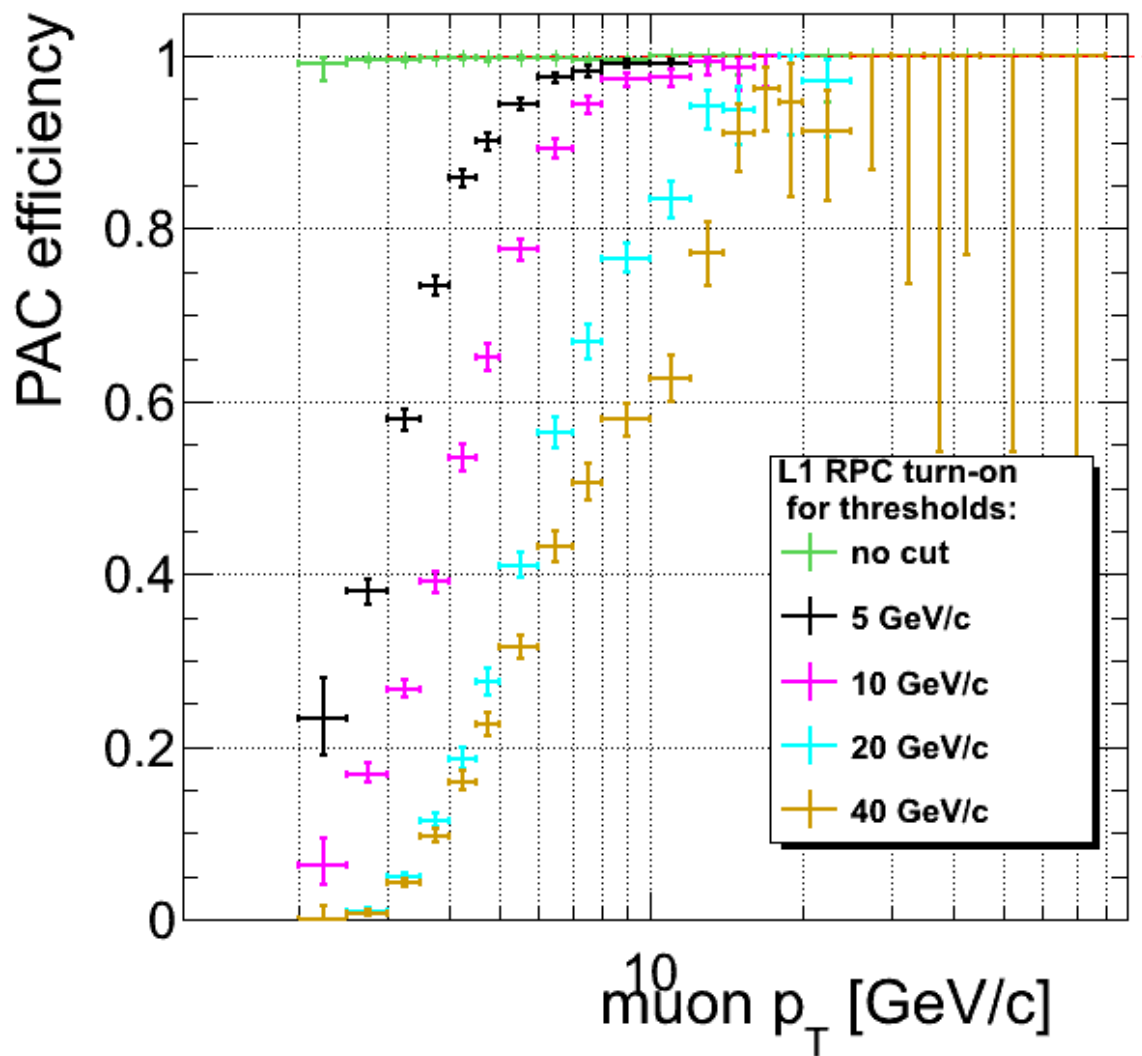
Analiza została zaakceptowana przez zespół badawczy eksperymentu CMS, a Rysunek 2.15 jest oficjalnie dopuszczony do publikacji.



Rysunek 2.15: Krzywe efektywności wzorców pędowych w zależności od pędu poprzecznego p_T dla obszaru beczki $\eta \in [0 : 0.83]$. Przy cięciach na kod pędowy trygera RPC skojarzonego z zrekonstruowanym mionem: kolorem zielonym 0 GeV, czarnym 5 GeV, fioletowym 10 GeV, lazurowym 20 GeV, złotym 40 GeV.



Rysunek 2.16: Krzywe efektywności wzorców pędowych w zależności od pędu poprzecznego p_T dla obszaru przejściowego $\eta \in]0.83 : 1.24]$. Przy cięciach na kod pędowy trygera RPC skojarzonego z zrekonstruowanym mionem: kolorem zielonym 0 GeV, czarnym 5 GeV, fioletowym 10 GeV, lazurowym 20 GeV, złotym 40 GeV.

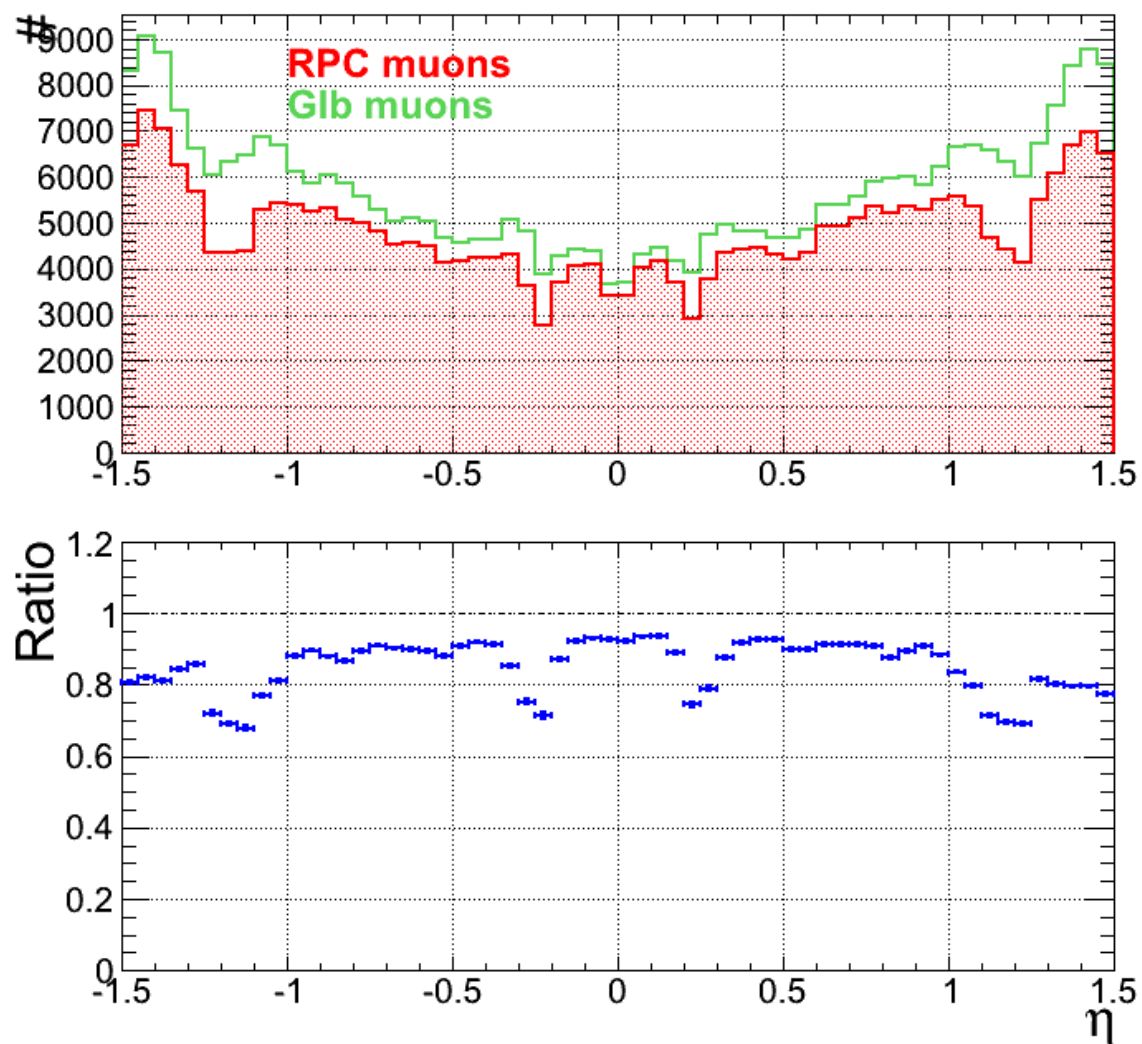


Rysunek 2.17: Krzywe efektywności wzorców pędowych w zależności od pędu poprzecznego p_T dla obszaru wieczek $\eta \in [1.24 : 1.61]$. Przy cięciach na kod pędowy trygera RPC skojarzonego z zrekonstruowanym mionem: kolorem zielonym 0 GeV, czarnym 5 GeV, fioletowym 10 GeV, lazurowym 20 GeV, złotym 40 GeV.

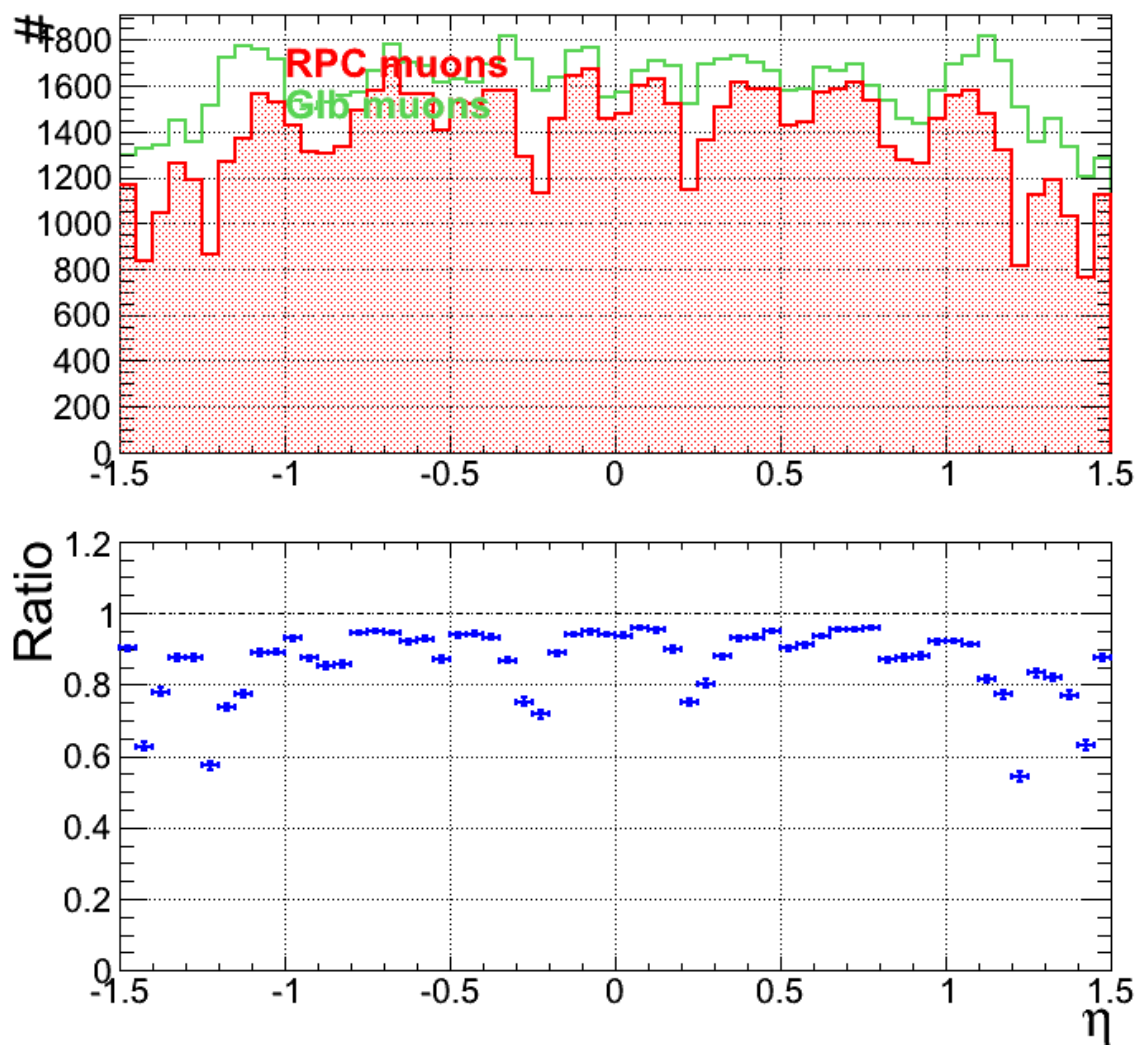
2.4.4. Estymacja całkowitej efektywności ϵ i selektywności systemu PAC

Konstrukcja detektora CMS poprzez zdublowanie systemów mionowych pozwala na porównywanie działania jednego z systemów względem pozostałych. Niestety zakresy pokryć geometrycznych poszczególnych układów mionowych są skorelowane poprzez umieszczenie komór w tych samych pustych przestrzeniach jarzma magnesu detektora. Większość nieefektywności geometrycznych dla systemów RPC i DT jest wynikiem istnienia takich obszarów konstrukcyjnych detektora, w których nie ma zarówno komór dryfowych jak i RPC. Przekłada się to na obciążenie zrekonstruowanych mionów używanych w analizie. Dlatego wyznaczana wartość jest tylko obciążona estymatorem wartości ϵ .

Miarą całkowitej efektywności jest stosunek liczby wyselekcjonowanych globalnych mionów skojarzonych z trygerem PAC do liczby wszystkich wyselekcjonowanych mionów (Rozdział 2.3). Rozkłady tych wielkości w zależności od pseudopośpieszności η są przedstawione na górnym panelu Rysunku 2.18. Kolorem zielonym narysowany jest histogram liczby wyselekcjonowanych mionów (Glb muons) a kolorem czerwony histogram liczby skojarzonych z odpowiedzią z trygera opartego o komory RPC (RPC muons). Na dolnych panelach narysowany jest stosunek tych histogramów, będący estymatą efektywności ϵ w funkcji η . Struktura tak uzyskanych histogramów jest bardzo podobna do histogramów uzyskanych w Rozdziale 2.4.1 wynika to z faktu że, efektywność używanych wzorców ϵ_{PAC} jest bardzo wysoka, przekraczająca 95% i ma płaską strukturę w odróżnieniu od efektywności ϵ_{HW} . Analogiczne rysunki, jedynie z dodatkowym wymaganiem wartości pędu poprzecznego wyselekcjonowanych mionów $p_T > 7 \text{ GeV}$ zawiera Rysunek 2.19. Widać dobrą zgodność z uzyskanymi poprzednio wynikami.

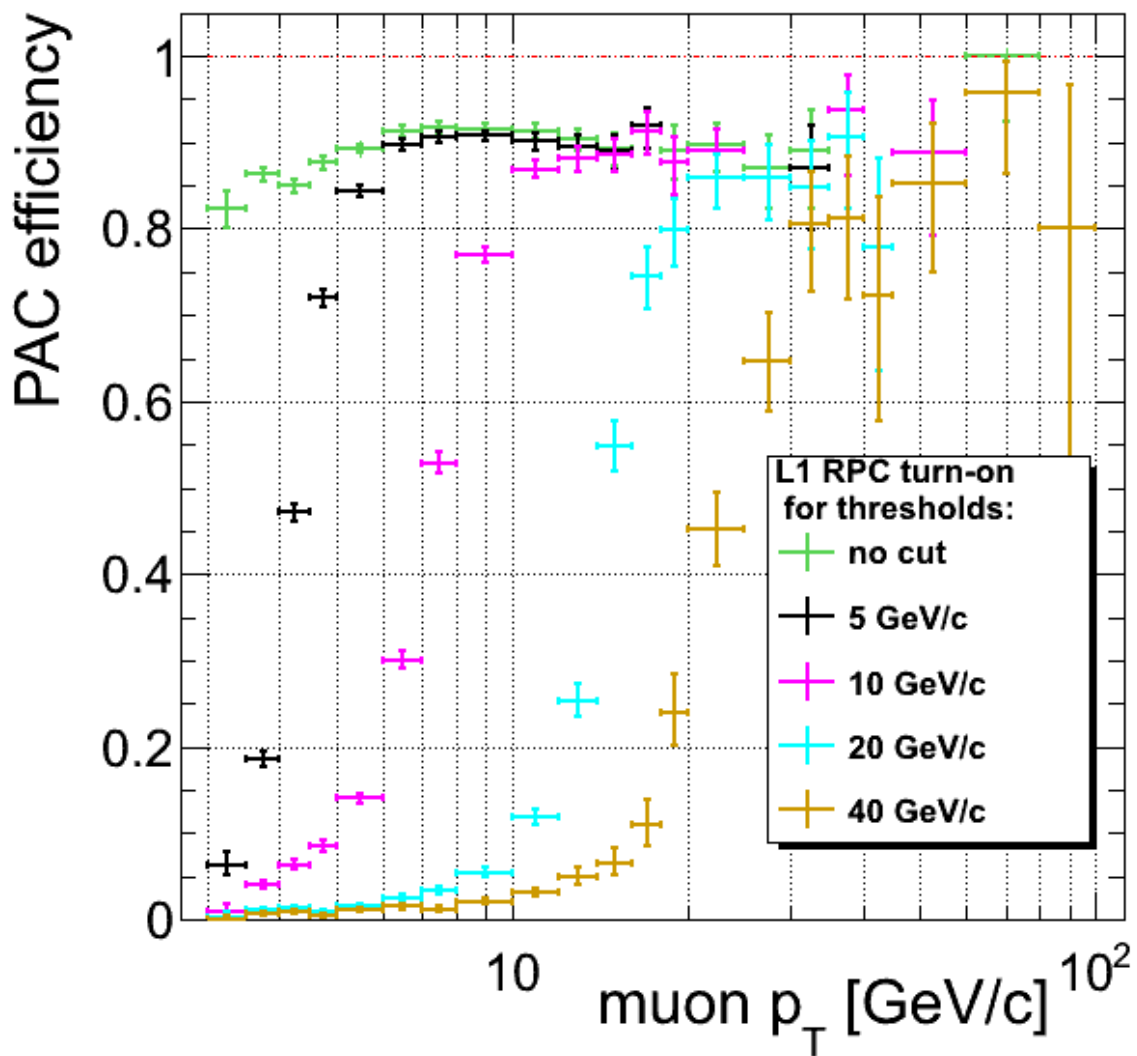


Rysunek 2.18: Górny panel. Histogramy liczby wyselekcjonowanych mionów w zależności od η (kolor zielony, Glb muons) oraz liczby mionów skojarzonych z trygerem RPC (kolor czerwony, RPC muons). Dolny panel. Stosunek histogramów z górnego panelu. Estymata efektywności ϵ w zależności od pseudopośpieszności η .

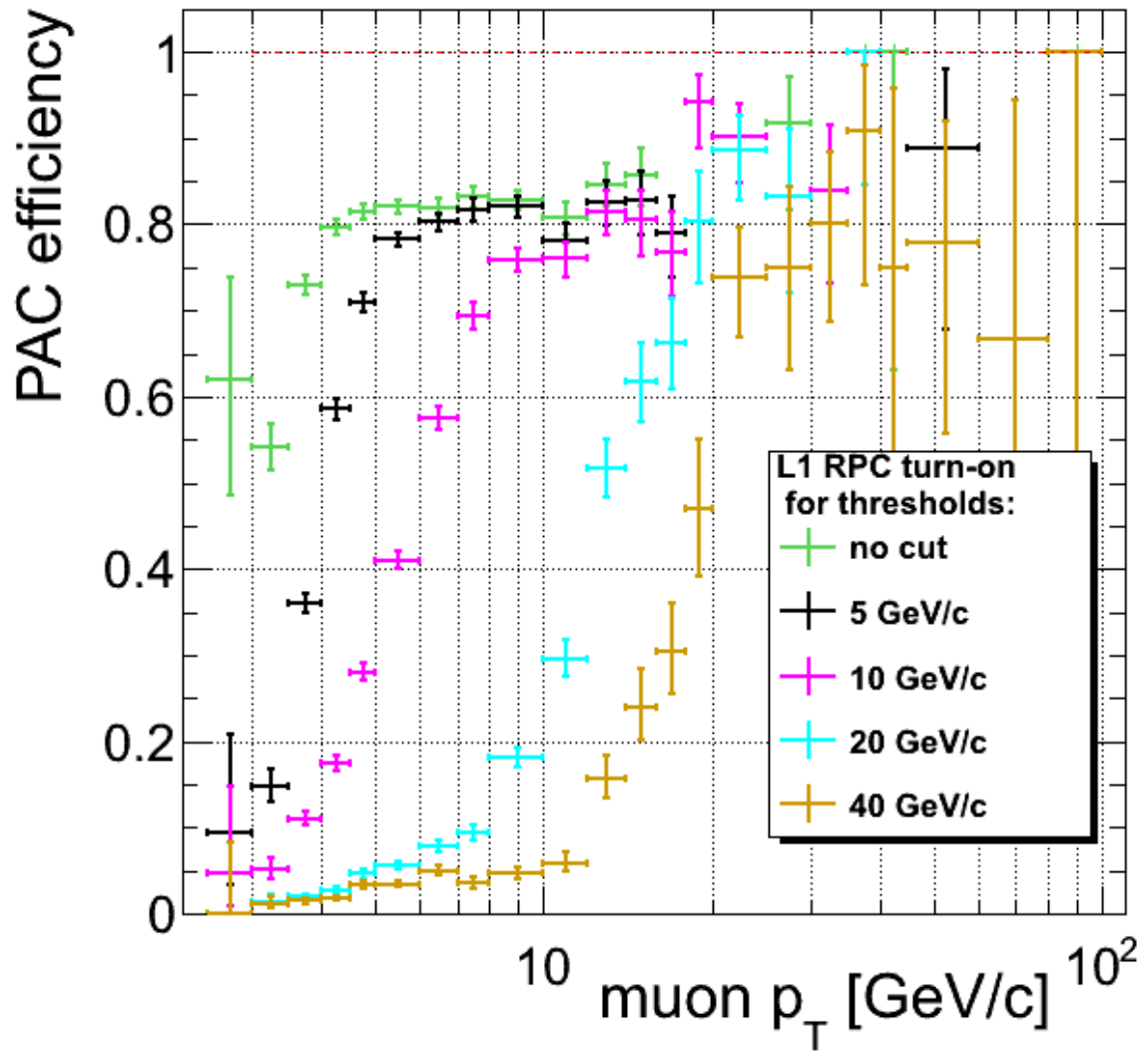


Rysunek 2.19: Górny panel. Histogramy liczby wyselekcjonowanych mionów o pędzie poprzecznym większym niż 7 GeV w zależności od η (kolor zielony, Glb muons) oraz liczby mionów skojarzonych z trygerem RPC (kolor czerwony, RPC muons). Dolny panel. Stosunek histogramów z górnego panelu. Estymata efektywności ϵ w zależności od pseudopośpieszności η dla $p_T > 7$ GeV.

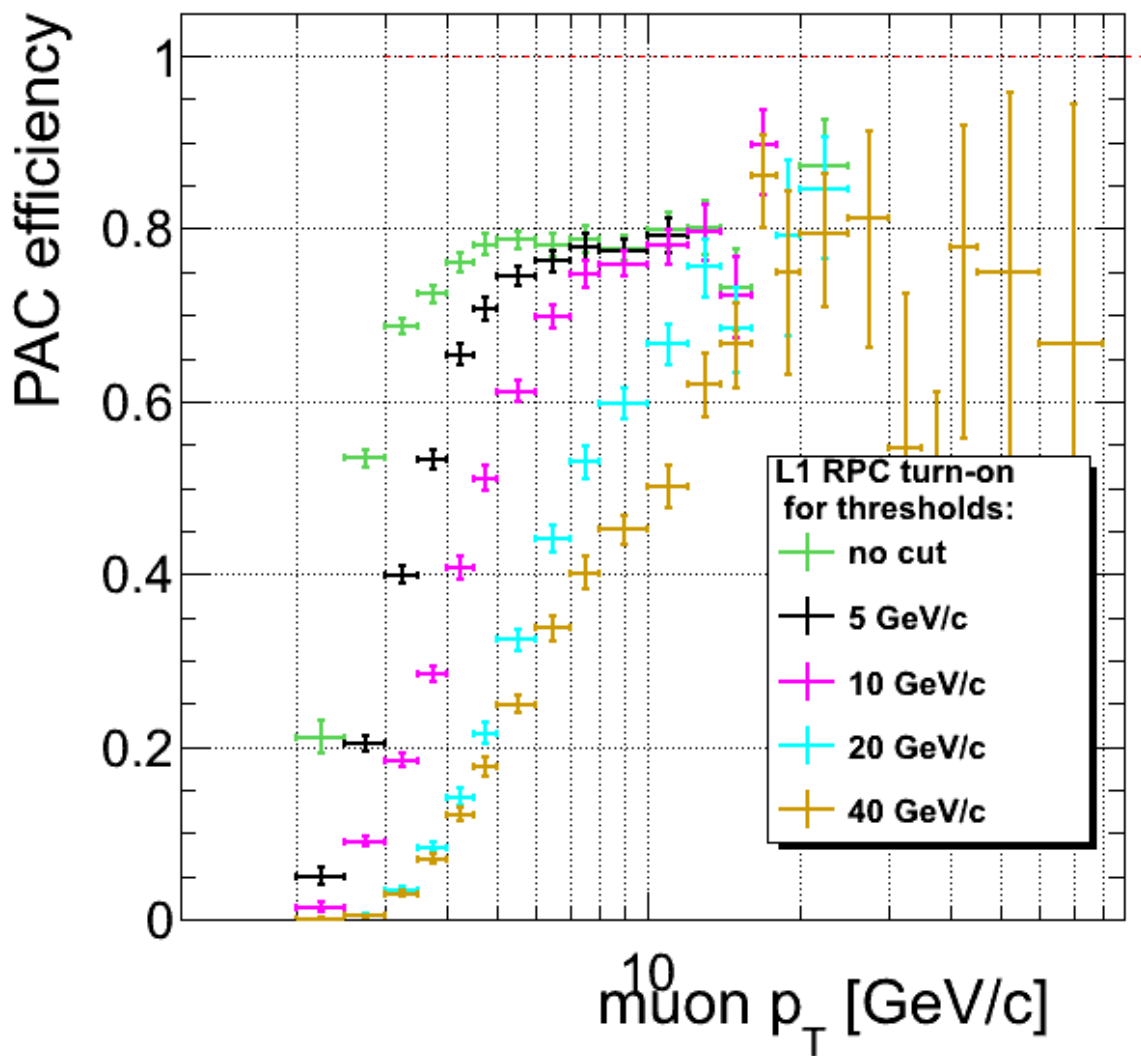
Równie ważnym parametrem co efektywność w systemie wyzwiania jest jego selektywność. Do badania całkowitej selektywności trygera (podobnie jak w Rozdziale 2.4.3) użyto krzywych włączeniowych. Krzywe włączeniowe trygera PAC są ilorazem liczby wyselekcjonowanych mionów skojarzonych z rzeczywistym trygerem RPC którego kod pędowy odpowiadał pędowi poprzecznemu nie mniejszemu niż zadane cięcie i liczby wszystkich wyselekcjonowanych mionów. Rysunki 2.20 – 2.22 zawierają krzywe włączeniowe systemu PAC w trzech obszarach detektora przy tych samych cięciach na pęd poprzeczny zrekonstruowanego mionu: 0GeV, 5GeV, 10GeV, 20GeV i 40GeV. Kształt krzywych zbliżony do odpowiadającym im krzywym z Rozdziału 2.4.3, plateau jest obniżone o czynnik wynikający z efektywności sprzętowej ϵ_{HW} . Również na tych rysunkach widać zgodność z poprzednimi wynikami.



Rysunek 2.20: Krzywe efektywności trygera RPC w zależności od pędu poprzecznego p_T dla obszaru beczki $\eta \in [0 : 0.83]$. Przy cięciach na kod pędowy trygera RPC skojarzonego z zrekonstruowanym mionem: kolorem zielonym 0 GeV, czarnym 5 GeV, fioletowym 10 GeV, lazurowym 20 GeV, złotym 40 GeV.



Rysunek 2.21: Krzywe efektywności trygera RPC w zależności od pędu poprzecznego p_T dla obszaru przejściowego $\eta \in]0.83 : 1.24]$. Przy cięciach na kod pędowy trygera RPC skojarzonego z zrekonstruowanym mionem: kolorem zielonym 0 GeV, czarnym 5 GeV, fioletowym 10 GeV, lazurowym 20 GeV, złotym 40 GeV.



Rysunek 2.22: Krzywe efektywności trygera RPC w zależności od pędu poprzecznego p_T dla obszaru wieczek $\eta \in]1.24 : 1.61]$. Przy cięciach na kod pędowy trygera RPC skojarzonego z zrekonstruowanym mionem: kolorem zielonym 0 GeV, czarnym 5 GeV, fioletowym 10 GeV, lazurowym 20 GeV, złotym 40 GeV.

3. Podsumowanie

Przedstawiona w pracy analiza dotyczy pracy trygera RPC w roku 2011. W pracy przedstawione są pomiary efektywności mionowego systemu wyzwalania opartego o komory RPC w eksperymencie CMS. Analiza potwierdza, że używane w trygerze wzorce wykorzystują praktycznie cały potencjał dostępnego sprzętu. Całość analizy została przeprowadzona na danych MinimumBias zderzeń proton–proton przy energii w środku masy 7 TeV, zebranych w roku 2011. Wyznaczona w pracy efektywność wzorców pędowych dla mionów o pedzie poprzecznym większym od 7 GeV jest większa od 95% w całym zakresie η (Rysunek 2.14). Przedstawione w pracy krzywe włączeniowe, pokazują bardzo dobrą rozdzielczość pędowa wykorzystywanych wzorców (np. Rysunek 2.15). Całkowita efektywność systemu PAC dla środkowej części detektora jest wyższa od 0.9 (poza obszarami $|\eta| \approx 0.25$, Rysunek 2.19). Część uzyskanych wyników została zaakceptowana przez zespół badawczy projektu naukowego CMS i dopuszczona do oficjalnych prezentacji działania trygera mionowego.

Bibliografia

- [1] O.S. Brüning et al. LHC Design Report Vol. 1: The LHC Main Ring. 2004.
- [2] CMS Collaboration. CMS Physics: Technical Design Report. Volume I: Detector Performance and Software. 2006.
- [3] ATLAS Collaboration. ATLAS Technical Proposal. *CERN/LHCC*, pages 94–43, 1994.
- [4] ALICE Collaboration. ALICE Technical Design Report of the Transition Radiation Detector. 2001.
- [5] LHCb Collaboration. LHCb Technical Design Report. *CERN/LHCC*, 30:137, 2003.
- [6] TOTEM collaboration. TOTEM Technical Design Report: Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the Large Hadron Collider at CERN. *CERN LHCC*, 2, 2004.
- [7] LHCf Collaboration. LHCf experiment Technical Design Report. *Technical Design Report LHCf (CERN, Geneva, 2006)*, 2006.
- [8] CMS Luminosity Public Results. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults>.
- [9] CMS Collaboration. CMS physics technical design report, volume II, 2006.
- [10] International Particle Physics Outreach Group . <http://ippog.web.cern.ch/>.
- [11] CMS Collaboration. CMS: The TRIDAS Project. Technical Design Report, Vol. 1: The trigger systems. *CERN publication CERN-LHCC*, 38, 2000.

- [12] CMS Collaboration. CMS: The TriDAS project. Technical design report, Vol. 2: Data acquisition and high-level trigger. 2002.
- [13] K. Buńkowski. *Optimization, Synchronization, Calibration and Diagnostic of the RPC PAC Muon Trigger System for the CMS detector*. PhD thesis, Uniwersytet Warszawski, 2009.
- [14] Marcin Konecki. Badanie Systemu wyzwalania detektora CMS przy Large Hadron Collider. Master's thesis, Uniwersytet Warszawski, 1992.
- [15] T. Fruboes. Mionowy system wyzwalania detektora CMS w oparciu o komory RPC-emulacja algorytmu i optymalizacja wzorców pędowych. Master's thesis, Uniwersytet Warszawski, 2008.