

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Tomasz Fruboes

Nr albumu: 202811

Mionowy system wyzwalań
detektora CMS w oparciu o komory
RPC - emulacja algorytmu i
optymalizacja wzorców pędowych

Praca magisterska
na kierunku FIZYKA

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

Warszawa, Luty 2008

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

Tryger pierwszego stopnia w oparciu o komory RPC jest jednym z podsystemów systemu wyzwalania i akwizycji danych eksperymentu CMS. Do jego zadań należy poszukiwanie wysokopędowych mionów w obszarze $|\eta| < 2.1$ detektora CMS. Odbywa się to poprzez porównanie układu zapalonych pasków komór RPC z wcześniej zdefiniowanym zestawem wzorców. W pracy tej zostały zaimplementowane i przebadane różne algorytmy optymalizacji wzorców pędowych.

Słowa kluczowe

LHC, CMS, Tryger RPC, CMSSW, Tryger pierwszego stopnia, L1-Trigger, RPC Trigger, CMSSW

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

13.2 Fizyka

Tytuł pracy w języku angielskim

The RPC based trigger for the CMS experiment - emulation of an algorithm and patterns optimalization

Moim Rodzicom

Spis treści

1. Wstęp	7
1.1. Akcelerator Large Hadron Collider	8
1.2. Eksperyment Compact Muon Solenoid	9
1.2.1. Magnes	10
1.2.2. Składowe detektora eksperymentu CMS	11
1.2.3. Wyzwalanie i akwizycja danych	13
1.2.4. Konstrukcja trygera pierwszego stopnia	13
2. Tryger mionowy RPC	17
2.1. Działanie trygera RPC	17
2.2. Segmentacja i konstrukcja trygera RPC	19
2.3. Algorytmy komparatora PAC	22
2.3.1. Algorytm podstawowy (Standard, Baseline)	23
2.3.2. Algorytm ekonomiczny (Economic)	24
2.4. Usuwanie duchów (ghostbusting)	25
3. Algorytmy generacji i optymalizacji wzorców pędowych	29
3.1. Ogólne zasady działania algorytmów	29
3.2. Algorytmy generacji wzorców pędowych	30
3.2.1. Algorytm B	30
3.2.2. Algorytm C	33
3.2.3. Algorytm D	36
3.3. Optymalizacja nadania kodów pędowych	36
3.4. Generacja wzorców	38
3.4.1. Symetrie systemu mionowego RPC	38
3.4.2. Wpływ statystyki próbek mionowych na liczbę wzorców	41
4. Wyniki emulacji	45
5. Podsumowanie	69
Bibliografia	71

Rozdział 1

Wstęp

Model Standardowy cząstek elementarnych jest teorią dokładnie opisującą trzy z czterech znanych oddziaływań elementarnych - silne, słabe oraz elektromagnetyczne. Na przestrzeni ponad 30 ostatnich lat model ten był wielokrotnie testowany, żaden z przeprowadzonych eksperymentów nie wykazał jego niezgodności z naturą¹. Mimo doskonałej zgodności z danymi doświadczalnymi, pozostawia on wiele zagadnień do wyjaśnienia:

Parametry modelu standardowego i liczba pokoleń - Model Standardowy opisuje wszystkie ze znanych cząstek elementarnych - trzy rodziny kwarków - $(u, d), (c, s), (t, b)$ (tj. górny, dolny, charm, strange, top oraz bottom) oraz leptonów - $(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$ (tj. elektron, mion, tau oraz odpowiadające im neutrino). Towarzyszą im tzw. bozony pośredniczące będące nośnikami oddziaływań - foton (oddziaływanie elektromagnetyczne), bozony W^+, W^-, Z^0 (oddziaływania słabe) oraz gluony (oddziaływania silne). Do poprawnego opisu uwzględniającego oddziaływania cząstek w ramach modelu potrzeba ponad 20 stałych². Stałe te są wolnymi parametrami (są od siebie niezależne) i muszą być wyznaczone eksperymentalnie - Model Standardowy nie wyjaśnia ich wartości, nie wskazuje też na żadne związki między nimi.

Interesującym pytaniem jest też, dlaczego w naturze istnieją dokładnie trzy rodziny fermionów (kwarków i leptonów). W obrębie rodziny (tj. kwarków lub leptonów) cząstki mają takie same właściwości z punktu widzenia wszystkich oddziaływań, różnią się jedynie masą.

Łamanie symetrii elektroslabej i bozon Higgsa - oddziaływania słabe są oddziaływaniami krótkozasięgowymi, podczas gdy oddziaływania elektromagnetyczne mają nieskończony zasięg. Za tę różnicę odpowiedzialny jest mechanizm łamania symetrii elektroslabej, w wyniku działania którego foton pozostaje bezmasowy (a więc oddziaływania elektromagnetyczne stają się dalekozasięgowe), nośniki oddziaływań słabych (W^+, W^-, Z^0) zyskują natomiast masę. Powoduje to ograniczenie ich zasięgu do średnio 10^{-18} m - odległości mniejszej niż rozmiar nukleonu.

W Modelu Standardowym łamanie symetrii elektroslabej realizowane jest poprzez pole Higgsa, z którym powiązany jest bozon Higgsa. Istnienie bozonu Higgsa jest ostatnim, jeszcze niesprawdzonym, przewidywaniem modelu.

¹Wyjątkiem są eksperymenty, które wykazały niezerową masę neutrin. Model Standardowy łatwo daje się zmodyfikować, aby uwzględnić ten fakt.

²Są to: masy kwarków, leptonów i bozonu Higgsa, wartość oczekiwana pola Higgsa, stałe sprzężeń oraz wartości macierzy CKM i MNS

Unifikacja i skala oddziaływań - w 1979 roku Salam, Glashow i Weinberg pokazali, że oddziaływania słabe i elektromagnetyczne są przejawem jednego oddziaływania, nazwanego elektroslabym. Jest to jedna z podstaw Modelu Standardowego. Oddziaływania silne w ramach modelu opisuje chromodynamika kwantowa. Oddziaływania silne i elektroslabe w Modelu Standardowym są od siebie niezależne - następnym krokiem w rozwoju teorii cząstek elementarnych byłoby pokazanie, że oddziaływania te dają się opisać jako przejaw jednej, bardziej fundamentalnej siły, tj. zunifikowanie tych oddziaływań.

Model Standardowy niezrozumiałym pozostawia rozróżnienie między skalami charakterystycznymi dla oddziaływań elektroslabych (około 100 GeV) i grawitacyjnych (około 10^{18} GeV). Co więcej oddziaływania grawitacyjne nie są w nim uwzględnione. Opis oddziaływań grawitacyjnych wraz z unifikacją wszystkich czterech oddziaływań wymaga nowej teorii, wykraczającej poza Model Standardowy

Przewaga materii nad antymaterią, istnienie ciemnej materii - obserwacje kosmologiczne wskazują, że wszechświat składa się głównie z materii, antymateria natomiast występuje w znikomych ilościach. Mechanizmy Modelu Standardowego nie są w stanie wyjaśnić tej różnicy. W jego ramach istnieje co prawda proces mogący prowadzić do powstawania przewagi materii nad antymaterią (łamanie symetrii CP), ale jest on zbyt słaby, aby wyjaśnić ilość materii znajdującej się obecnie we wszechświecie.

Seria obserwacji [1] wskazuje na istnienie Ciemnej Materii, czyli materii słabo oddziałującej, nie emitującej i nie odbijającej światła (tak więc trudno wykrywalnej). Szacuje się, że wkład do całkowitej masy wszechświata, pochodzący od "zwykłej" materii i energii, stanowi zaledwie 4%. Resztę stanowi Ciemna Materia i przypuszczalnie Ciemna Energia (mająca wpływ na prędkość ucieczki galaktyk). Poza neutrinami Model Standardowy nie zawiera cząstek, które nadawałyby się na ciemną materię, te natomiast mogą stanowić jedynie drobną część Ciemnej Materii.

Opisane "niedoskonałości" Modelu Standardowego przekładają się na przekonanie panujące w społeczności fizyków cząstek elementarnych, że dla energii rzędu TeV pojawią się nowe, interesujące efekty, których Model Standardowy nie opisuje. Stanowi to jedną z głównych motywacji budowy zderzacza Large Hadron Collider (LHC) i eksperymentów mu towarzyszących. Dzięki wysokiej energii wiązek będzie on w stanie zbadać oddziaływania elementarne w obszarach, dla których do tej pory nie było to możliwe. LHC będzie próbował udzielić odpowiedzi na szereg pytań dotyczących wielu zagadnień - jaki jest mechanizm łamania symetrii elektroslabej, czy teorie supersymetryczne mogą być rozszerzeniem Modelu Standardowego, czy istnieje więcej bozonów pośredniczących niż znamy, czy istnieją dodatkowe wymiary przestrzeni? Dodatkową ważną dziedziną badaną przez LHC będzie fizyka ciężkich jonów.

1.1. Akcelerator Large Hadron Collider

Akcelerator LHC jest kołowym zderzaczem (kolajderem) powstającym w laboratorium CERN (European Laboratory for Particle Physics) niedaleko Genewy w Szwajcarii. W jego budowie wykorzystywany jest 27-kilometrowy, podziemny tunel pozostały po akceleratorze LEP (Large Electron-Positron Collider).

Głównym zadaniem kolajdera LHC jest dokładniejsze poznanie struktury materii. Aby to osiągnąć co 25 ns zderzane będą dwie przeciwbieżne wiązki protonów o energii 7 TeV każda (lub jonów wapnia/ołowiu o odpowiednio większych energiach), w wyniku czego dochodzić

będzie średnio do 20 kolizji na przecięcie wiązek³. Osiągnięcie tak wysokich energii i częstości zderzeń stanowi ogromne wyzwanie zarówno techniczne jak i finansowe. Aby mu podołać, przy budowie LHC (oraz eksperymentów mu towarzyszących) uczestniczy około 7000 fizyków pochodzących z około 40 państw świata.

Przy zderzaczu LHC powstaje 5 eksperymentów - dwa eksperymenty ogólnego przeznaczenia, mające badać zarówno fizykę cząstek elementarnych jak i ciężkich jonów - ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) oraz CMS (Compact Muon Solenoid); eksperyment ALICE (A Large Ion Collider Experiment), dedykowany dla fizyki ciężkich jonów; eksperyment LHCb (Large Hadron Collider beauty), zajmujący się fizyką kwarków b; poboczny eksperyment TOTEM (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC), koncentrujący się na badaniu procesów dyfrakcyjnych, rozpraszania elastycznego i pomiarze przekrojów czynnych oddziaływań elementarnych.

Akcelerator LHC jest w końcowym etapie budowy, według obecnych planów ma rozpocząć działanie w drugiej połowie 2008 roku.

1.2. Eksperyment Compact Muon Solenoid

Eksperyment CMS jest eksperymentem ogólnego zastosowania - wykorzystywany będzie zarówno podczas zderzeń wiązek protonów, jak i jonów. Jego główne dziedziny badań obejmują:

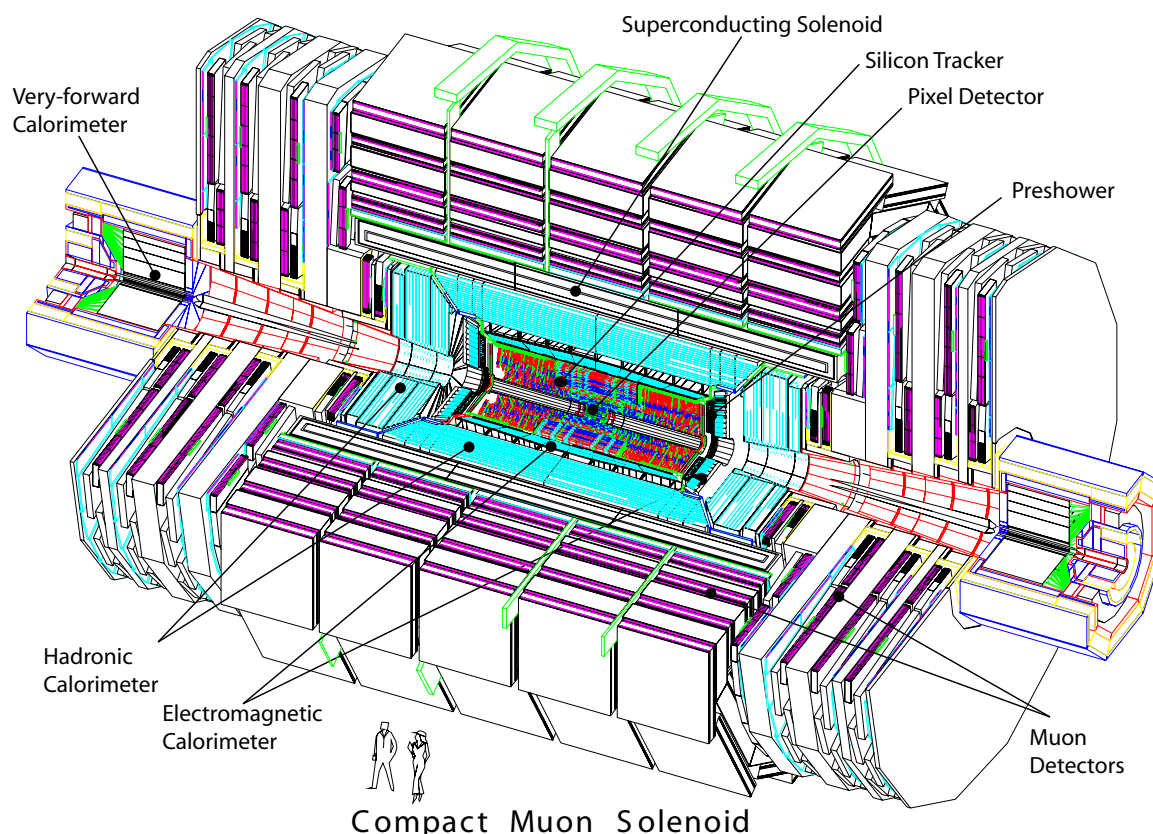
Poszukiwania Bozonu Higgsa - z testów przeprowadzonych przez eksperymenty przy akceleratorze LEP wynika, że masa Bozonu Higgsa w Modelu Standardowym jest nie mniejsza niż $114.4 \text{ GeV}/c^2$ [2]. Szacuje się, że masa standardowego Bozonu Higgsa nie przekroczy kilkuset GeV/c^2 [3]. Jeśli bozon Higgsa istnieje, eksperymenty powstające przy LHC najprawdopodobniej będą go w stanie odkryć.

Poszukiwania cząstek supersymetrycznych - teorie supersymetryczne są teoriami, w których wszystkie ze znanych dziś cząstek elementarnych zyskują "superpartnery" - każdemu z fermionów odpowiadać będzie nowa cząstka o spinie 0, a bozonom o spinie $\frac{1}{2}$. Jedną z możliwych metod "znalezienia" supersymetrii jest poszukiwanie śladów obecności najbliższej cząstki supersymetrycznej (LSP). W części modeli cząstka ta jest stabilna i bardzo słabo oddziałująca. Na jej obecność mogłyby wskazywać przypadki o dużej brakującej energii poprzecznej (unoszonej poza detektor właśnie przez poszukiwaną cząstkę LSP), w których pojawia się kilka jetów.

Model Standardowy - wysokie energie i świetlności, które zapewni LHC, umożliwią dokładne przetestowanie Modelu Standardowego. Będzie to uzupełnieniem bezpośrednich poszukiwań nowej fizyki (np. próby odkrycia nowych cząstek), gdyż nawet drobne odstępstwa od przewidywań Modelu Standardowego mogą wskazać dalsze kierunki badań. Do najważniejszych testów zaliczyć należy badania chromodynamiki kwantowej, fizyki oddziaływań słabych i produkcji kwarków t .

Detektor eksperymentu CMS przedstawiony jest na rysunku 1.1. Detektor CMS składa się z centralnego rejonu nazywanego beczką (barrel), oraz z dwóch pokryw (endcaps) znajdujących się na obu końcach beczki. Opis każdego z systemów eksperymentu CMS (magnes, detektory, system akwizycji danych) znajduje się w kolejnych sekcjach.

³Dla wiązek protonów.



Rysunek 1.1: Detektor eksperymentu CMS

1.2.1. Magnes

Jednym z najważniejszych elementów detektora CMS jest magnes. Pole magnetyczne zakrzywiając torы naładowanych cząstek, umożliwia pomiar ich pędu i wyznaczanie ładunku. Odpowiedni dobór parametrów magnesu ma ogromny wpływ na możliwość uzyskania rozdzielczość pędową.

Parametry magnesu detektora CMS przedstawia tablica 1.1. W detektorze wykorzystywany jest solenoidalny magnes nadprzewodzący. O wyborze magnesu solenoidalnego zdecydowały głównie dwa czynniki [7]:

- Gieście torów cząstek odbywa się w płaszczyźnie prostopadłej do wiązki. Jednocześnie małe rozmiary poprzeczne wiązek określają pozycję (w płaszczyźnie poprzecznej) pierwotnego wierzchołka oddziaływania z dokładnością $<20\mu m$. Ułatwia to działanie tych systemów wyzwalania, które opierają się na pomiarze pędów produkowanych cząstek (np. mionów).
- Zastosowanie magnesu solenoidalnego wraz z jarzmem zwrotnym umożliwia zmniejszenie rozmiarów detektora⁴.

⁴Eksperyment ATLAS stosuje dwa typy magnesów - mały magnes solenoidalny o polu 2T oraz duży, zewnętrzny magnes toroidalny o polu około 4T. Zastosowanie magnesu toroidalnego powoduje, że detektor eksperymentu ATLAS jest znacznie większy od detektora CMS - jego średnica wynosi 25 m, długość zaś 46 m (dla CMS wartości te wynoszą odpowiednio 16 m i 21 m)

Pole wewnątrz cewki	4T
Pole w jarzmie magnesu (na zewnątrz cewki)	1.8T
Długość	12.9 m
Wewnętrzna średnica	5.9 m
Natężenie prądu	19.5 kA

Tablica 1.1: Parametry magnesu eksperymentu CMS

W drugiej połowie 2006 r. magnes został uruchomiony i pomyślnie przetestowany - osiągnięto zakładaną wartość pola magnetycznego 4T.

1.2.2. Składowe detektora eksperymentu CMS

W eksperymencie CMS wykorzystywane jest kilka rodzajów detektorów:

- Detektor śladowy (tracker) - jest detektorem znajdującym się najbliżej miejsca przecięcia wiązek. Informacja pochodząca z trackera służy dokładnemu wyznaczaniu pozycji wierzchołków oddziaływania oraz torów cząstek produkowanych w zderzeniu. Zrekonstruowane tory pozwalają na wyznaczanie z dużą dokładnością pędów cząstek naładowanych.

Tracker korzysta z dwu typów detektorów krzemowych - detektory pikselowe (mozaikowe) i paskowe. Zastosowanie poszczególnych typów detektorów krzemowych jest podyktowane zmieniającym się wraz z położeniem natężeniem przelatujących cząstek:

- W obszarze najbliższym wierzchołka oddziaływania stosowane są detektory pikselowe. Rozmiar pojedynczego piksela wynosi około $100 \times 150 \mu\text{m}^2$, co przy oczekiwanej liczbie $\sim 10^7/\text{s}$ (dla odległości 10 cm od wierzchołka oddziaływania) oddziałujących z detektorem pikselowym cząstek powoduje zajętość na poziomie 10^{-4} (na przecięcie wiązek przy wysokiej świetlności).
- W dalszym obszarze (od 20 do 55 cm), dzięki stosunkowo małemu strumieniowi cząstek, używane są detektory paskowe o rozmiarze $10 \text{ cm} \times 80 \mu\text{m}$ lub większym⁵. Przewidywana zajętość wynosi 2-3% na przecięcie wiązek.
- W zewnętrznym obszarze trackera ($> 55 \text{ cm}$) strumień cząstek jest na tyle mały, że możliwe jest stosowanie detektorów paskowych o rozmiarze aż do $25 \text{ cm} \times 180 \mu\text{m}$. Przekłada się to na zajętość równą około 1%.

Mała zajętość detektora krzemowego jest wymagana do skutecznej rekonstrukcji torów cząstek. Dla zderzeń jonowych zajętość wzrasta (do 1% dla detektora pikselowego i do 20% dla detektorów paskowych), mimo to poprawna rekonstrukcja jest nadal możliwa.

Do budowy trackera wykorzystano 210 m^2 krzemu. Jest to największe urządzenie tego typu jakie powstało.

- Kalorymetr elektromagnetyczny (ECAL) - służy do pomiaru energii elektronów i fotonów, jest drugim w odległości urządzeniem od wiązki (bliżej jest tylko tracker). W jego budowie wykorzystano ponad 80 000 kryształów wolframianu ołowiu (PbWO_4),

⁵Ponieważ paski w różnych warstwach ułożone są względem siebie pod kątem, to dokładność pomiaru położenia we wszystkich współrzędnych jest porównywalna

pokrywa obszar o pseudopośpieszności $|\eta| < 3$. W kryształach przelatujący foton lub elektron doprowadza do powstania kaskady składającej się głównie z elektronów, pozytonów i fotonów. Przelatujące naładowane cząstki kaskady doprowadzają do wytworzenia światła scyntylacyjnego w kryształach, które następnie jest rejestrowane przez fotodiody lawinowe.

Kalorymetr elektromagnetyczny składa się z trzech części - kalorymetru beczki (Electromagnetic Barrel Calorimeter - EB; pokrywa obszar o $|\eta| < 1.479$), kalorymetru pokryw (Electromagnetic Endcap Calorimeter - EE; pokrywa obszar o $1.479 < |\eta| < 3$) oraz kalorymetru "preshower", którego zadaniem (oprócz pomiaru depozytu energii) będzie separacja sygnału pochodzącego z fotonów od pochodzącego z pionów (π^0).

Przelatujące miony bardzo słabo oddziałują z kalorymetrem elektromagnetycznym - 210 razy cięższe od elektronów prawie nie rozpraszają się w kryształach (nie dochodzi do powstania kaskady).

- Kalorymetr hadronowy (HCAL) - jest to ostatni z detektorów znajdujących się wewnątrz cewki magnesu, służy do pomiaru energii cząstek oddziałujących silnie. Pokrywa on obszar o $|\eta| < 5$. Informacja o energii i kierunku kaskad (pochodząca ze wszystkich kalorymetrów) umożliwi wyznaczanie energii i kierunku wytwarzanych w zderzeniu kwarków i gluonów.

Kalorymetr hadronowy składa się z czterech podsystemów - wewnętrznego kalorymetru beczki (Hadron Barrel Calorimeter- HB; pokrywa obszar o $|\eta| < 1.4$), kalorymetrów pokryw (Hadron Endcap Calorimeter - HE; $1.4 < |\eta| < 3$), kalorymetru do przodu (Hadron Forward Calorimeter - HF; $3.0 < |\eta| < 5.0$) oraz z umieszczonego poza solenoidem kalorymetru zewnętrznego (HO). Warto wspomnieć, że projekt trygera mionowego RPC umożliwia wykorzystanie danych z kalorymetru HO.

Zespół wszystkich kalorymetrów umożliwi również wyznaczenie brakującej energii, uchodzącej poza detektor w przypadku bardzo słabo oddziałujących cząstek, np. neutrin. Wyznaczanie brakującej energii może pomóc w poszukiwaniu nowych rodzajów cząstek, np. cząstek supersymetrycznych.

- Komory mionowe - są to detektory gazowe znajdujące się na zewnątrz cewki magnesu. W eksperymencie CMS wykorzystywane są trzy typy komór
 - Komory DT (Drift Tube) - znajdują się w obszarze beczki ($|\eta| < 1.3$). Wykorzystanie komór dryfowych w tym obszarze było możliwe dzięki małemu tłu promieniowania, stosunkowo małej częstotliwości mionów oraz dzięki małej wartości pola magnetycznego pomiędzy warstwami żelaza
 - Komory CSC (Cathode Strip Chamber) - znajdują się w obszarze pokryw ($0.9 < |\eta| < 2.4$), gdzie tło promieniowania, częstota mionów oraz wartość pola magnetycznego będą duże
 - Komory RPC (Resistive Plate Chamber) - stosowane są zarówno w beczce jak i pokrywach, w obszarze o $|\eta| < 2.1$, a więc pokrywają się z komorami DT i CSC. Charakteryzują się doskonałym czasem reakcji (~ 3 ns), co umożliwia dokładną identyfikację przecięcia wiązek. Przestrzenna zdolność rozdzielcza komór RPC jest jednak znacznie gorsza niż komór DT i CSC.

1.2.3. Wyzwalanie i akwizycja danych

W LHC zderzenia zachodzą z częstotliwością 40 MHz (co 25 ns). Objętość danych z pojedynczego zderzenia w eksperymencie CMS wynosi około 1 MB. Zapis wszystkich zderzeń wymagałby zatem obsługi strumienia danych 40 TB na sekundę, co przekracza możliwości dzisiejszych komputerów - możliwy do zapisania strumień jest rzędu 100 MB. Eksperyment CMS planuje zapisywać od 150 do 300 zdarzeń w każdej sekundzie. Oznacza to konieczność redukcji strumienia danych o 5 rzędów wielkości. Aby w pełni móc wykorzystać możliwości oferowane przez LHC, należy w efektywny sposób na bieżąco wybierać interesujące zderzenia. Zajmuje się tym system wyzwalania danych eksperymentu CMS.

Wyzwalanie w eksperymencie CMS odbywa się dwuetapowo. W pierwszym etapie częstota 40 MHz przypadków jest redukowana do częstoty rzędu kilkudziesięciu kHz (nie większej niż 100 kHz) przez tryger pierwszego stopnia (Level 1 Trigger - L1). Decyzja o akceptacji musi zostać podjęta dla każdego przypadku (czyli co 25 ns) w czasie krótszym niż $3.2\mu\text{s}$ (ograniczenie to wynika z długości buforów danych). Krótki czas reakcji wymaga, aby tryger pierwszego był stopnia realizowany przez dedykowaną elektronikę.

Przypadki, które zaakceptował tryger pierwszego stopnia, przetwarzane są następnie przez tryger wyższego stopnia (tj. High Level Trigger - HLT). Na tym etapie wykorzystywane są informacje pochodzące ze wszystkich systemów detektora CMS, w tym także z detektora śladowego. Tryger HLT realizowany będzie na farmie około 1000 komputerów klasy PC, na których działać ma dedykowane oprogramowanie. W wyniku działania trygera wyższego stopnia częstota przypadków ulega ostatecznej redukcji do wymaganego poziomu rzędu 100 Hz.

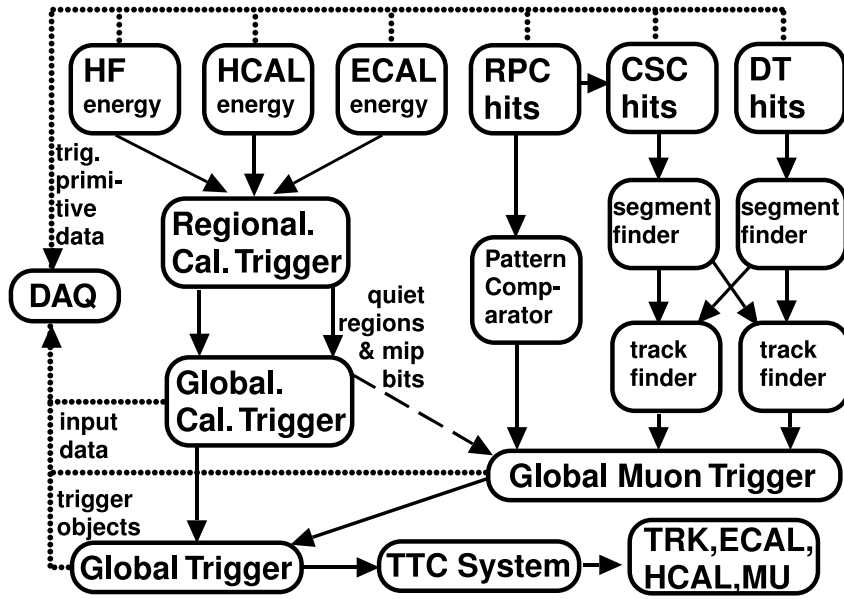
Zaakceptowane przypadki są następnie zapisywane w systemie przechowywania i analizy danych. Ma on strukturę warstwową:

- **Tier-0** - jest to pojedynczy i centralny ośrodek, znajdujący się w CERN. Głównym zadaniem ośrodka Tier-0 jest odczyt danych z systemu akwizycji CMS, a następnie wstępna rekonstrukcja przypadków, które są potem zapisywane i przesyłane do ośrodków z warstwy Tier-1
- **Tier-1** - jest to zbiór dużych ośrodków komputerowych rozsiianych po całym świecie, dysponujących szybkim połączeniem z ośrodkiem Tier-0. Do ich zadań należy przechowywanie i udostępnianie danych (według zadanych kryteriów) centrom Tier-2.
- **Tier-2** - ośrodki należące do tej warstwy są zwykle mniejsze od ośrodków Tier-1, ale jest ich znacznie więcej. Zapewniają one moc obliczeniową potrzebną do przeprowadzania analiz fizycznych. Wymagają one dostępu do ośrodków Tier-1, w celu otrzymania danych do analizy i zapisania wyników.

Rozproszenie systemu połączone z jego warstwową strukturą zapewnia prosty dostęp do danych na całym świecie i tym samym ułatwia przeprowadzanie ich analiz.

1.2.4. Konstrukcja trygera pierwszego stopnia

Konstrukcję trygera pierwszego stopnia przedstawia rysunek 1.2. Składa się on z trzech podstawowych systemów - trygera globalnego (L1 Global Trigger) i podległych mu trygera kalorymetrycznego (L1 Calorimeter Trigger) i trygera mionowego (L1 Global Muon Trigger, GMT). Tryger mionowy pobiera informację dostarczane przez trzy niezależnie od siebie działające trygery - tryger CSC, DT oraz RPC.



Rysunek 1.2: Konstrukcja trygera pierwszego stopnia

Aby uzyskać wymaganą redukcję częstości przypadków, tryger pierwszego stopnia wykorzystuje informacje pochodzące z systemów kalorymetrycznych i mionowych detektora CMS (informacje z detektora śladowego nie są wykorzystywane). Decyzja wypracowywana jest na podstawie informacji o zdeponowanych i brakujących energiach, obecności mionów, fotonów, elektronów i jetów.

Tabela 1.2 przedstawia menu trygera pierwszego stopnia dla początkowego okresu działania LHC [4] dla świetlności $\mathcal{L} = 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Założono maksymalną częstość przypadków przekazywaną przez tryger pierwszego stopnia równą 50 kHz. Przyjęty został czynnik bezpieczeństwa około trzy, tak że średnia częstość trygera L1 jest rzędu 20 kHz.

Kolumna tabeli “Warunek” zawiera informacje o występowaniu w danym przypadku obiektów koniecznych do wystąpienia trygera:

- $e\gamma$ - wystąpienie elektronu lub fotonu
- μ - wystąpienie mionu
- τ - wystąpienie leptonu τ
- H_T - zmierzona energia w kalorymetrach hadronowych (odpowiednio wysoka)
- E_T^{miss} - brakująca energia poprzeczna (odpowiednio wysoka)
- dżet - wystąpienie dżetu

Kolumna “Próg” zawiera informację o wymaganej minimalnej energii obiektów (lub pędu poprzecznego w przypadku mionów, wyrażonego w $\frac{\text{GeV}}{c}$). Możliwe jest też wyzwalanie na kombinacje obiektów wraz z zadanymi obiektami, np. warunek $\mu + \text{dżet}$ (7,100) oznacza konieczność wystąpienia mionu o pędzie poprzecznym co najmniej $7 \frac{\text{GeV}}{c}$ i dżetu o energii większej niż 100 GeV.

W kolumnie “Częstość” podana została częstość trygerów pochodząca z danego warunku dla świetlności.

W kolumnie “Częstość skumulowana” podana została częstość uwzględniająca częstość przypadków pochodząca z danego oraz wcześniejszych warunków trygera. Całkowita częstość trygera pierwszego stopnia nie jest równa sumie częstości z poszczególnych warunków, gdyż nie muszą być one rozłączne (tj. pojedynczy przypadek może spełniać więcej niż jeden warunek).

Tabela 1.3 [5] zawiera przykładowe wartości cięć na pędach poprzecznych mionów dla pierwszych tygodni działania LHC (światłość $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Kolumna “Skalowanie” zawiera wartość użytą do ograniczenia częstości trygerów przy danym cięciu. Wartość skalowania równa 1 oznacza, że zapisany zostanie każdy z przypadków spełniających dane kryterium, wartość skalowania równa 1000, że zapisany zostanie co 1000 przypadek spełniający dany warunek.

Warunek	Próg (GeV)	Częstość (kHz)	Częstość skumulowana (kHz)
$e\gamma$	22	4.2 ± 0.1	4.2 ± 0.1
podwójne $e\gamma$	11	1.1 ± 0.1	5.1 ± 0.1
μ	14	2.7 ± 0.1	7.8 ± 0.2
podwójne μ	3	3.8 ± 0.1	11.4 ± 0.2
τ	100	1.9 ± 0.1	13.0 ± 0.2
podwójne τ	66	1.8 ± 0.1	14.1 ± 0.2
Wystąpienie 1,2,3 lub 4 dżetów	150,100,70,50	1.8 ± 0.1	14.8 ± 0.3
H_T	300	1.2 ± 0.1	15.0 ± 0.3
E_T^{miss}	60	0.3 ± 0.1	15.1 ± 0.3
$H_T + E_T^{\text{miss}}$	200, 40	0.7 ± 0.1	15.3 ± 0.3
dżet + E_T^{miss}	100, 40	0.8 ± 0.1	15.4 ± 0.3
$\tau + E_T^{\text{miss}}$	60, 40	2.7 ± 0.1	17.4 ± 0.3
$\mu + E_T^{\text{miss}}$	5, 30	0.3 ± 0.1	17.6 ± 0.3
$e\gamma + E_T^{\text{miss}}$	15, 30	0.7 ± 0.1	17.7 ± 0.3
$\mu + \text{dżet}$	7, 100	0.1 ± 0.1	17.8 ± 0.3
$e\gamma + \text{dżet}$	15, 100	0.6 ± 0.1	17.8 ± 0.3
$\mu + \tau$	7, 40	1.2 ± 0.1	18.4 ± 0.3
$e\gamma + \tau$	14, 52	5.4 ± 0.2	20.7 ± 0.3
$e\gamma + \mu$	15, 7	0.2 ± 0.1	20.7 ± 0.3

Tablica 1.2: Menu trygera pierwszego stopnia dla niskiej światłości ($\mathcal{L} = 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Próg [$\frac{\text{GeV}}{c}$]	Skalowanie	Częstość (kHz)
3	1000	0.01 ± 0.00
5	1000	0.00 ± 0.00
7	1	1.11 ± 0.04
10	1	0.47 ± 0.03
14	1	0.18 ± 0.02
20	1	0.09 ± 0.01
25	1	0.06 ± 0.01

Tablica 1.3: Przykładowe cięcia trygera L1 dla pojedynczych mionów - początkowe miesiące działania LHC ($\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Rozdział 2

Tryger mionowy RPC

Tryger działający w oparciu o komory RPC (RPC trigger, nazywany często Pattern Comparator Trigger - PACT) jest jednym z podsystemów trygera pierwszego stopnia. Jego głównym zadaniem jest identyfikacja mionów o możliwie wysokich pędach poprzecznych, zarówno w obszarze beczki, jaki i pokryw. Realizowane jest ono przez zestaw dedykowanej elektroniki.

Za projekt i wykonanie trygera w oparciu o komory RPC w całości jest odpowiedzialna Grupa Warszawska CMS.

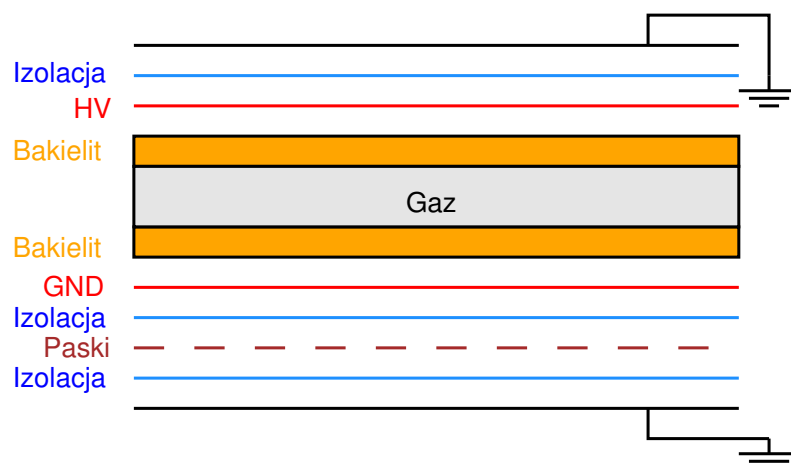
2.1. Działanie trygera RPC

Tryger RPC działa w oparciu o dane pochodzące z komór RPC. Zainstalowane są one zarówno w obszarze beczki, jak i pokryw, pokrywają obszar o $|\eta| < 2.1$. Komory RPC są gazowymi detektorami dedykowanymi do celów wyzwalania. Ze względu na dość słabą przestrzenną zdolność rozdzielczą ich pomiary są mało przydatne w rekonstrukcji mionów - do tego celu wykorzystywane są komory CSC i DT. Konstrukcje komory RPC przedstawia rysunek 2.1¹. Jej działanie opiera się na jonizacji powodowanej przez przelatujące naładowane cząstki (np. miony). Wolne elektrony, powstałe w procesie jonizacji, ulegają następnie zwielokrotnieniu w silnym jednorodnym polu pochodzącym od dwóch równoległych elektrod wykonanych z bakelitu. Powstająca w ten sposób lawina elektronów powoduje impuls elektryczny w paskach komory RPC, rejestrowany następnie przez układy odczytu komory.

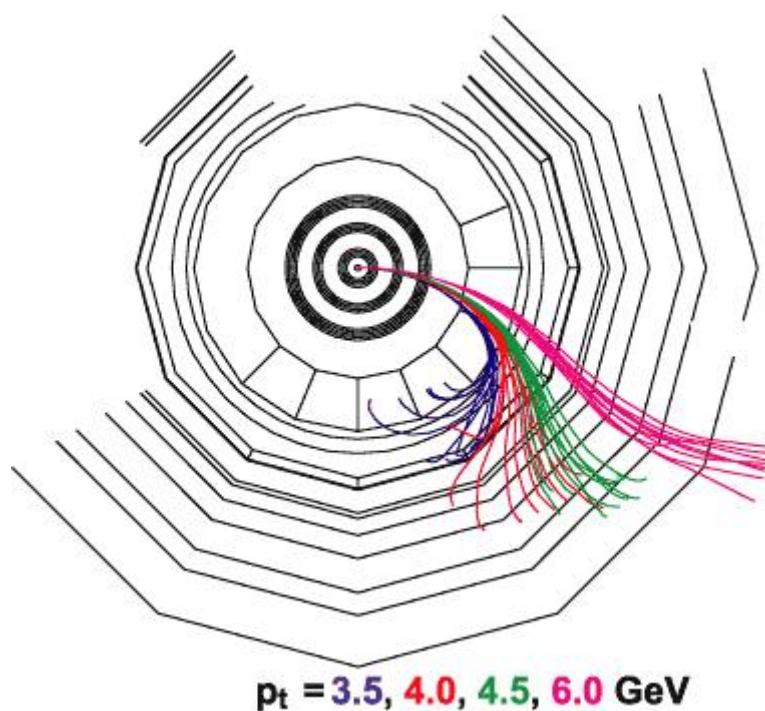
Tory mionów wyprodukowanych w kolizji są zakrzywiane w polu magnetycznym solenoidu. Rysunek 2.2 przedstawia przykładowe kształty trajektorii mionów o pędach poprzecznych p_t równych 3.5, 4, 4.5 oraz 6 GeV/c. Tory mionów o różnym pędzie poprzecznym są zakrzywiane w różnym stopniu (im większy pęd poprzeczny, tym mniejsza krzywizna toru), miony o różnych znakach są zakrzywiane w przeciwnych kierunkach. Umożliwia to pomiar pędu poprzecznego i identyfikację znaku mionu. Największe gięcie torów następuje wewnątrz cewki magnesu (tam, gdzie pole magnetyczne jest najsilniejsze), najsłabsze gięcie torów występuje w najdalszych obszarach pokryw. W obszarze, gdzie rozmieszczone są komory RPC, największe gięcie torów mionów następuje w beczce, możliwie blisko solenoidu.

Działanie trygera PACT opiera się na poszukiwaniu wcześniej zdefiniowanych układów zapalonych pasków (nazywanych wzorcami) wśród pasków komór RPC zapalonych w danym przecięciu wiązek. Układ zapalonych pasków pasujących do wzorca jest nazywany kandydatem

¹ Komory RPC eksperymentu CMS są komorami typu "double gap", w których paski znajdują się pomiędzy dwoma komorami z gazem. Ma to na celu zwiększenie efektywności, zasada działania komory pozostaje taka sama.



Rysunek 2.1: Schemat konstrukcji komory RPC. Wolne elektrony (powstałe na skutek oddziaływania komory z naładowaną cząstką) są zwielokrotniane w polu elektrycznym komory. Powstała lawina elektronów powoduje impuls elektryczny w paskach, rejestrowany następnie w układach odczytu komory (pominiętych na rysunku).



Rysunek 2.2: Podstawa działania trygera RPC. Tory o różnym kształcie odpowiadają mionom o różnym pędzie poprzecznym, co umożliwia jego pomiar.

na mion. Każdy z wzorców ma przypisany wcześniej kod pędowy (będący funkcją pędu poprzecznego, patrz tabela 2.1) i znak odpowiadający ładunkowi mionu.

Kod	$\frac{p_t}{c}$ [GeV]	Kod	$\frac{p_t}{c}$ [GeV]	Kod	$\frac{p_t}{c}$ [GeV]	Kod	$\frac{p_t}{c}$ [GeV]
1	0.0	9	5.0	17	18.0	25	60.0
2	1.5	10	6.0	18	20.0	26	70.0
3	2.0	11	7.0	19	25.0	27	80.0
4	2.5	12	8.0	20	30.0	28	90.0
5	3.0	13	10.0	21	35.0	29	100.0
6	3.5	14	12.0	22	40.0	30	120.0
7	4.0	15	14.0	23	45.0	31	140.0
8	4.5	16	16.0	24	50.0		

Tablica 2.1: Zakresy kodów pędowych. Liczby w kolumnach p_t oznaczają dolne zakresy przedziałów wyrażone w $\frac{\text{GeV}}{c}$.

2.2. Segmentacja i konstrukcja trygera RPC

Segmentację trygera RPC w pseudopośpieszności η ($\eta = -\ln(\tan(\frac{\theta}{2}))$), θ jest kątem liczonym względem wiązki) pokazuje rysunek 2.5. Obszar pseudopośpieszności pokrywany przez tryger RPC został podzielony na 33 tzw. wieże, których zakresy podano na rysunku. Każda z wież podzielona jest w płaszczyźnie $r\phi$ na 144 logiczne segmenty (każdy z nich odpowiada około 2.5° w ϕ). Dwanaście kolejnych logicznych segmentów formuje logiczny sektor (pokrywający około 30° w ϕ). Logiczne segmenty mogą być numerowane na dwa sposoby - globalny i lokalny. Globalna numeracja logicznych segmentów rozpoczyna się od wartości 0 dla pasków położonych w zakresie $5...7.5^\circ$ (w ϕ w układzie współrzędnych detektora CMS) i rośnie zgodnie ze współrzędną ϕ do wartości 143 dla pasków położonych w zakresie $2.5...5^\circ$. W numeracji lokalnej podaje się parę liczb (sc, sg), gdzie sc jest numerem logicznego sektora ($sg = \frac{S}{12}$, gdzie wynik dzielenia zaokrąglany jest w dół do najbliższej liczby całkowitej, S jest globalnym numerem logicznego segmentu, rys. 2.3), natomiast sg jest lokalnym numerem logicznego segmentu ($sc = S\%12$, gdzie % oznacza dzielenie modulo). Lokalna numeracja logicznych segmentów zmienia się w zakresie $(0,0) \dots (11,11)$.

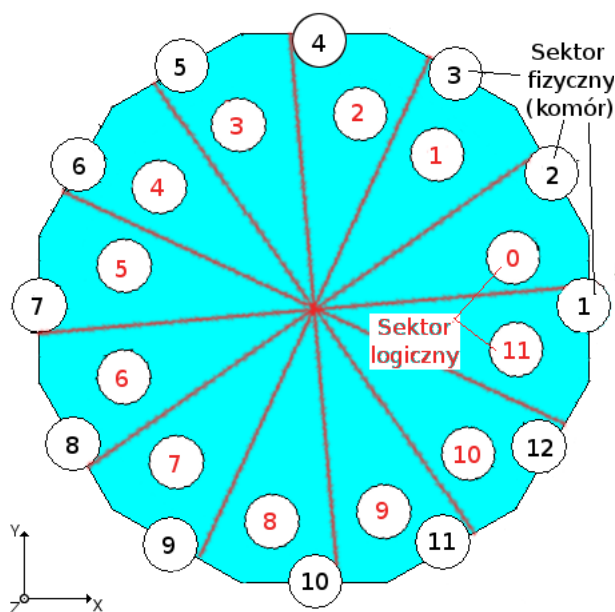
Schemat systemu RPC przedstawia rysunek 2.6. Sygnał z komór RPC odczytywany jest przez układy FEB (Front End Board; odczyt każdej komory realizowany jest zwykle przez 3, w obszarze pokryw, lub 6, w obszarze beczki, układów FEB), które przesyłają go do płyt LB (Link Board, każda płyta LB obsługuje jedną komorę). Zadaniem płyt LB jest bezstratna kompresja danych i przesłanie ich systemem światłowodów do dalszych części systemu [10]. Przesyłane są informacje tylko z tych komór, w których zapalone zostały jakiekolwiek paski.

Istnieją dwa rodzaje płyt LB - Slave oraz Master. Płyty Slave LB przekazują dane do odpowiadającej im (jednej) płyty Master LB, która następnie przesyła dane światłowodem do pokoju kontroli. Jedna płyta Master obsługuje jedną lub dwie płyty Slave.

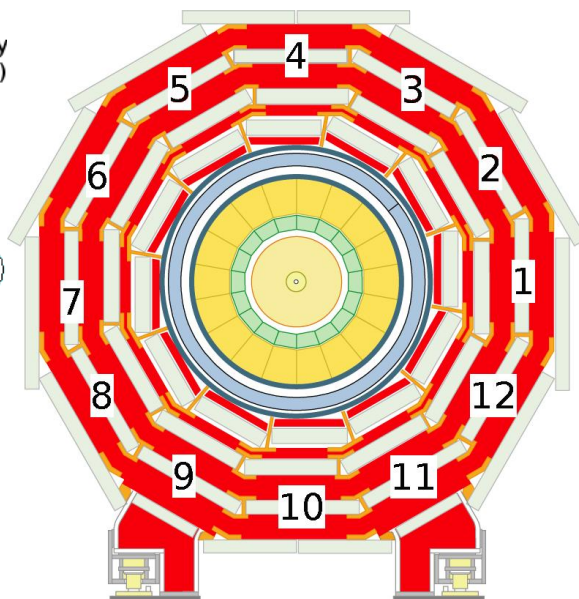
Płyty LB oraz układy FEB sterowane są przez płyty CB (Control Board). Ich zadaniem jest ładowanie oprogramowania (firmware) kontrolowanych układów oraz ustawienie ich parametrów działania, np. takich jak progi odczytu układów FEB.

Układy FEB montowane są bezpośrednio na komorach RPC, płyty CB i LB znajdują się w sąsiedztwie detektora, dlatego jest ważne, aby były one odporne na działanie promieniowania.

Dalsza część systemu RPC znajduje się w pokoju kontroli oddzielnym od detektora betonową przegrodą dużej grubości, dzięki czemu ta część systemu nie musi być odporna



Rysunek 2.3: Numeracja sektorów fizycznych (1...12) oraz przesuniętych względem nich sektorów logicznych (0...11). Na rysunku zaznaczono granice poszczególnych sektorów logicznych.



Rysunek 2.4: Przekrój w płaszczyźnie $r\phi$ beczki detektora eksperymentu CMS. Zaznaczono numery sektorów fizycznych.

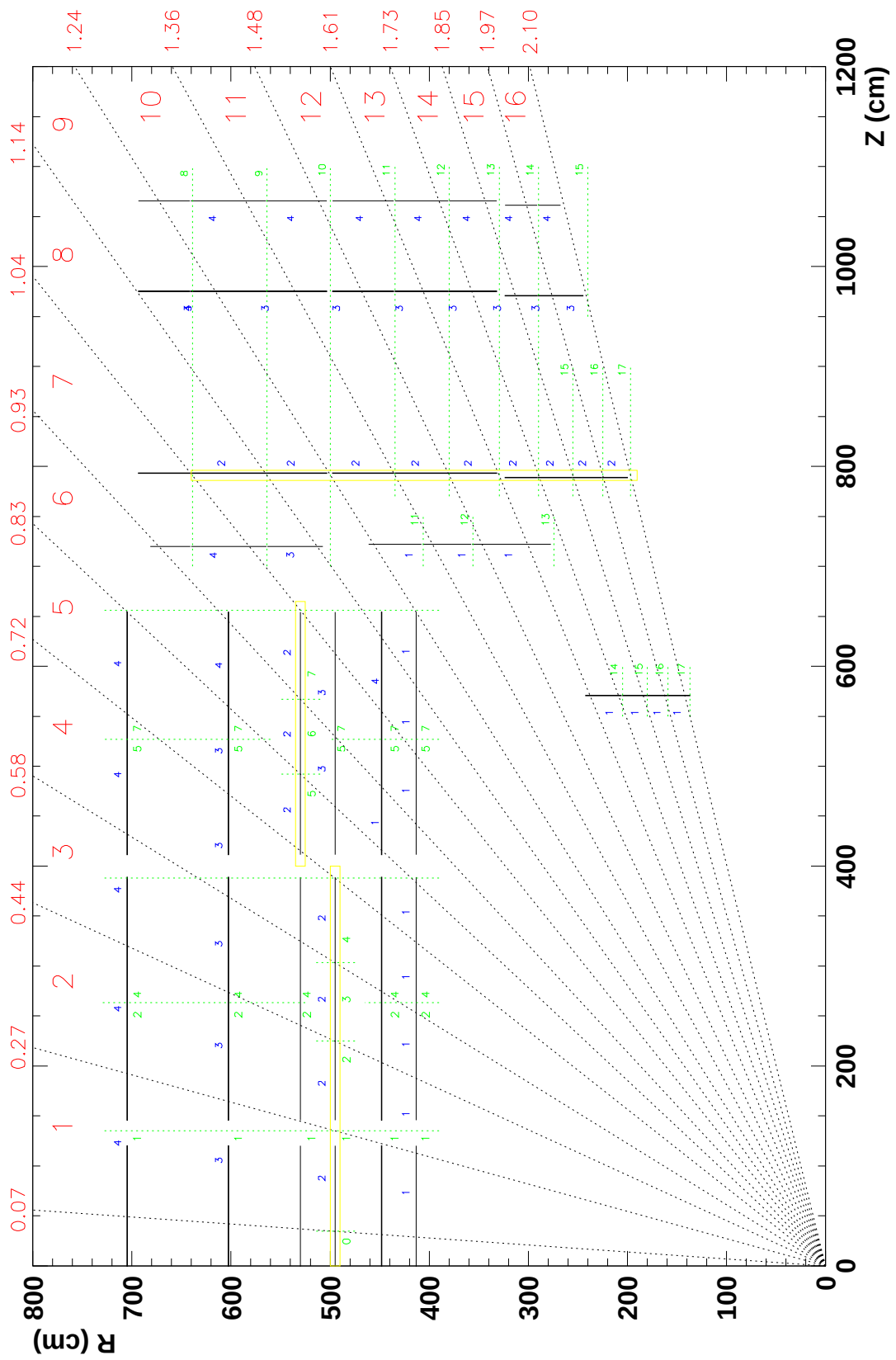
na działanie promieniowania.

Sygnały z płyt LB rozdzielane są za pomocą splitterów i trafiają do płyt TB (Trigger Board). Na płycie TB sygnały kierowane są do układów RMB (Readout Mother Board), znajdujących się na każdej z płyt TB. Układ RMB przesyła dane do układu akwizycji danych (DAQ - Data Acquisition) eksperymentu CMS (poprzez płyty DCC - Data Concentrator Card) [11].

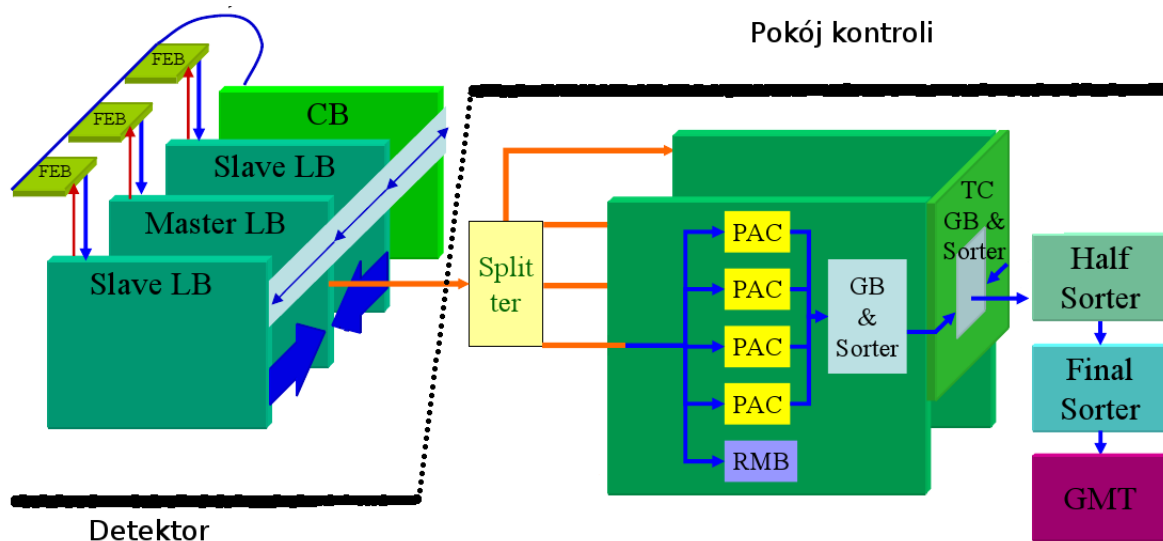
Na płycie TB sygnały trafiają także do procesorów PAC (Pattern Comparator; każda płyta TB zawiera od 3 do 4 procesorów PAC). Procesory PAC implementowane są w technologii FPGA. W jednym procesorze PAC (nazywanym również PAC-chipem) znajduje się 12 komparatorów PAC. Każdy z komparatorów PAC grupuje sygnały o zapalonych paskach (pochodzące ze splitterów) w tzw. logiczny stożek, składający się z kilku (od 3 do 6) logicznych płaszczyzn. Każda logiczna płaszczyzna składa się z tzw. logicznych pasków. Każdemu z logicznych pasków odpowiada od jednego do dwóch rzeczywistych pasków o tej samej współrzędnej w ϕ , lecz różnej w η . Procesor PAC obsługuje jeden logiczny sektor jednej wieży.

Każdy z komparatorów PAC obsługuje dokładnie jeden logiczny stożek (czyli logiczny segment). Większość pasków z komór RPC przypisana jest do kilku logicznych stożków. Nie dotyczy to pasków płaszczyzny referencyjnej, które należą do dokładnie jednego stożka. Zatem każdy stożek jest definiowany przez 8 pasków należących do płaszczyzny referencyjnej.

Każda płyta TB obsługuje ustalony sektor logiczny trzech lub czterech wież w η (procesory PAC płyty TB obsługują logiczne sektory o tym samym numerze, leżące w sąsiednich wieżach; jeden procesor obsługuje sektor jednej wieży). Na każdej z płyt znajduje się układ sortowania TB (Trigger Board Sorter). Wybiera on czterech kandydatów na mion spośród kandydatów



Rysunek 2.5: Segmentacja trygera RPC w η . Zaznaczono granice w η poszczególnych wież. Żółtym kolorem zaznaczono płaszczyzny referencyjne.



Rysunek 2.6: Schemat systemu trygera RPC. Dane z komór odczytywane przez układy FEB, trafiają do płyt LB, skąd są przesyłane do pokoju kontroli, gdzie znajduje się elektronika trygera RPC.

zwróconych przez znajdujące się na płycie procesory PAC.

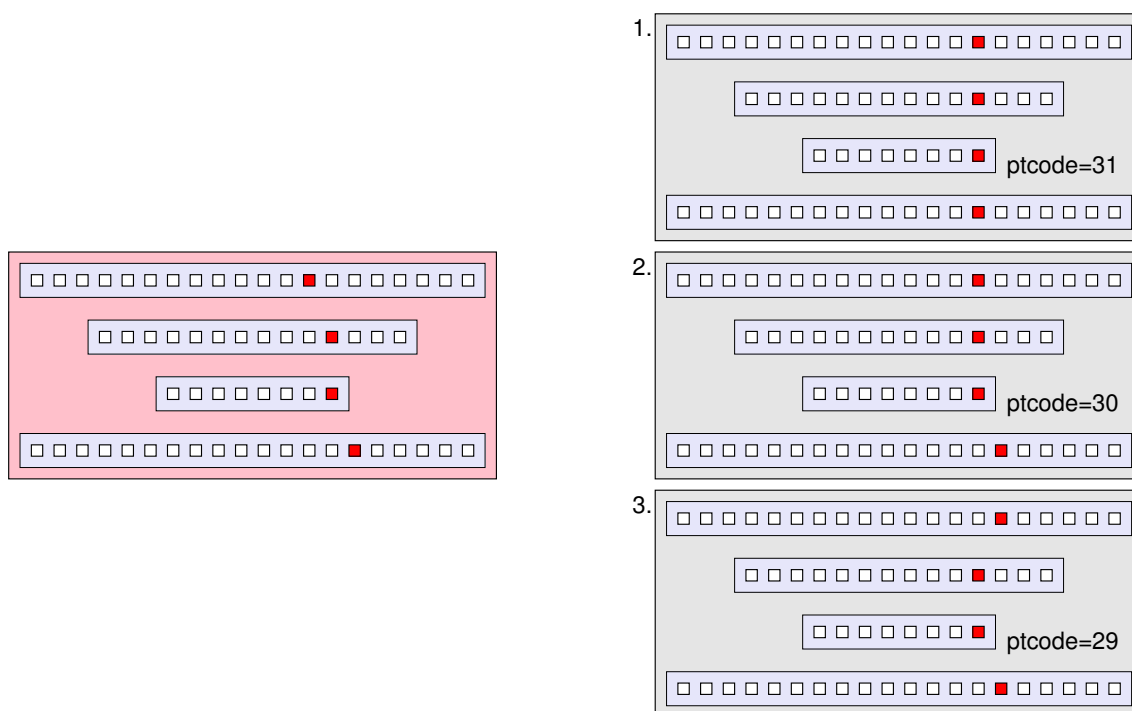
Płyty TB znajdują się w kasetach trygerowych (Trigger Crate; TC). Każda kaseeta zawiera 9 płyt TB (każda płyta obsługuje ten sam sektor logiczny). Jedna kaseeta trygerowa obsługuje wszystkie wieże trygera RPC (tj. obszar o $-2.1 < \eta < 2.1$). Tryger RPC składa się z 12 kaset trygerowych. Każda kaseeta trygerowa wybiera czterech najlepszych kandydatów na miony spośród kandydatów zwróconych przez podległe płyty TB (bez rozróżniania, czy kandydaci na miony pochodzą z obszaru pokryw lub beczi).

Kandydaci na miony z kaset trygerowych przesyłani są do układów półsortowania (Half Sorter - HS). Każdy układ HS sortuje kandydatów na miony znalezionych w połowie detektora CMS (180° w ϕ). Kandydaci na miony zwrócenieni przez układy HS (do czterech dla beczi i czterech dla pokryw) przesyłani są do układu końcowego sortowania (Final Sorter - FS). Wybiera on do 8 kandydatów na miony - nie więcej niż czterech dla beczi i nie więcej, niż czterech dla pokryw - przekazywanych następnie do globalnego trygera mionowego (GMT - Global Muon Trigger).

2.3. Algorytmy komparatora PAC

Istnieją dwie przetestowane implementacje komparatora PAC - implementacja oparta ma algorytmie podstawowym, oraz na algorytmie ekonomicznym. Każdy z algorytmów działa na podstawie informacji o zapalonych paskach, odpowiadających jednemu stożkowi logicznemu. Obecnie żadna z przetestowanych implementacji algorytmów nie ma możliwości redukcji klastrów² w danych pochodzących z komór.

²Klaster - zapalone co najmniej 2 sąsiednie paski komory RPC.



Rysunek 2.7: Przykład działania algorytmu podstawowego. Układ zapalonych pasków (po lewej) porównywany jest z listą wzorców (po prawej).

2.3.1. Algorytm podstawowy (Standard, Baseline)

W algorytmie tym każdy wzorec jest oddzielnie porównywany z układem zapalonych (logicznych) pasków. Wzorec uważany jest za pasujący, jeśli zgadzają się z nim logiczne paski w co najmniej:

- 4 z 6 płaszczyzn w obszarze beczki dla wzorców wysokopędowych
- 3 z 4 wewnętrznych płaszczyzn w obszarze beczki dla wzorców niskopędowych
- 3 z 4 płaszczyzn w obszarze pokryw dla wszystkich wzorców

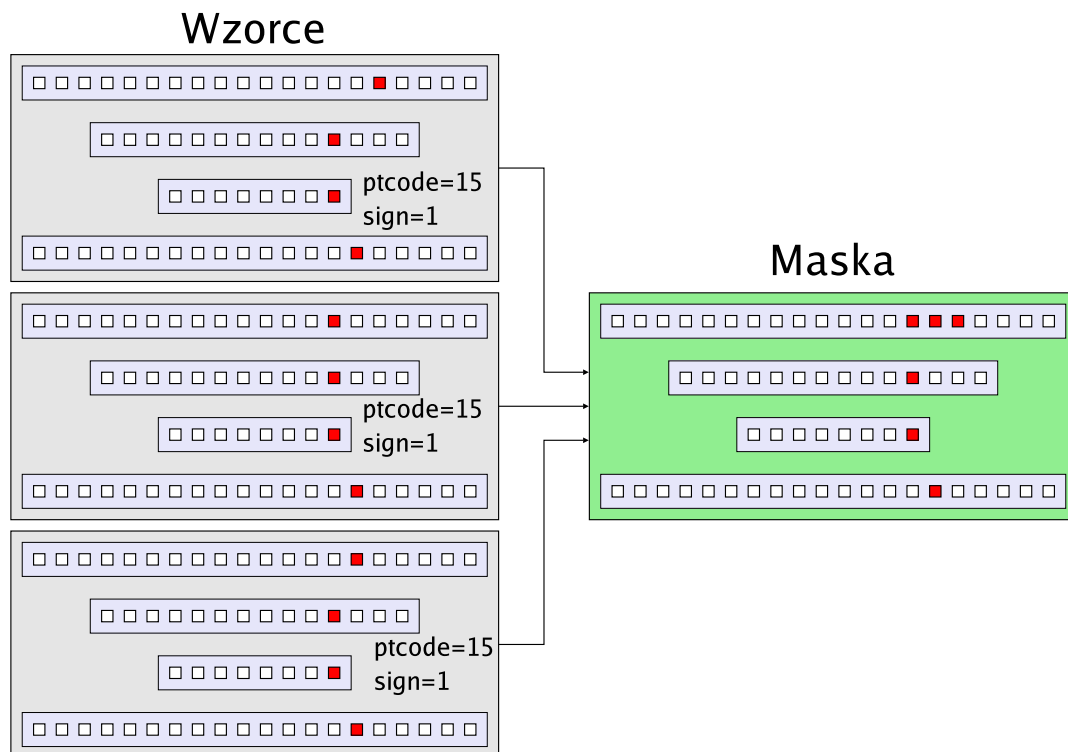
Każdemu z pasujących wzorców przypisywana jest następnie jakość (liczba z zakresu $0 \dots 3$ określana na podstawie liczby zgodnych płaszczyzn między wzorcem a układem zapalonych pasków; jakość 0 oznacza zgodność w trzech płaszczyznach, jakość 3 oznacza zgodność wzorca w sześciu płaszczyznach). Odpowiedzią komparatora PAC jest kod pędowy wzorca (dalej nazywany kandydatem na mion), któremu przypisana została najwyższa wartość jakości. Jeśli wzorcem przypisana została ta sama wartość jakości, wybierany jest spośród nich ten o najwyższym kodzie pędowym.

Zasadę działania algorytmu podstawowego ilustrują rysunek 2.7. Do wypełnionej stożka (po lewej stronie) przyporządkowany jest wzorec z największą liczbą zgodnych płaszczyzn. Jeśli kryterium to nie jest rozstrzygające, przypisywany jest wzorec o najwyższym kodzie pędowym. Dla stożka i wzorców z rysunku 2.7 w pierwszym kroku wybrane zostają wzorce nr 2 i 3, mające zgodne po trzy płaszczyzny. Ostatecznie wybrany zostaje wzorec nr 2, mający przypisaną wyższą wartość kodu pędowego.

Obecna implementacja algorytmu podstawowego wymaga układów FPGA o większej pojemności niż posiadana przez układy wybrane do konstrukcji trygera RPC. Konieczne było stworzenie i zaimplementowanie algorytmu umożliwiającego stosowanie wybranych układów. Z tego powodu powstał algorytm ekonomiczny.

2.3.2. Algorytm ekonomiczny (Economic)

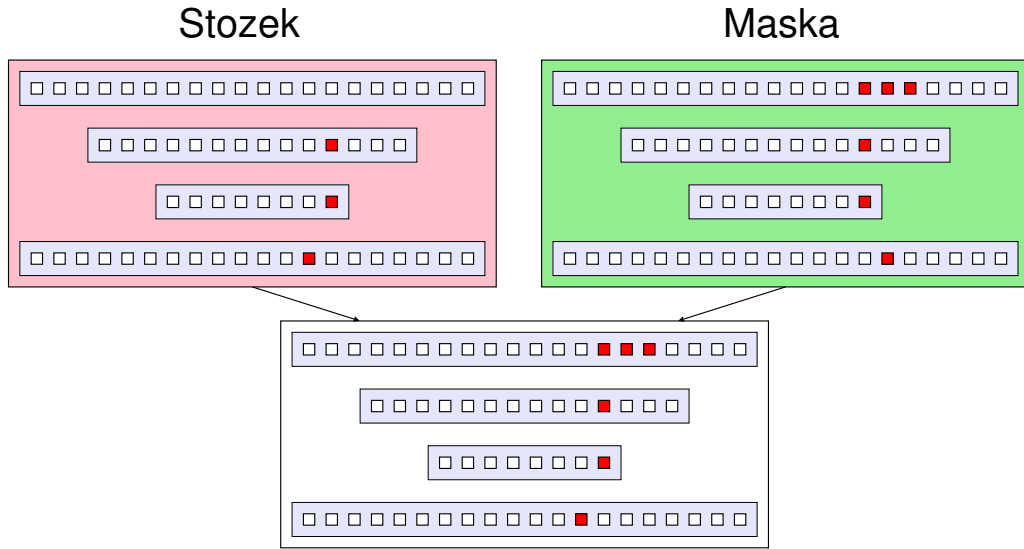
Aby umożliwić stosowanie mniejszych układów FPGA, w algorytmie ekonomicznym wzorce mające ten sam znak, kod pędowy i jakość są łączone w grupy. Grupowanie wzorców przedstawia rysunek 2.8. W wyniku grupowania wzorców powstaje maska, używana następnie



Rysunek 2.8: Grupowanie wzorców w algorytmie ekonomicznym. W wyniku grupowania powstaje maska (po prawej stronie) wykorzystywana do obliczania jakości i wykrycia płaszczyzn pozbawionych trafień.

do obliczenia jakości w obrębie grupy (w algorytmie podstawowym jakość obliczana była dla każdego z kandydatów oddzielnie). W kolejnym kroku algorytmu ekonomicznego maska wykorzystywana jest do wykrycia płaszczyzn, w których nie zapalił się żaden z pasków. Paski z takich płaszczyzn są następnie w sposób sztuczny włączane na poziomie logiki komparatora PAC (zostają włączone tylko te paski, które włączone były w masce). Ilustruje to rysunek 2.9.

Do sprawdzenia czy układ zapalonych pasków pasuje do danego wzorca, dzięki grupowaniu i dopełnianiu płaszczyzn pozbawionych trafień, wystarczy jedna operacja AND. Dla algorytmu podstawowego (w przypadku gdy działał w oparciu o 6 płaszczyzn) należało wykonać jedną operację AND6, 5 operacji AND5 (jedna niepasująca płaszczyzna) oraz 15 operacji AND4 (dwie niepasujące płaszczyzny). Umożliwia to wykorzystanie układów FPGA mających mniejszą pojemność.



Rysunek 2.9: Wykrywanie brakujących płaszczyzn w algorytmie ekonomicznym. Maska powstała w wyniku grupowania (po prawej) służy do wypełnienia płaszczyzn stożka (po lewej) pozabawionych trafień.

Wadą algorytmu ekonomicznego jest mniejsza odporność na szumy komór RPC. Potrafi on zawieść w przypadkach, gdy przelatujący mion nie zapali żadnych pasków w danej płaszczyźnie i jednocześnie, na skutek szumu komory RPC (lub wyemitowanego wcześniej przez mion elektronu delta lub fotonu), zapalony zostanie pasek w innym miejscu tej płaszczyzny. W tej sytuacji możliwe jest, że algorytm ekonomiczny nie znajdzie żadnego mionu (żaden ze wzorców nie będzie pasował), gdyż płaszczyzna nie zostanie uznana za brakującą.

2.4. Usuwanie duchów (ghostbusting)

Pasek w danej komorze RPC może mieć wkład do kilku logicznych stożków. Każdy mion może być zatem niezależnie “widziany” przez kilka różnych komparatorów PAC. Sytuacja, gdy dla rzeczywistego mionu tryger RPC zwraca więcej niż jednego kandydata, nazywa się pojawianiem się duchów (ghost). Pojawianie się duchów jest niekorzystne, gdyż prowadzi do niepotrzebnego zwiększenia częstości przypadków trygera pierwszego stopnia³. Potrzebne są zatem metody efektywnie eliminujące duchy (ghostbusting).

Zasadę działania algorytmu usuwania duchów przedstawić można w dwuwymiarowej tabeli, której komórki oznaczane są numerem wieży (współrzędna proporcjonalna do η) oraz numerem logicznego segmentu. Każdej z komórek odpowiadać może kandydat na mion. Zwykle jedna z dwóch sąsiadujących, niepustych, komórek (tj. odległych o nie więcej niż 1 w każdej ze współrzędnych tabeli) zostaje uznana za ducha. Wybór pomiędzy dwoma komórkami (kandydatami na miony) odbywa się na podstawie wartości jakości (kandydat o niższej jakości uznawany jest za ducha). Jeśli sąsiadujące komórki mają tę samą wartość jakości decyduje kod pędowy (kandydat o niższym kodzie uznawany jest za ducha)[12]. Działanie algorytmu ilustruje rysunek 2.10. Na rysunku przedstawiono wycinki dwóch tabel - przed i po działaniu

³Wymagana do akceptacji wartość pędu poprzecznego mionu jest znacznie niższa w przypadku, gdy w zdarzeniu pojawia się więcej niż jeden mion. Ponadto wystąpienie ducha może prowadzić do zwiększenia estymaty pędu poprzecznego mionu.

Przed usuwaniem duchów:

Wieża	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
											59
		1					2				58
		31					30				57
		2	3			1			1		56
		28	27			30			31		55
		1							1		
		30							30		

Po usunięciu duchów:

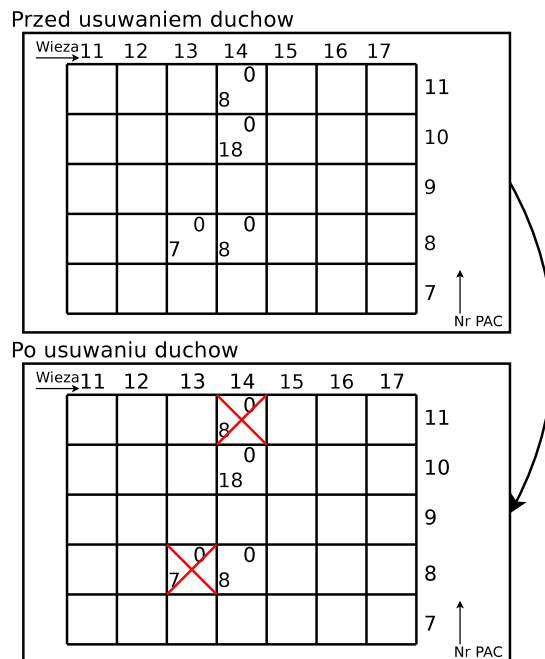
Wieża	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
											59
		1					2				58
		31					30				57
		2	3			1			1		56
		28	27			30			31		55
		1							1		
		30							30		

Rysunek 2.10: Zasada usuwania duchów w trygerze RPC. W dolnym lewym rogu komórek zapisany został kod pędowy, a w górnym prawym wartość jakości.

algorytmu usuwania duchów. Rysunek 2.11 ilustruje przypadek, w którym algorytm usuwania duchów zawiódł. Komparator PAC o współrzędnych (14, 9) nie znalazł żadnego kandydata na mion, a więc warunki algorytmu nie zostały spełnione.

Na skutek ograniczeń związanych z segmentacją trygera PACT algorytm usuwania duchów realizowany jest na różnych stopniach trygera[13]:

1. **Płyta TB** - usuwanie duchów odbywa się tutaj dwuetapowo. W pierwszym kroku usuwanie duchów wykonywane jest wzdłuż współrzędnej ϕ oddzielnie w obrębie każdej z wież obsługiwanych przez daną płytę. Ponieważ każda z płyt obsługuje jeden sektor logiczny, tj. 30° w ϕ , usuwanie duchów na płycie odbywa się tylko w tym zakresie. Kandydaci na miony, którzy nie zostali usunięci podczas pierwszego etapu, poddawani są procedurze usuwania duchów w η . Zachodzi ona dla wież obsługiwanych przez daną płytę TB. Spośród kandydatów na miony, którzy pozostali po procesie usuwania duchów, każda z płyt TB wybiera czterech najlepszych, przekazywanych następnie do układu sortowania kasety trygera. Kryterium wyboru opiera się na jakości (wyższa wartość jest lepsza), następnie na kodzie pędowym (ponownie wyższa wartość jest lepsza) i na końcu na znaku kandydata (kandydaci z przypisanym znakiem "-" są preferowani).
2. **Kaseta trygera** - wykonuje usuwanie duchów w η dla wszystkich 33 wież (i wycinka 30° w ϕ - jeden logiczny sektor). Ponieważ każda z płyt TB obsługuje tylko część wież, to zadaniem układu sortowania znajdującego się w kasecie trygera jest usunięcie duchów ze skrajnych wież obsługiwanych przez każdą z podległych płyt TB. Układ sortowania kasety trygera wybiera następnie czterech najlepszych kandydatów na miony według tych samych kryteriów, co układ sortowania płyty TB
3. **Układy HS i FS** - zajmuje się usuwaniem duchów w ϕ , obsługuje wycinek odpowiadający połowie detektora (tj. 180° w ϕ , 6 logicznych sektorów). Aby algorytm



Rysunek 2.11: Przypadek, w którym algorytm usuwania duchów zawodzi ze względu na nieodnalezienie mionu przez komparator 9 z wieży 14. W symulacji wygenerowano pojedynczy mion, warunki algorytmu usuwania duchów nie są jednak spełnione. W tym przypadku tryger RPC przekazał dwóch kandydatów na miony do trygera GMT.

mógł działać poprawnie, każdy z dwóch układów półsortowania dodatkowo pobiera informację z dwóch, skrajnie położonych, logicznych sektorów obsługiwanych przez drugi z układów HS. Po usunięciu duchów, każdy z układów HS wybiera czterech kandydatów na miony (według tych samych kryteriów, jakie stosowane były na poprzednich stopniach), przekazywanych następnie do układu FS. Wybiera on czterech najlepszych kandydatów na miony z obszaru beczki oraz czterech z obszaru pokryw.

Rozdział 3

Algorytmy generacji i optymalizacji wzorców pędowych

W rozdziale tym opisano trzy algorytmy. Algorytm B zaprojektowany i zaimplementowany został przez Karola Buńkowskiego [14], a algorytmy C i D zostały zaprojektowane i zaimplementowane w ramach niniejszej pracy.

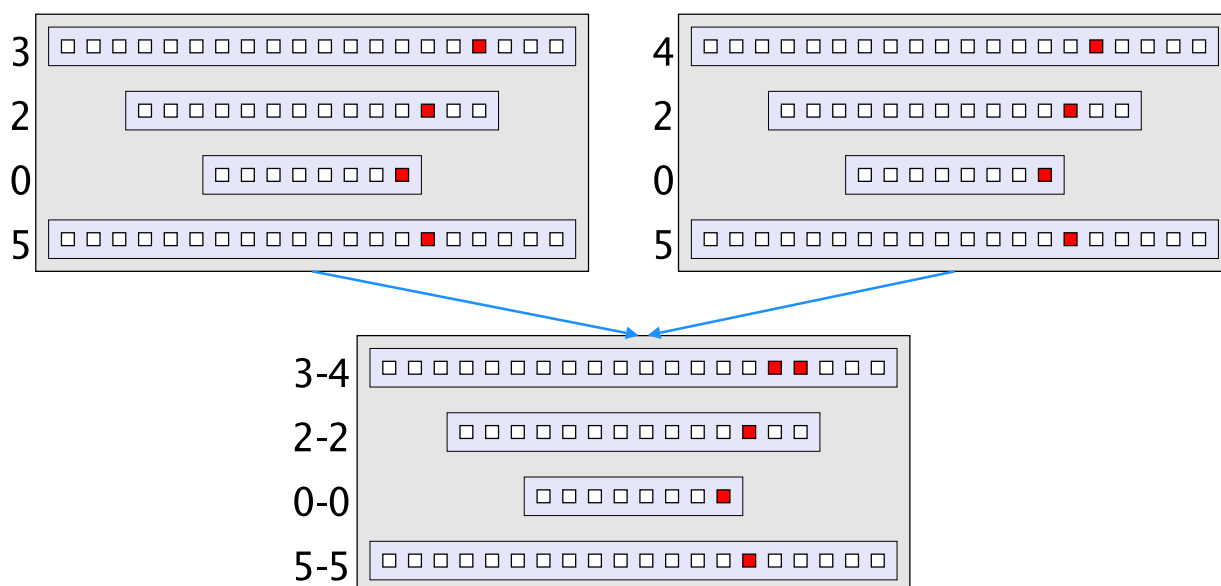
3.1. Ogólne zasady działania algorytmów

We wszystkich z testowanych algorytmów generacji wzorców występuje kilka podobnych kroków:

- **Generacja próbek.** Generacja wzorców pędowych we wszystkich opisanych algorytmach zaczyna się od generacji odpowiednio dużej statystyki przypadków mionowych dla detektora CMS¹. Generacja próbek odbywała się w środowisku CMSSW, przy wykorzystaniu zmodyfikowanego modelu działania komór RPC. W modelu tym komory mają 100% wydajność przy zerowym poziomie szumów. Co więcej, oddziaływanie mionu z komorą powoduje zapalenie dokładnie jednego paska. Osiągnięto to dzięki wyłączeniu klastryzacji oraz ignorowaniu oddziaływania z komorami RPC innych cząstek niż miony².
- **Preselekcja wzorców.** Każdy z oddziałujących z komorami RPC mionów powoduje wypełnienie kilku-kilkunastu logicznych stożków. Z każdego z wysymulowanych przypadków mionowych wybierany jest jeden (w pewnych specyficznych przypadkach dwa) stożek logiczny, spełniający kryteria danego algorytmu. Układ zapalonych pasków w wybranym stożku nazywany jest dalej wzorcem.
- **Wybór wzorców.** Niektóre z wzorców otrzymanych w poprzednim kroku pojawiają się ze znacznie większym prawdopodobieństwem niż inne. W tym kroku, oddzielnie dla każdej z wież, wybierane są wzorce najbardziej prawdopodobne w taki sposób, aby efektywność rekonstrukcji w danym kodzie pędowym była odpowiednio duża.

¹Pęd mionów losowany jest w taki sposób, aby pełna statystyka miała płaski rozkład w kodzie pędowym oraz w η (w zakresie $[-2.1, 2.1]$)

²Próbki mionów wykorzystywane do testowania wzorców generowane były w sposób realistyczny - włączana była klastryzacja, komory miały określoną efektywność (różną od 100%), zapalenie pasków mogły powodować także inne cząstki niż miony.



Rysunek 3.1: Scalanie wzorców. Rysunek przedstawia zarówno graficzną jak i liczbową reprezentację wzorców (paski we wzorcach numerowane są od 0). Dwa wybrane wzorce zostają połączone, w wyniku czego powstały wzorec reprezentowany jest przez zakresy liczb w odpowiednich płaszczyznach.

- **Scalanie wzorców.** Scalanie (łączenie) wzorców służy zmniejszeniu zajętości układów FPGA poprzez ograniczenie liczby wzorców. Kryteria i sposób łączenia wzorców mogą być różne dla każdego z algorytmów.

Przykład scalania wzorców przedstawia rysunek 3.1. Przed operacją łączenia każdy wzorec reprezentowany jest przez serię liczb - każdej płaszczyźnie odpowiada dokładnie jedna liczba określająca numer zapalonego paska. Wzorec powstały w wyniku scalania reprezentowany jest przez serię zakresów - każdej płaszczyźnie odpowiadają dwie liczby.

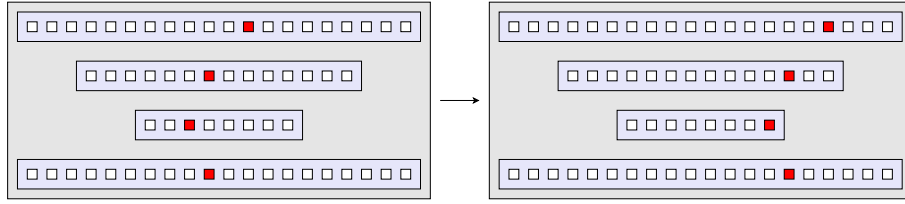
3.2. Algorytmy generacji wzorców pędowych

Do rozumienia wszystkich z opisywanych algorytmów kluczowe są trzy pojęcia:

- **Krotność wzorca względem kodu pędowego p** - oznacza liczbę mionów i antymionów które wygenerowały dany wzorec o pędzie poprzecznym z przedziału odpowiadającego kodowi pędowemu p
- **Charakterystyka pędowa wzorca** - zbiór wszystkich krotności danego wzorca, z rozróżnieniem na miony i antymiony
- **Względna efektywność rekonstrukcji** - efektywność liczona względem liczby przypadków, w których możliwe było znalezienie kandydata na mion.

3.2.1. Algorytm B

Jest to algorytm jednoprzbiegowy. Składa się on z następujących kroków:



Rysunek 3.2: Obracanie stożka do zerowego paska w płaszczyźnie referencyjnej (algorytm B)

1. **Wybór stożków.** Spośród logicznych stożków dostępnych w każdym zdarzeniu wybierany jest ten, który ma zapalony pasek w płaszczyźnie referencyjnej³.

W zdarzeniach, w których nie ma stożków z zapaloną płaszczyzną referencyjną, wybierane są stożki z największą liczbą zapalonych płaszczyzn, leżące w wieży odpowiadającej początkowej wartości η generowanego mionu. Na wybranych stożkach uruchamiana jest następnie emulacja trygera RPC. Jeśli w wyniku działania emulacji znaleziony zostanie dokładnie jeden kandydat na mion, to wybierany jest ten stożek, którego współrzędne zgodne są ze współrzędnymi znalezionej kandydata. Wybrany stożek ma następnie zapalany pasek w płaszczyźnie referencyjnej, równy numerowi paska z płaszczyzny referencyjnej wzorca, który wygenerował uprzednio kandydata na mion.

W przypadku gdy liczba wypełnionych płaszczyzn w wybranym stożku nie pozwalałaby na wypracowanie decyzji trygera⁴, dany stożek jest odrzucany.

2. **Obrót stożków i generacja wzorców.** Każdy ze stożków wybranych w poprzednim kroku jest obracany w taki sposób, aby pasek z płaszczyzny referencyjnej miał numer 0 (rys. 3.2), dzięki czemu przy generacji można wykorzystać mniejszą statystykę przypadków mionowych. Jeżeli układ zapalonych pasków obróconego stożka został wcześniej dodany do listy wzorców, jego charakterystyka pędowa zostaje uaktualniona. W przeciwnym przypadku lista wzorców zostaje rozszerzona o wzorec odpowiadający obróconemu stożkowi.

Wzorce wybrane ze wszystkich zdarzeń mionowych formują listę wzorców W_a .

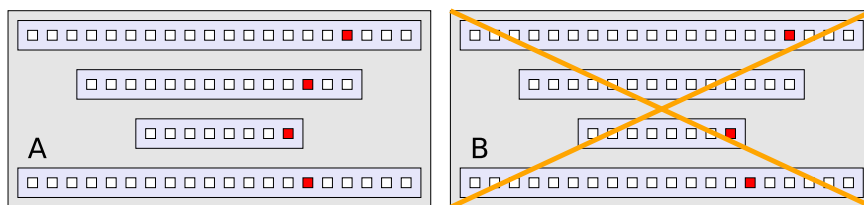
3. **Wybór wzorców, nadanie kodu pędowego, scalanie.** Dla każdego kodu pędowego p , zaczynając od najwyższego z kodów (tj. 31), uruchamiana jest następująca procedura:

- (a) Z listy wzorców W_a wybierany jest wzorec w , który ma najwyższą krotność względem aktualnego kodu pędowego p . Wybrany wzorec w usuwany jest z listy W_a .
- (b) Dla wybranego wzorca w z listy W_a wyszukiwane są wzorce zgodne, tj. mające taki sam układ pasków, zdefiniowany w mniejszej lub takiej samej liczbie płaszczyzn⁵. Wzorce zgodne usuwane są z listy W_a . Charakterystyka pędowa wzorca w zostaje uaktualniona. Operacja ta nazywana jest inkluzją wzorców (rys. 3.3).

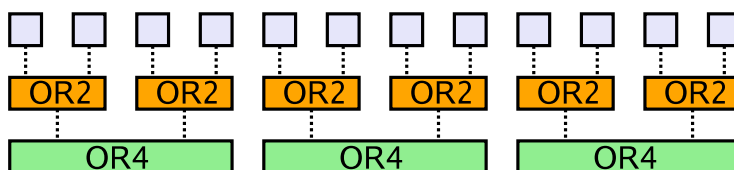
³Na granicy wież 4 i 5 oraz 7 i 8 jest możliwe, że przelatujący mion zapali paski w płaszczyznach referencyjnych dwóch stożków (porównaj rys. 2.5) leżących w różnych wieżach. W takim przypadku wybierany jest stożek leżący w wieży, której numer odpowiada wartości η w wierzchołku mionu.

⁴Wymagana liczba płaszczyzn to co najmniej 3 w obszarze pokryw, co najmniej 4 w obszarze beczki lub co najmniej 3 z 4 wewnętrznych płaszczyzn w obszarze beczki (dla mionów niskopędowych).

⁵Może się zdarzyć, że kandydat na wzorec zgodny będzie miał zdefiniowaną płaszczyznę, która nie jest zdefiniowana we wzorcu w . Wzorec taki nie jest uznawany za zgodny.



Rysunek 3.3: Inkluzja wzorców - wzorec B, zgodny (mający takie same zakresy, zdefiniowane jednak w mniejszej liczbie płaszczyzn) z wzorcem A, usuwany jest z listy wzorców.



Rysunek 3.4: Zasada tworzenia superstripów (algorytmy B i D)

- (c) Poniżej pewnej, ustalonej wartości p procedura opisana w punkcie (b) poprzedzana jest procedurą zwielokrotniania/generacji wzorców opartych na superstripach. Zasadę określania superstripów ilustruje rysunek 3.4. Każdemu z pasków wzorca przypisywany jest odpowiedni zakres. Jego rozmiar (1,2,4,...) jest parametrem działania algorytmu.

Wybrany wzorec w jest n_p -krotnie kopiowany (n_p jest rozmiarem superstripu w płaszczyźnie referencyjnej dla kodu pędowego p). Każda z powstałych w ten sposób n_p kopii wzorca w jest następnie obracana o 0, 1, 2, ..., $n_p - 1$ pasków. Każdy z powstałych w ten sposób wzorców zmieniany (konwertowany) jest następnie na wzorec oparty na superstripach (rysunek 3.5). Procedura opisana w punkcie (b) uruchamiana jest dla każdego z powstałych w ten sposób wzorców.

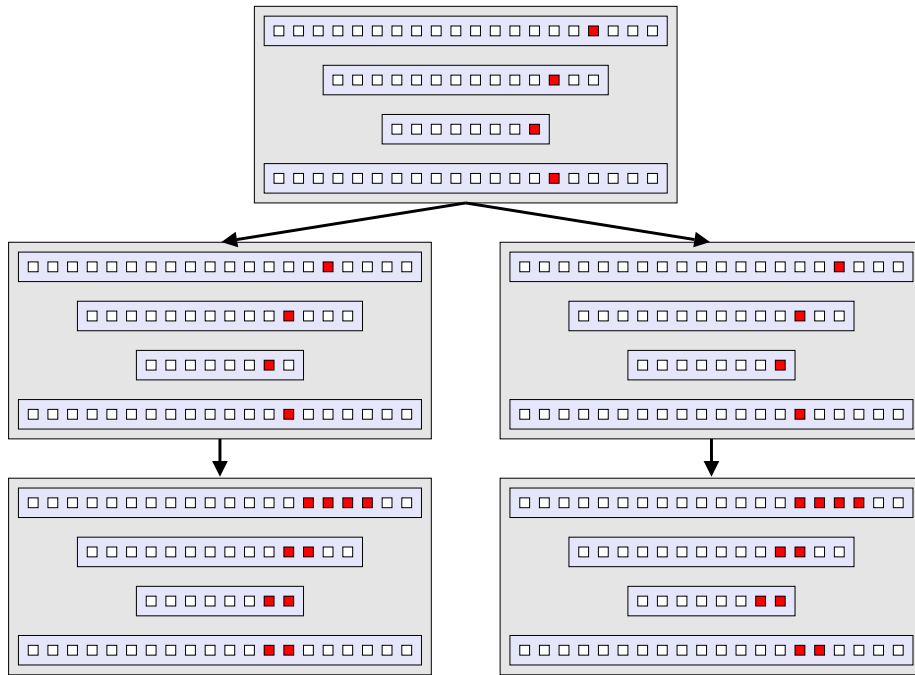
Wybranemu wzorcowi w (lub wzorcom powstałym w wyniku operacji zwielokrotniania) przypisywany jest aktualnie rozpatrywany kod pędowy p . Wzorec ten dopisywany jest do końcowej listy wzorców.

Procedura, opisana w punktach (a)-(c) powtarzana jest tak długo, aż wybrana zostanie taka liczba wzorców, aby względna efektywność rekonstrukcji mionów o generowanym kodzie pędowym p , była nie mniejsza od wymaganej.

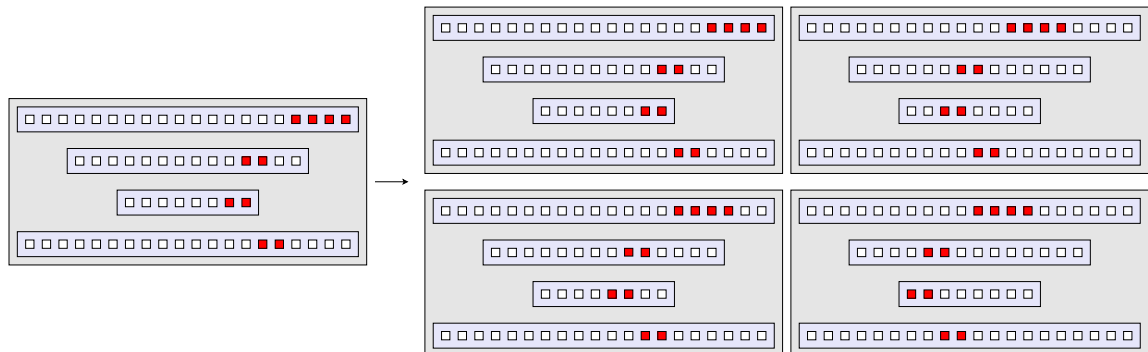
4. **Zapisanie wzorców** Ponieważ w etapie 2. każdy ze wzorców został obrócony do zerowego paska w płaszczyźnie referencyjnej, każdy z wybranych wzorców jest "pomnażany", tak aby wykorzystywane były wszystkie paski z tej płaszczyzny (rys. 3.6).

Istniejąca implementacja algorytmu B przetwarza oddzielnie próbki mionów i antymionów, produkując dwie oddzielne listy wzorców. Listy te są następnie łączone⁶, formując końcową listę wzorców. Podejście takie może powodować nieznaczne zwiększenie liczby wzorców, a także to, że ten sam wzorec może wystąpić dwukrotnie, z przypisanymi dwoma przeciwnymi znakami (ładunkami).

⁶Nie zachodzi tutaj skalanie wzorców - operacja ta jest w pełni odwracalna



Rysunek 3.5: Scalanie wzorców z przejściem na superstripy (algorytm B). Rozmiary superstripów w płaszczyznach 1., 2. (referencyjnej) oraz 3. równy 2, w płaszczyźnie 4. równy 4.



Rysunek 3.6: "Pomnażanie" wzorca w algorytmie B.

3.2.2. Algorytm C

Jest to algorytm jednoprzebiegowy. Składa się on z następujących kroków:

1. **Preselekcja i generacja wzorców.** Z wypełnionych w zdarzeniu stożków wybierany jest ten, który ma zapaloną płaszczyznę referencyjną. Jeśli w zdarzeniu nie ma takich stożków, do wyboru stożka wykorzystywana jest informacja Monte Carlo o rzeczywistym torze lotu mionu (wybierany jest stożek, w którym mion przeciął płaszczyznę referencyjną). W takich przypadkach informacja o torze lotu mionu pozwala także określić, który pasek w płaszczyźnie referencyjnej stożka zostałyby zapalone (w płaszczyźnie referencyjnej pasek ten jest włączany), co jest istotne w procedurze scalania wzorców.

Jeżeli liczba wypełnionych płaszczyzn w wybranym stożku nie pozwalałaby na wypracowanie decyzji trygera, dany stożek jest odrzucany (tak samo jak w algorytmie B).

Układ zapalonych pasków stożka wybranego w poprzednim kroku zostaje dodany do listy wzorców. Gdy dany wzorzec jest już obecny na liście, wówczas jego charakterystyka pędowa zostaje uaktualniona.

Wzorze wybrane ze wszystkich zdarzeń mionowych formują listę wzorców W_a .

2. **Wybór wzorców i nadanie kodu pędowego.** Dla każdego kodu pędowego p , zaczynając od najwyższego z kodów (31), z listy wzorców W_a wybierane i usuwane są wzorce o najwyższej krotności względem kodu pędowego p . Wybierana jest taka liczba wzorców, aby względna efektywność rekonstrukcji mionów o generowanym kodzie pędowym p była nie mniejsza od wymaganej. Wzorcom wybranym w tym kroku przypisywany jest kod pędowy p oraz znak (na podstawie stosunku liczby mionów i antymionów, które generowały dany wzorzec).

Wybrane w tym kroku wzorce formują nie więcej niż 31 list wzorców W_p (każda odpowiada jednemu z kodów pędowych).

3. **Inkluzja wzorców.** Dla wszystkich list W_p uruchamiana jest procedura inkluzji wzorców (analogicznie do procedury inkluzji wzorców w algorytmie B, rys. 3.3). Wzorzec z listy W_{p_1} może zostać inkludowany we wzorcu z listy W_{p_2} (rys. 3.7-3.9), jeśli:

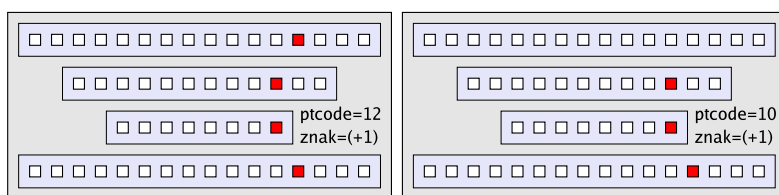
- Kod pędowy p_1 jest równy lub mniejszy od kodu p_2
- W wyniku scalenia nie zostanie powiększony ani jeden z zakresów zdefiniowanych dla wzorca z listy W_{p_2} w żadnej z płaszczyzn
- Liczba nie zdefiniowanych płaszczyzn wzorca z listy W_{p_2} w wyniku scalenia nie zmniejszy się

W przypadku gdy inkluzja jest możliwa, wzorzec z listy W_{p_1} jest usuwany, a charakterystyka pędowa wzorca z listy W_{p_2} jest uaktualniana o charakterystykę wzorca z listy W_{p_1} .

4. **Scalanie wzorców.** Dla list W_p , odpowiadającym kodom pędowym p niższym od pewnej granicznej wartości, przed procedurą inkluzji dla każdego wzorca uruchamiana jest procedura scalania. Scalanie działa w obrębie jednej listy, tj. nie mogą zostać scalone wzorce o przypisanych różnych kodach pędowych. Dwa wzorce danej listy zostaną scalone, jeśli spełnione jest każde z poniższych kryteriów (rys. 3.10-3.12):

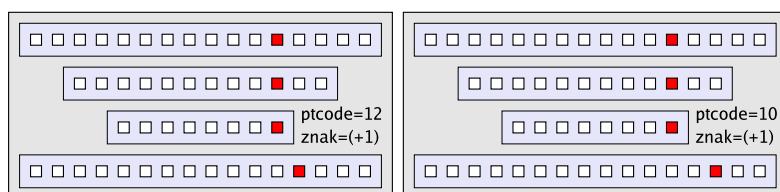
- Obydwa wzorce mają przypisany ten sam znak
- W płaszczyźnie referencyjnej wzorce mają zapalony ten sam pasek.

Gdy scalenie jest możliwe, wówczas kilka wzorców formuje jeden wzorzec (rys. 3.10), ich charakterystyka pędowa jest sumowana i przypisywana nowemu wzorcowi. Po zakończeniu procedury scalania lista W_p zawiera nie więcej niż 16 wzorców, gdyż każdemu paskowi z płaszczyzny referencyjnej odpowiada co najwyżej dwa wzorce (odpowiadające dwóm znakom).



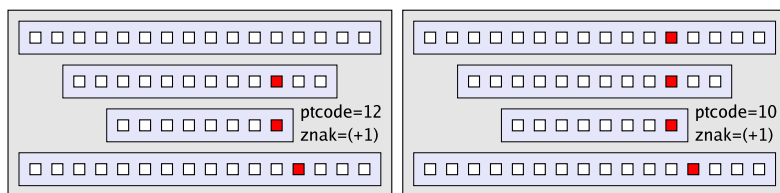
**Inkluzja
możliwa**

Rysunek 3.7: Inkluzja w algorytmie C. Wzorec po prawej stronie może zostać inkludowany we wzorec po lewej (ma mniejszy kod pędowy, w wyniku inkluzji nie zostanie zwiększony ani jeden z zakresów w żadnej z płaszczyzn wzorca po lewej stronie).



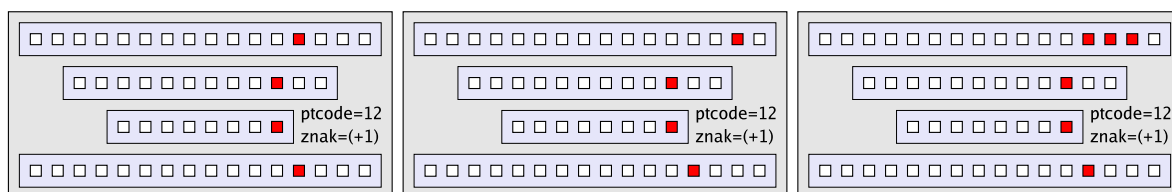
**Inkluzja
niemożliwa**

Rysunek 3.8: Inkluzja w algorytmie C. Wzorec po prawej stronie nie może zostać inkludowany we wzorec po lewej (w wyniku inkluzji zostałby zwiększony zakres w pierwszej z płaszczyzn wzorca po lewej stronie).

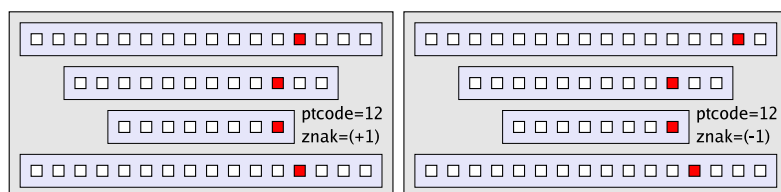


**Inkluzja
niemożliwa**

Rysunek 3.9: Inkluzja w algorytmie C. Wzorec po prawej stronie nie może zostać inkludowany we wzorec po lewej (w wyniku inkluzji zmniejszyłaby się liczba niezdefiniowanych płaszczyzn wzorca o wyższym kodzie pędowym).

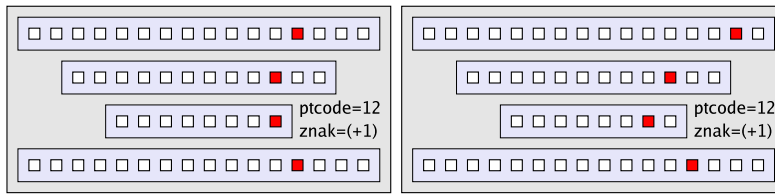


Rysunek 3.10: Scalanie w algorytmie C. Wzorce po lewej stronie i w środku mogą zostać scalone, gdyż zostały spełnione wszystkie z warunków scalania (ten sam kod pędowy, znak i pasek w płaszczyźnie referencyjnej). W wyniku scalenia dwóch wzorców zakres w dowolnej z płaszczyzn może się zwiększyć o więcej niż 1 (wzorec po scaleniu po prawej).



**Scalenie
niemożliwe**
(różny znak)

Rysunek 3.11: Scalanie w algorytmie C. Dwa wzorce nie mogą zostać scalone ze względu na różny znak.



**Scalenie
niemożliwe**
(płaszczyzna ref.)

Rysunek 3.12: Scalanie w algorytmie C. Dwa wzorce nie mogą zostać scalone ze względu na różny pasek w płaszczyźnie referencyjnej.

3.2.3. Algorytm D

Algorytm D jest odpowiednikiem algorytmu B zaimplementowanym w środowisku CMSSW. Uznano, że metoda wyboru stożków w algorytmie C była bardziej naturalna i prostsza niż w algorytmie B (brak konieczności odwoływania się do emulacji trygera; do generacji nie jest wymagana wcześniejsza lista wzorców), dlatego też algorytm D wykorzystuje tę samą metodę selekcji stożków, co algorytm C (na podstawie informacji Monte Carlo). Nie wykonywane jest jednak wypełnianie płaszczyzny referencyjnej (algorytm C płaszczyznę referencyjną wypełniał). Z algorytmu B pochodzi metoda wyboru wzorców, nadania kodów pędowych oraz ich scalania. Między algorytmem B i D istnieją dwie różnice:

- W algorytmie D stożki nie są obracane (stąd też nie ma potrzeby wypełnia płaszczyzny referencyjnej, kopiowania i “pomnażania” wzorca - por. punkty 3(c) oraz 4 algorytmu B).
- W algorytmie D próbki mionów i antymionów przetwarzane są jednocześnie

Brak obracania stożków może prowadzić do nieznacznego ograniczenia liczby wzorców (np. w przypadkach, gdy którakolwiek z płaszczyzn stożka budowana jest z danych pobieranych z dwóch sąsiednich komórek, pomiędzy którymi jest przerwa), powoduje jednak konieczność zwiększenia statystyki przypadków mionowych 8-krotnie (co odpowiada liczbie pasków w płaszczyźnie referencyjnej).

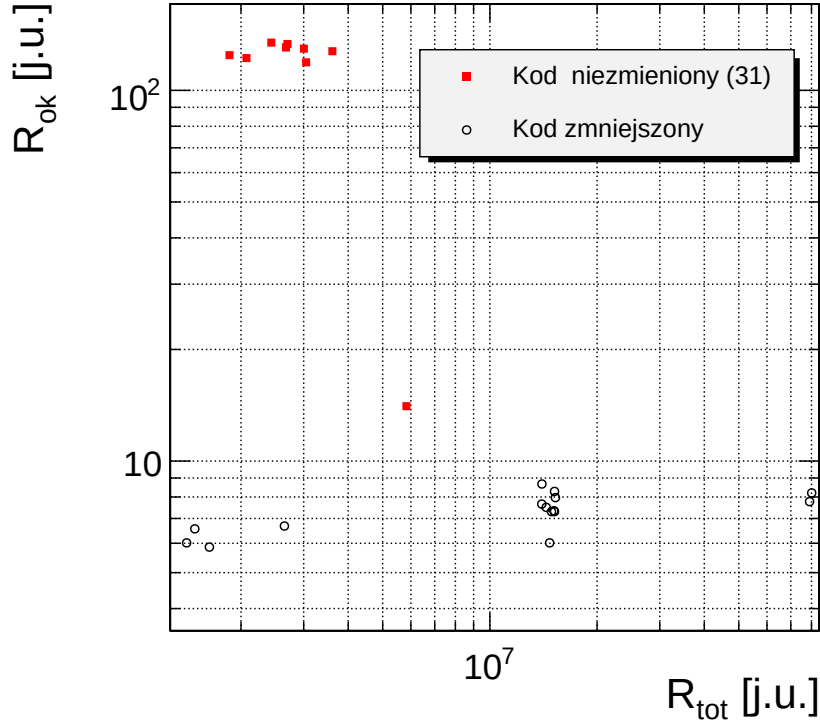
3.3. Optymalizacja nadania kodów pędowych

W algorytmach C oraz D istnieje możliwość optymalizacji przypisanych wzorcom kodów pędowych, co ma umożliwić zmniejszenie częstości trygerów w wybranych obszarach detektora. Procedura optymalizacji rozpoczyna się dla wzorców o najwyższym kodzie pędowym równym 31, następnie jest powtarzana dla kolejnych, niższych kodów. Z grupy wzorców o ustalonym kodzie pędowym p odrzucana jest część wzorców, którym następnie zostaje przypisany kod pędowy równy $p - 1$. Ograniczenie częstości trygerów odbywa się kosztem efektywności, gdyż na skutek zmniejszenia kodu pędowego części wzorców, część mionów nie przejdzie niektórych cięć. Procedura przebiega w dwóch krokach:

1. Z grupy wzorców o ustalonym kodzie pędowym wybierane są wzorce o najwyższej czystości $pur(p)$:

$$pur(p) = \frac{R_{OK}}{R_{tot}}$$

gdzie R_{OK} jest częstością mionów generujących dany wzorec o kodzie pędowym w wierzchołku równym lub większym wartości p , R_{tot} częstością wszystkich mionów generujących dany wzorec. Wzorce te pozostaną z nie zmienionym kodem pędowym.



Rysunek 3.13: Przykład działania algorytmu optymalizacji dla wzorców z przypisanym kodem pędowym 31 (wieża 10). R_{OK} oznacza częstość (jednostki umowne) wzorca, pochodzącą od mionów, które generowały dany wzorec, o pędzie poprzecznym powyżej cięcia, R_{tot} oznacza częstość danego wzorca pochodzącą wszystkich mionów, które go generowały. W wyniku działania algorytmu wzorcom o najniższej czystości zmniejszony został kod pędowy.

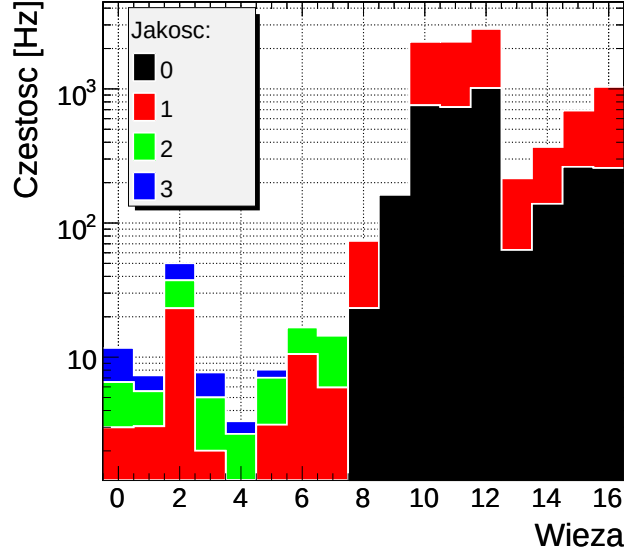
Wybierana jest taka liczba wzorców, aby względna efektywność rekonstrukcji przy cięciu p pozostała wyższa od pewnej zadanej efektywności ϵ_{cut} .

2. Wzorcom o małych czystościach (nie wybranych w poprzednim kroku) przypisywany jest kod pędowy równy $p - 1$. Poddane są one ponownie procedurze optymalizacji dla następnego (niższego) kodu pędowego. Przypisany im kod pędowy może ponownie ulec zmniejszeniu.

Z procedury optymalizacji wyłączane są wzorce odpowiadające prostym torom mionów (8 wzorców dla każdego z komparatorów - każdemu z pasków z płaszczyzny referencyjnej odpowiada jeden "prosty" wzorec). W obszarze detektora odpowiadającemu wieżom 10-12 pole magnetyczne jest na tyle słabe, że praktycznie nie rozróżnialne były miony o pędach odpowiadających najwyższemu kodowi pędowemu. Powyższy warunek (wyłączenie wzorców "prostych" z optymalizacji) uniemożliwia zmniejszenie kodu pędowego dla tych wzorców.

Rysunek 3.13 ilustruje działanie algorytmu optymalizacji dla wzorców o kodzie pędowym 31. Odrzucone zostają wzorce o najniższej czystości (stosunkowi częstości dobrej do całkowitej), ich kod pędowy zmniejszany jest o 1.

Rysunek 3.14 przedstawia najniższe możliwe do uzyskania częstości trygerów w poszczególnych wieżach detektora wraz z informacją o wkładach do częstości od mionów zrekonstruowanych z różnymi wartościami jakości. Na rysunku przedstawiono wynik emulacji



Rysunek 3.14: Minimalna częstość trygerów możliwa do uzyskania w poszczególnych wieżach wraz z wkładami od różnych wartości jakości kandydatów na miony.

trygera RPC z listą wzorców składającą się z wzorców prostych o przypisanym kodzie pędowym 31, oraz z wzorca “pełnego”, wymagającego jedynie koincydencji w odpowiedniej liczbie płaszczyzn o przypisanym kodzie pędowym równym 1. Wkład do częstości trygera dawały miony zrekonstruowane z kodem pędowym 31⁷.

Częstość trygerów zdominowana jest przez częstości pochodzące z obszaru pokryw, a zwłaszcza z wież 10-12. Do redukcji częstości trygerów w obszarze pokryw nie da się wykorzystać cięcia na jakości kandydatów na miony - miony zrekonstruowane z jakością równą 0 dają stosunkowo niewielki wkład do częstości trygerów.

Wydaje się prawdopodobne, że dalsza redukcja częstości przypadków byłaby możliwa poprzez dołączenie algorytmu deklastryzacji do istniejących implementacji komparatora PAC.

3.4. Generacja wzorców

Rozmiary superstripów użyte w algorytmach B i D podane są dla każdej z wież w tabelach 3.1 (kody pędowe od 9 do 14) oraz 3.2 (kody pędowe od 1 do 8). Dla kodów pędowych równych i większych od 15 rozmiary wszystkich superstripów równe były 1. W algorytmie C scalanie wzorców dopuszczane było jedynie dla kodów pędowych o wartości mniejszej niż 15. Wzorce generowane były z wymaganą efektywnością (względna) równą 0.9. Procedura optymalizacji była uruchamiana dla wzorców pochodzących z wież 10-16 z wartością ϵ_{cut} równą 0.6 (algorytmy C i D).

3.4.1. Symetrie systemu mionowego RPC

Przy generacji wzorców można przyjąć, że pewne komparatory danej wieży będą miały ten sam zestaw wzorców (tj. zakłada się pewną symetrię). Rozpatrywano następujące symetrie:

⁷Test przeprowadzono na próbce 1.8 miliona zdarzeń mionowych w detektorze CMS. Symulacja komór RPC zakładała średni rozmiar klastra w komórce równy 1.5 paska oraz efektywność komór równą 0.95.

Wieża	Pł. 1	Pł. 2	Pł. 3	Pł. 4	Pł. 5	Pł. 6
0	4	2	2	2	2	4
1	4	2	2	2	2	4
2	4	2	2	2	2	4
3	4	2	2	2	2	4
4	4	2	2	2	2	4
5	4	2	2	2	2	4
6	4	2	2	2	4	-
7	4	2	2	2	4	-
8	4	2	2	2	-	-
9	2	2	2	-	-	-
10	4	2	2	4	-	-
11	4	2	2	4	-	-
12	4	2	2	4	-	-
13	4	2	2	4	-	-
14	4	2	2	4	-	-
15	4	2	2	4	-	-
16	4	2	2	4	-	-

Tablica 3.1: Rozmiary superstripów w algorytmach B i D w poszczególnych płaszczyznach - kody pędowe 9-14

Wieża	Pł. 1	Pł. 2	Pł. 3	Pł. 4	Pł. 5	Pł. 6
0	4	4	2	4	4	4
1	4	4	2	4	4	4
2	4	4	2	4	4	4
3	4	4	2	4	4	4
4	4	4	2	4	4	4
5	4	4	4	2	4	4
6	4	4	4	2	4	-
7	4	4	4	2	4	-
8	4	4	4	2	-	-
9	4	2	4	-	-	-
10	4	2	4	4	-	-
11	4	2	4	4	-	-
12	4	2	4	4	-	-
13	4	2	4	4	-	-
14	4	2	4	4	-	-
15	4	2	4	4	-	-
16	4	2	4	4	-	-

Tablica 3.2: Rozmiary superstripów w algorytmach B i D w poszczególnych płaszczyznach - kody pędowe 1-8

- **Symetria 1152** (pełna symetria pasków) - każdy ze 144 komparatorów danej wieży ma ten sam zestaw wzorców. W obrębie stożka obsługiwanego przez jeden komparator każdy z pasków płaszczyzny referencyjnej ma ten sam zestaw wzorców (odpowiednio przesunięty)
- **Symetria 144** (pełna symetria komparatorów) - każdy ze 144 komparatorów danej wieży ma ten sam zestaw wzorców. W obrębie stożka obsługiwanego przez jeden komparator każdy z pasków płaszczyzny referencyjnej ma własny zestaw wzorców
- **Symetria 12×8** (symetria częściowa z symetrią pasków) - co 12 komparator danej wieży ma ten sam zestaw wzorców (tj. w obrębie danego sektora każdy komparator ma różny zestaw wzorców). W obrębie stożka obsługiwanego przez jeden komparator każdy z pasków płaszczyzny referencyjnej ma ten sam zestaw wzorców (odpowiednio przesunięty)
- **Symetria 12** (symetria częściowa bez symetrii pasków) - co 12 komparator danej wieży ma ten sam zestaw wzorców (tj. w obrębie danego sektora każdy komparator ma różny zestaw wzorców). W obrębie stożka obsługiwanego przez jeden komparator każdy z pasków płaszczyzny referencyjnej ma różny zestaw wzorców
- **Brak symetrii** - każdy ze 144 komparatorów danej wieży ma własny (unikalny) zestaw wzorców. W obrębie stożka obsługiwanego przez jeden komparator każdy z pasków płaszczyzny referencyjnej ma różny zestaw wzorców

Testowane wzorce wygenerowane algorytmem B zostały wygenerowane w symetrii 12×8, wzorce wygenerowane algorytmami C i D w symetrii 12.

Przy badaniu symetrii systemu mionowego RPC wygenerowano około 60 milionów zdarzeń mionowych o η w wierzchołku z zakresu $[-0.1, 0.1]$. Następnie generowane były wzorce przy użyciu algorytmu D dla wieży 0 w czterech wariantach: z symetrią 144, symetrią 12 (tab. 3.3), brakiem symetrii (tab. 3.4) oraz symetrią 12 z wykorzystaniem wzorców pochodzących z dwóch sektorów - sektora 0 oraz dowolnego innego sektora (tab. 3.5). Tabelki przedstawiają liczbę wzorców przypadających na chip, a więc pochodzących z dwunastu sąsiednich segmentów.

Symetria	144	12
Wzorce	22452	13017

Tablica 3.3: Liczba wzorców na chip wygenerowanych w algorytmie D, symetrie: 144 i 12, wieża 0.

Sektor	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wzorce	11999	11922	11376	11900	11895	11912	11758	11253	10774	11609	10650	11952

Tablica 3.4: Liczba wzorców na chip w poszczególnych sektorach logicznych wygenerowanych w algorytmie D. Brak symetrii, wieża 0.

Założenie symetrii 144 (pełna symetria komparatorów) powoduje niemal dwukrotne zwiększenie liczby wzorców na chip względem liczby wzorców otrzymanej dla symetrii 12. Przejście od symetrii 12 do braku symetrii powoduje dalsze zmniejszenie liczby wzorców, ale zmiana jest znacznie mniejsza.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wzorce	11993	12095	12564	12635	12655	12917	12311	11875	12994	11107	12027

Tablica 3.5: Liczba wzorców na chip wygenerowanych w algorytmie D z symetrią 12 - do generacji wykorzystane były wzorce pochodzące wyłącznie z sektora 0 i oraz sektora i (wieża 0)

Tabela 3.5 przedstawia otrzymaną liczbę wzorców przy użyciu algorytmu D z symetrią 12 w przypadku, gdy do generacji wykorzystane były wzorce pochodzące wyłącznie z sektora 0 i jednego dowolnego innego sektora. Symetria jest zachowana między sektorem 0 a sektorami 1, 2, 8, 11 (jeśli odniesiemy otrzymane liczby do liczby wzorców otrzymanej dla sektora 0 dla braku symetrii). Symetria jest najbardziej złamana dla sektorów 6 i 9.

Obniżenie symetrii powoduje konieczność zwiększenia statystyki przypadków mionowych wykorzystywanej do generacji wzorców (np. przy przejściu z pełnej symetrii komparatorów, tj. symetrii 144, do symetrii 12 konieczne jest zwiększenie statystyki o czynnik 12). Ponieważ przejście z braku symetrii do symetrii 12 nie powoduje drastycznego wzrostu liczby wzorców, wzorce wygenerowano z symetrią 12.

Ponieważ detektor eksperymentu CMS jest symetryczny w η , to przy generacji przyjęto, że komparatory obsługujące te same wieże leżące po przeciwnych stronach detektora (np. 5 i -5) będą miały te same zestawy wzorców.

3.4.2. Wpływ statystyki próbek mionowych na liczbę wzorców

Przy badaniu wpływu statystyki przypadków mionowych wygenerowano około 110 milionów zdarzeń mionowych o η w wierzchołku z zakresu $[-0.1, 0.1]$. Następnie badana była liczba wzorców dla wieży 0, przy generacji której wykorzystano różną liczbę przypadków mionowych z dostępnej statystyki - od 10^5 do pełnej statystyki 1.1×10^8 przypadków. Testowano algorytmy C i D.

Dla statystyki $\sim 5 \times 10^6$ liczba wzorców generowanych algorytmem D stabilizuje się (rys. 3.16). W algorytmie C liczba wzorców stabilizuje się dla statystyki $\sim 6 \times 10^7$ (rys. 3.15), ale zmiany w liczbie wzorców w algorytmie C dla wartości powyżej $\sim 5 \times 10^6$ są niewielkie, bowiem wynoszą mniej niż 2%.

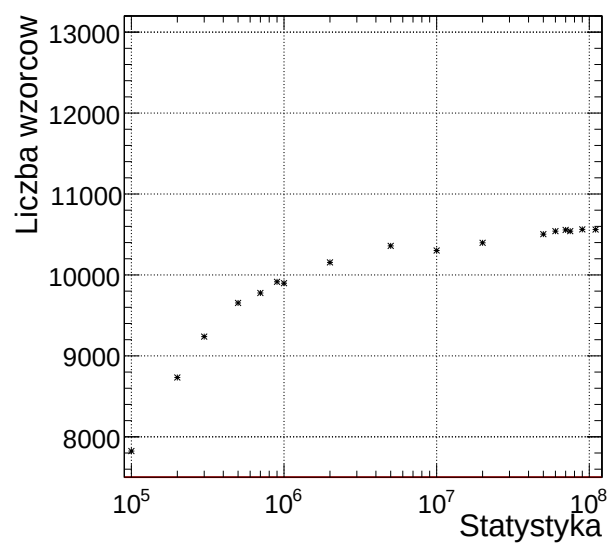
Przyjęto, że jeśli dwukrotne zmniejszenie statystyki wykorzystanej w generacji wzorców nie wpływa znacząco na liczbę wzorców, to statystyka jest wystarczająca.

Przy generacji wzorców wykorzystano statystyki mionów o następującej liczebności:

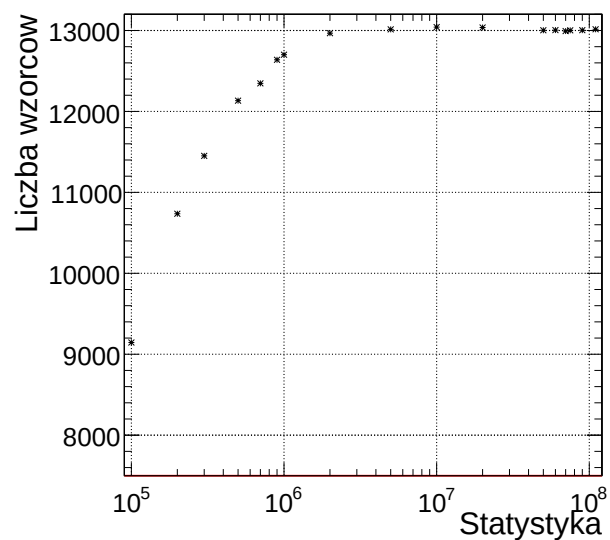
- Wzorce B wygenerowane były na próbce ~ 9 milionów przypadków mionowych w środowisku ORCA
- Wzorce C i D wygenerowane były na próbce 193 milionów przypadków mionowych w środowisku CMSSW

Wzorce C i D pierwotnie były generowane na statystce ~ 98 milionów przypadków mionowych⁸. Statystyka ta została podwojona, aby pokazać, że zwiększenie statystyki nie wpływa na liczbę wzorców. Dwukrotne zwiększenie statystyki nie wpływa znacząco na liczbę wzorców w algorytmach C oraz D (tab. 3.7 i 3.8), a więc statystyka była wystarczająca. Przy badaniu efektywności wykorzystano wzorce wygenerowane przy użyciu całej dostępnej statystyki (193 milionów przypadków).

⁸Statystyka większa od tej wykorzystywanej do generacji w algorytmie B, co jest związane z wykorzystaniem innej symetrii (12) w algorytmach C i D niż w algorytmie B (12×8)



Rysunek 3.15: Zależność liczby wzorców (cały sektor) od statystyki przypadków mionowych (wieża 0, algorytm C, symetria 12). Ostatnie 5 punktów wykresu (statystyka 600...1100) formuje słabo widoczne wypłaszczenie (zmiany wynoszą około 0,2%).



Rysunek 3.16: Zależność liczby wzorców (cały sektor) od statystyki przypadków mionowych (wieża 0, algorytm D, symetria 12).

Wieża	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Liczba wzorców	14252	12885	13490	12775	13314	12633	6068	7974	5456
Wieża	9	10	11	12	13	14	15	16	
Liczba wzorców	4659	3098	3057	3501	9170	9645	9675	10207	

Tablica 3.6: Liczba wzorców wygenerowanych w algorytmie B. Statystyka 9 milionów.

Wieża	0	1	2	3	4	5	6	7	8
S1 (98M)	10236	11231	10221	9727	10783	15608	5454	4728	3345
S2 (193M)	10291	11195	10219	9744	10531	15970	5485	4726	3350
Stosunek (S2/S1)	1,01	1,00	1,00	1,00	0,98	1,02	1,01	1,00	1,00
Wieża	9	10	11	12	13	14	15	16	
S1 (98M)	3179	3420	3791	3526	8018	7923	7318	6850	
S2 (193M)	3196	3536	3902	3563	8148	7915	7312	6871	
Stosunek (S2/S1)	1,01	1,03	1,03	1,01	1,02	1,00	1,00	1,00	

Tablica 3.7: Porównanie liczby wzorców wygenerowanych z małą i dużą statystyką przypadków (odpowiednio 98 milionów i 193 miliony). Algorytm C.

Wieża	0	1	2	3	4	5	6	7	8
A (98M)	13058	10123	10728	9751	11117	8764	3411	7666	5574
B (193M)	13207	10164	10846	9854	11253	8699	3423	7710	5613
Stosunek (B/A)	1,011	1,004	1,011	1,011	1,012	0,993	1,004	1,006	1,007
Wieża	9	10	11	12	13	14	15	16	
A (98M)	4599	3393	3555	3792	11179	11348	11467	12392	
B (193M)	4611	3500	3658	3803	11143	11597	11407	12355	
Stosunek (B/A)	1,003	1,032	1,029	1,003	0,997	1,022	0,995	0,997	

Tablica 3.8: Porównanie liczby wzorców wygenerowanych z małą i dużą statystyką przypadków (odpowiednio 98 milionów i 193 miliony). Algorytm D.

Rozdział 4

Wyniki emulacji

Wzorce testowane były na próbce 1.8 miliona mionów wygenerowanych w środowisku CMSSW. Przy testach nie były brane pod uwagę szumy komór RPC - niepełna możliwość symulacji szumów komór RPC w środowisku CMSSW pojawiła się, gdy niniejsza praca była w końcowym etapie pisania. Symulacja działania komór RPC zakładała średni rozmiar klastra w komorze, równy 1.5 paska, oraz efektywność komór równą 0.95.

W prawie wszystkich wieżach emulacja trygera działała wykorzystując algorytm ekonomiczny. Wyjątek stanowi wieża 9, gdzie wykorzystywany jest algorytm podstawowy¹.

Wyniki testów wzorców ilustrują krzywe efektywności pokazujące, jaka część mionów o różnych pędach poprzecznych w wierzchołku daje wkład do częstości trygera dla różnych cięć na wartości estymaty pędu poprzecznego kandydata. Przedstawiono krzywe efektywności dla różnych wartości cięć dla poszczególnych wież.

Idealna krzywa efektywności powinna mieć kształt “schodkowy”, z progiem odpowiadającym wartości cięcia oraz efektywnościami 0 poniżej i 1 powyżej progu.

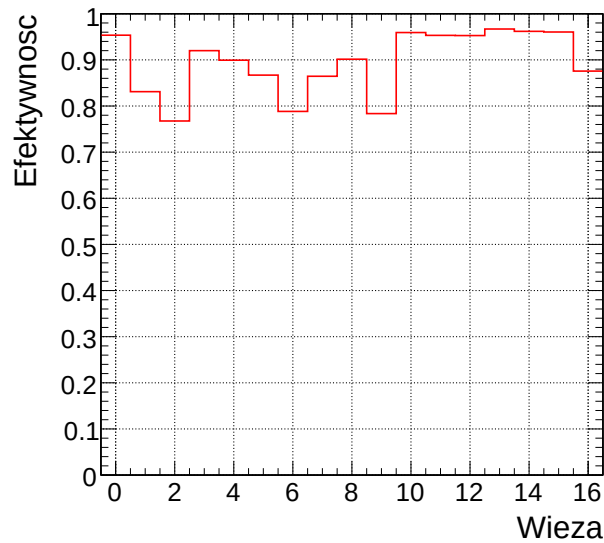
Najwyższe możliwe efektywności trygera PACT w poszczególnych wieżach przedstawia rys. 4.1. Wartości efektywności uzyskano zliczając zdarzenia, w których istniały stożki o liczbie wypełnionych płaszczyzn wystarczającej do znalezienia mionu (patrz rozdział 2.3.1). Liczba takich zdarzeń została następnie podzielona przez liczbę wszystkich zdarzeń. Wykorzystano tę samą próbkę mionów, która używana była do testowania wzorców.

Krzywe efektywności wzorców wygenerowanych algorytmami B, C, D przedstawiają rysunki 4.2 - 4.103. Dla algorytmów C i D przedstawiono po dwie krzywe - dla wersji nieoptymalizowanej oraz zoptymalizowanej (optymalizacja była włączana dla wież 10-16).

W całym obszarze detektora wzorce B mają zwykle gorsze charakterystyki od wzorców C oraz D. Związane jest to najprawdopodobniej z różnicami w opisie geometrii detektora CMS w środowiskach ORCA i CMSSW.²

¹W wieży tej poszukiwanie mionów działa na podstawie informacji tylko z trzech płaszczyzn. Możliwe było zatem wykorzystanie algorytmu podstawowego.

²Wzorce B wygenerowane były przy użyciu geometrii środowiska ORCA, a testowane w środowisku CMSSW.



Rysunek 4.1: Największa możliwa efektywność trygera RPC w poszczególnych wieżach.

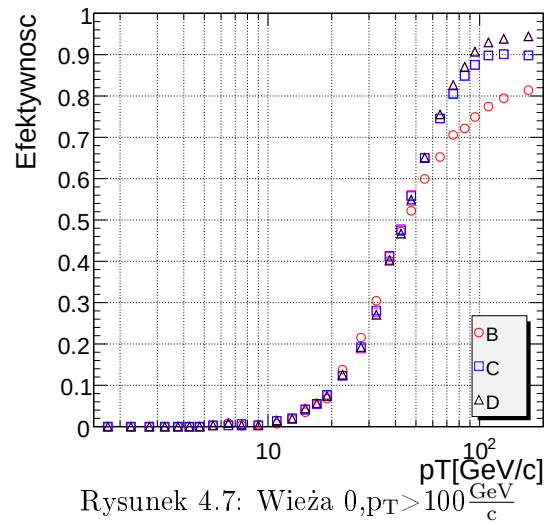
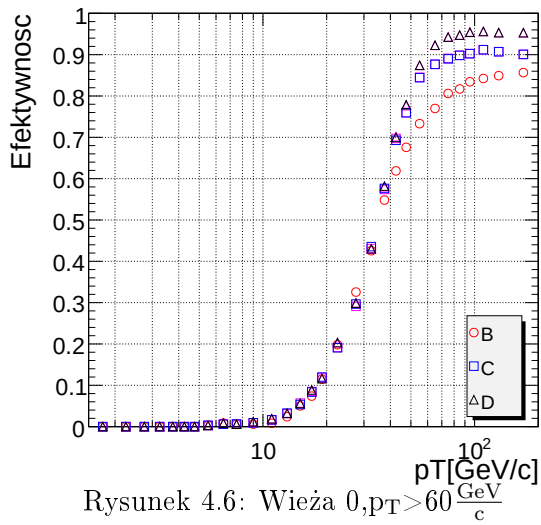
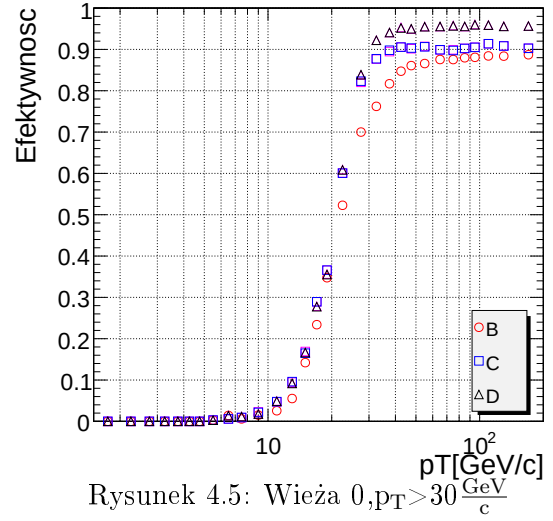
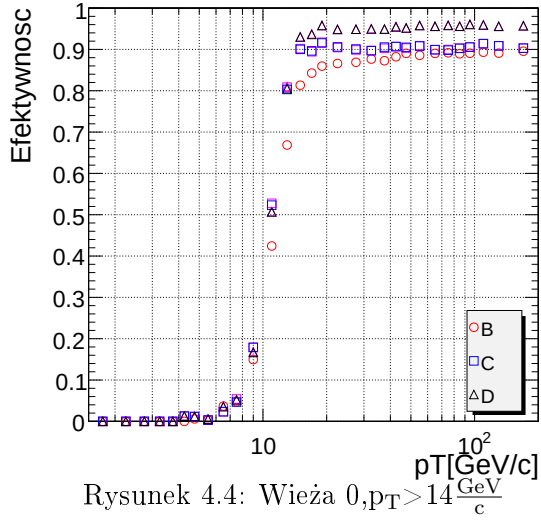
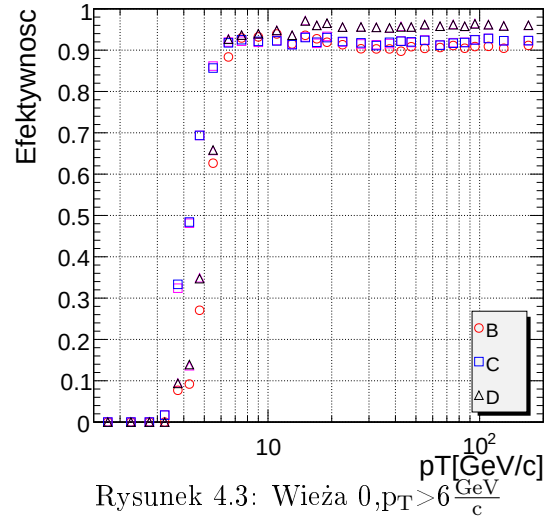
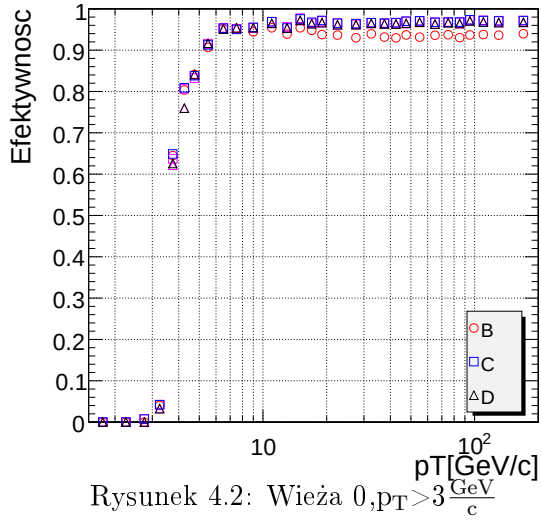
W wieżach 0-5 wzorce D osiągają zwykle nieco lepszą efektywność od wzorców C powyżej wartości cięcia, poniżej tej wartości efektywność wzorców D jest niższa (czyli lepsza).

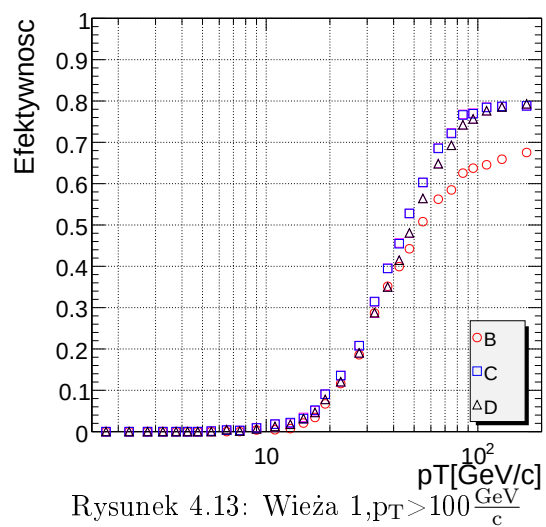
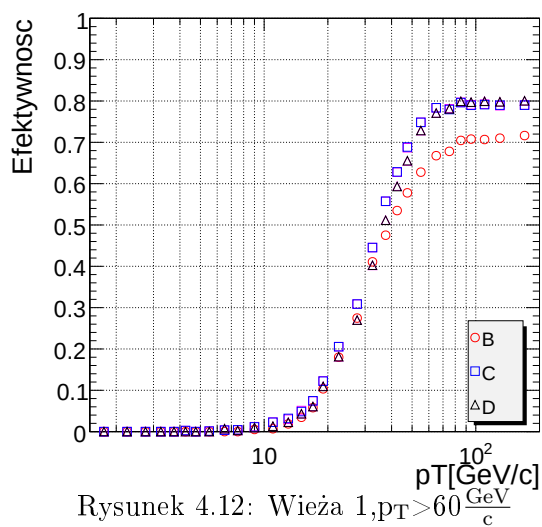
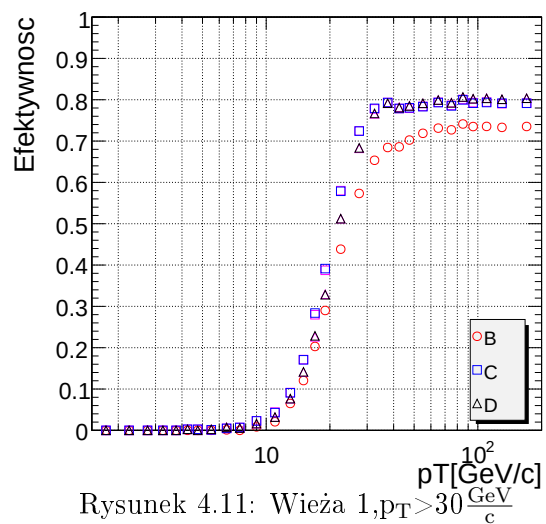
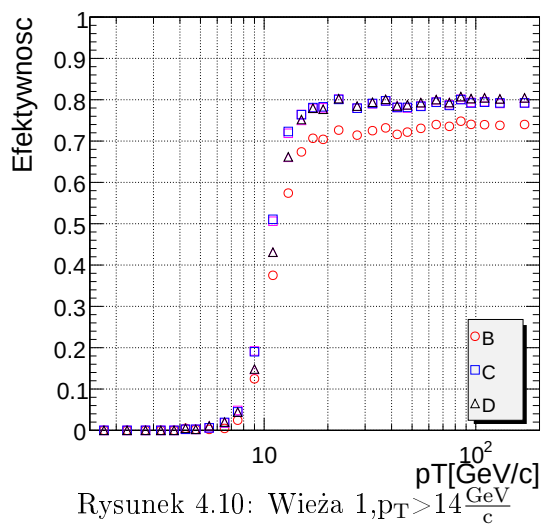
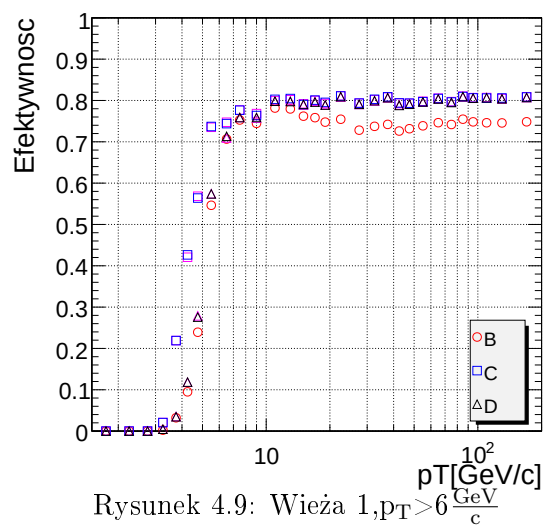
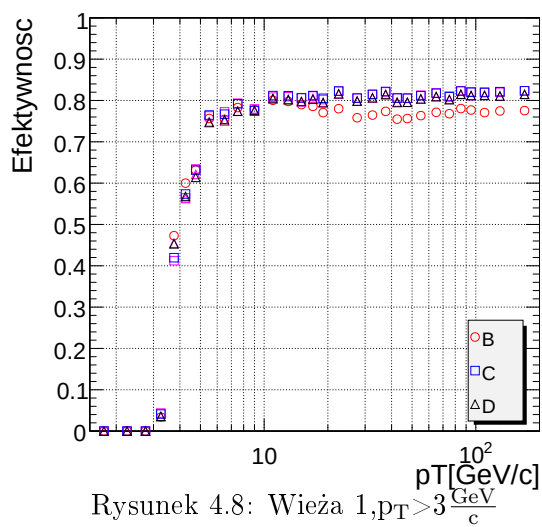
W wieżach 6 oraz 13 efektywność wzorców D jest nieco niższa niż wzorców C, zarówno w obszarze poniżej, jak i powyżej wartości cięcia.

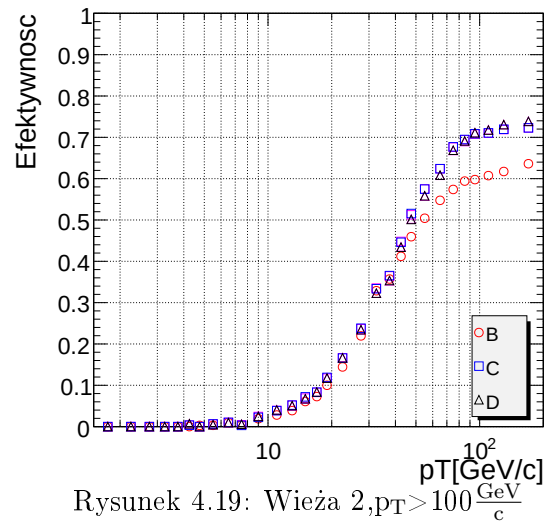
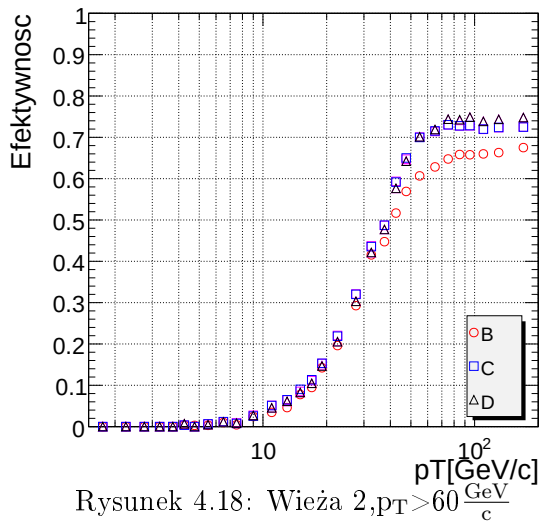
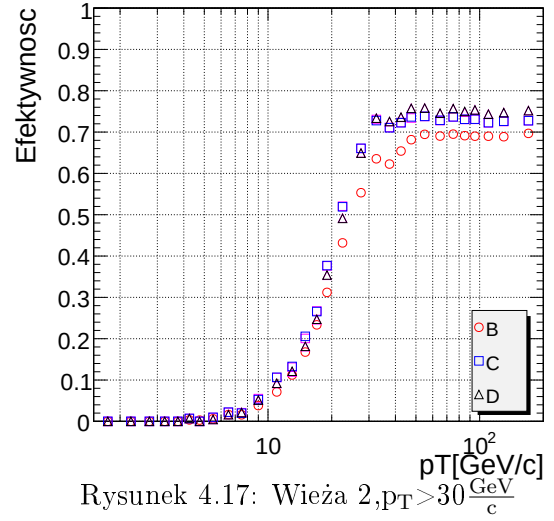
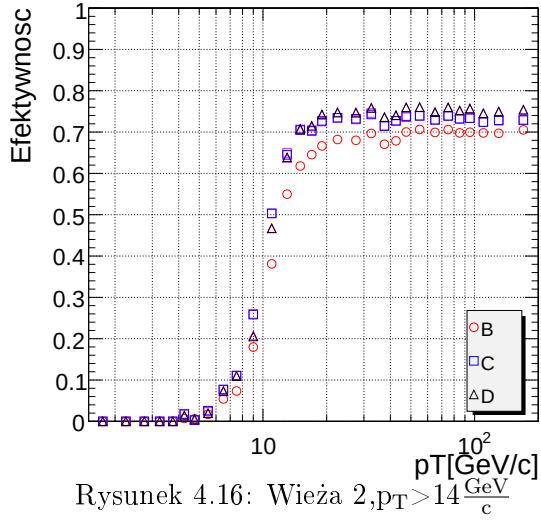
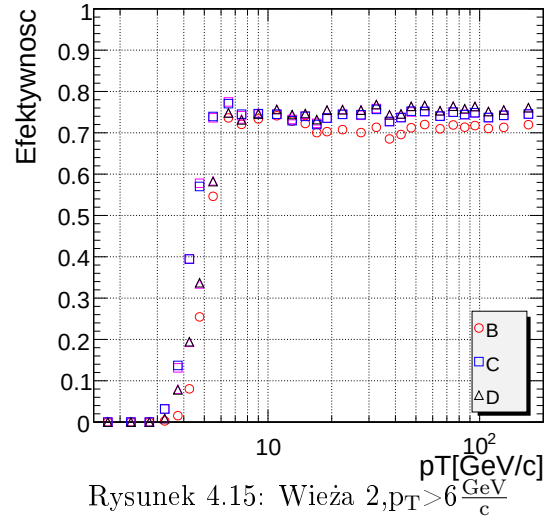
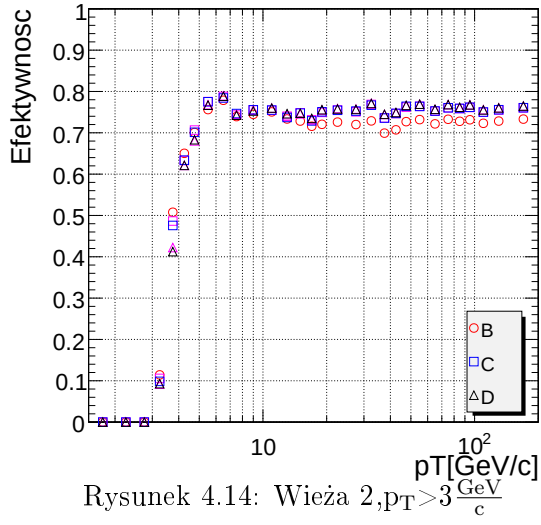
W pozostałych wieżach efektywność wzorców C i D jest zbliżona.

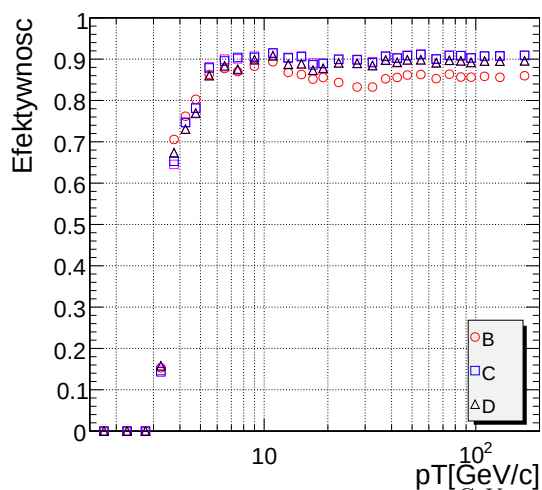
Rysunki 4.104 - 4.123 przedstawiają częstość zliczeń trygera dla różnych cięć dla wzorców wygenerowanych algorytmami C oraz D z wyłączoną i włączoną optymalizacją kodów pędowych. Dla najwyższego cięcia uzyskiwane częstości w wieżach, gdzie optymalizacja jest włączona (tj. 10-16) nie odbiegają znacząco od najlepszej możliwej do uzyskania częstości (rys. 3.14).

Ceną, którą płacimy za optymalizację, jest to, że na wykresach efektywności czasem trudno wskazać wypłaszczenie krzywych dla wysokich pędów cięcia (por. rys. 4.66).

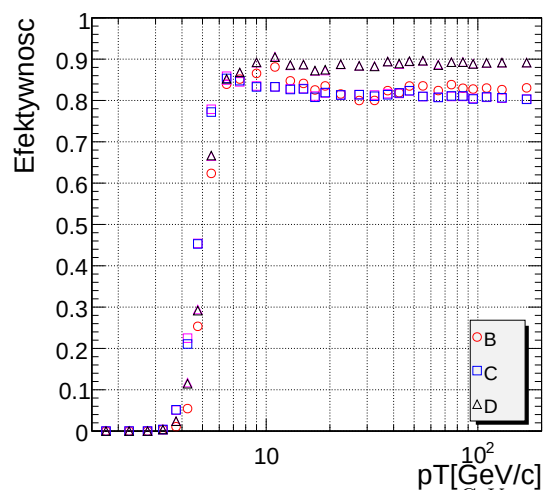




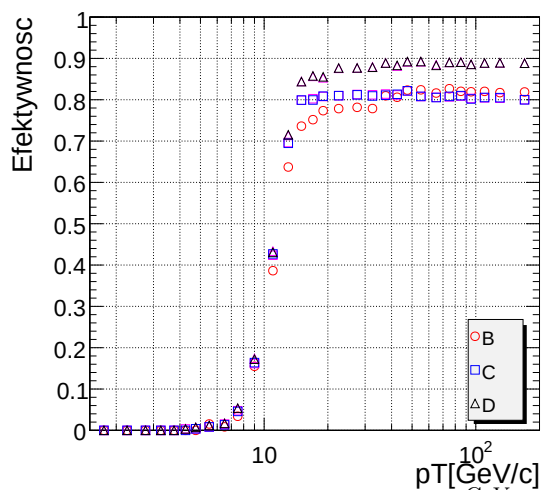




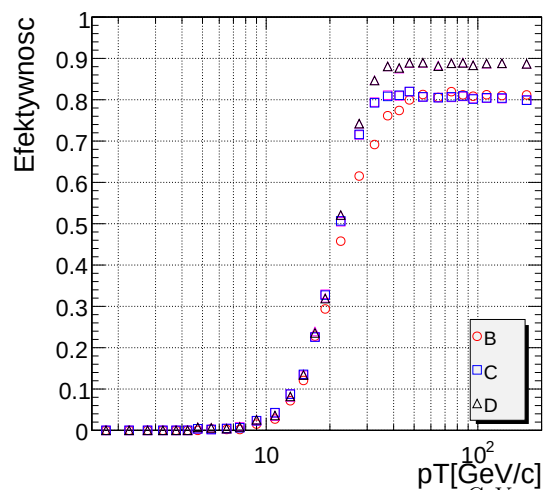
Rysunek 4.20: Wieża 3, $p_T > 3 \frac{\text{GeV}}{c}$



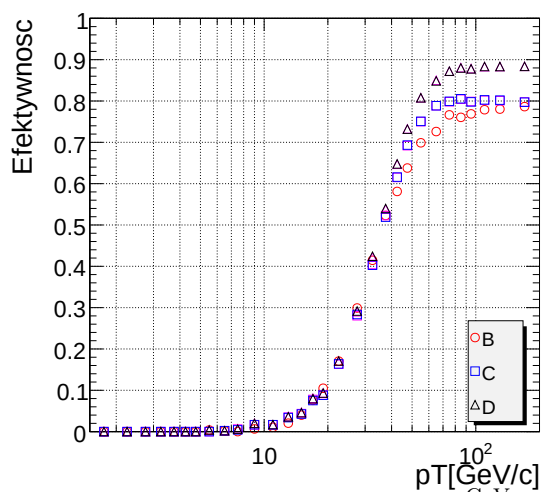
Rysunek 4.21: Wieża 3, $p_T > 6 \frac{\text{GeV}}{c}$



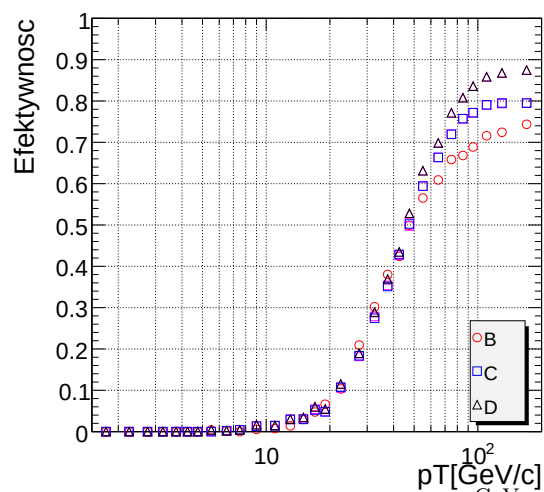
Rysunek 4.22: Wieża 3, $p_T > 14 \frac{\text{GeV}}{c}$



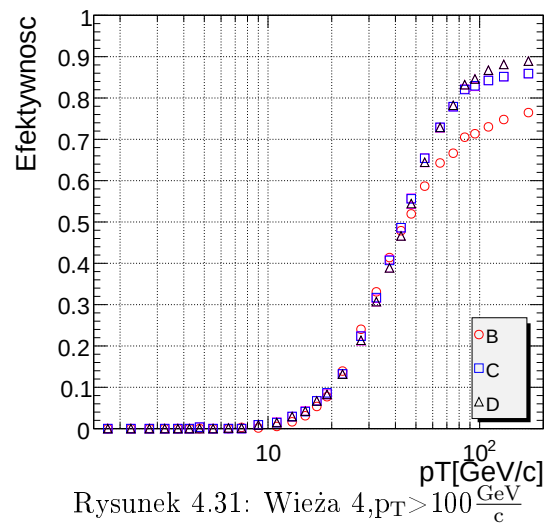
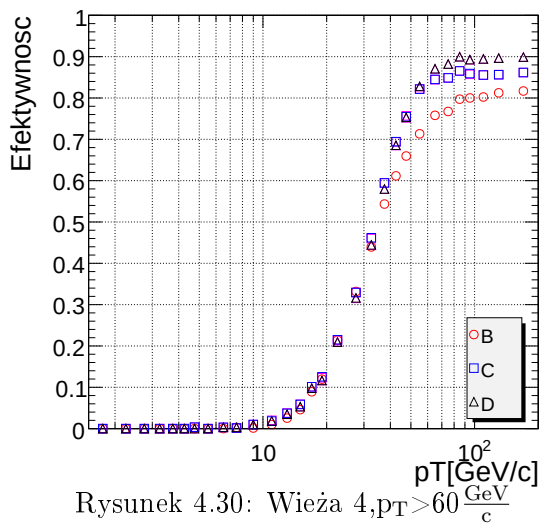
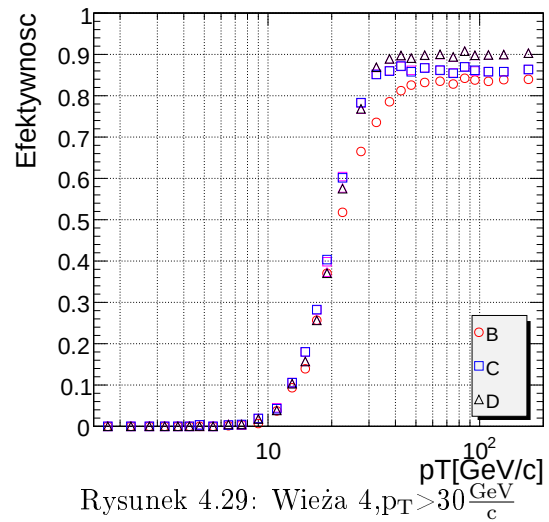
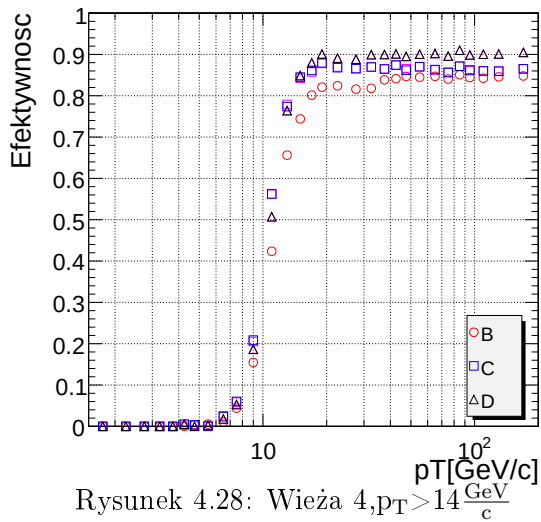
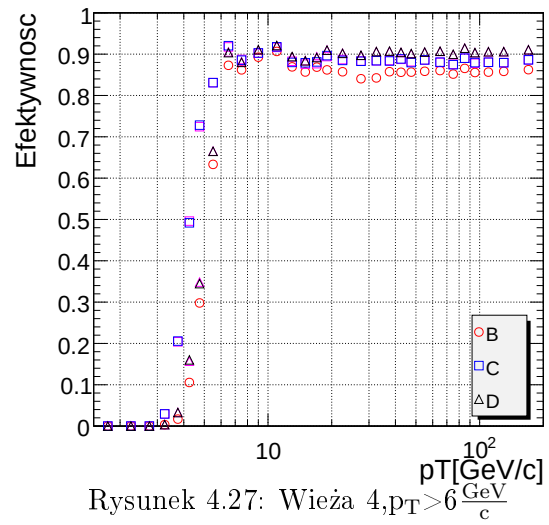
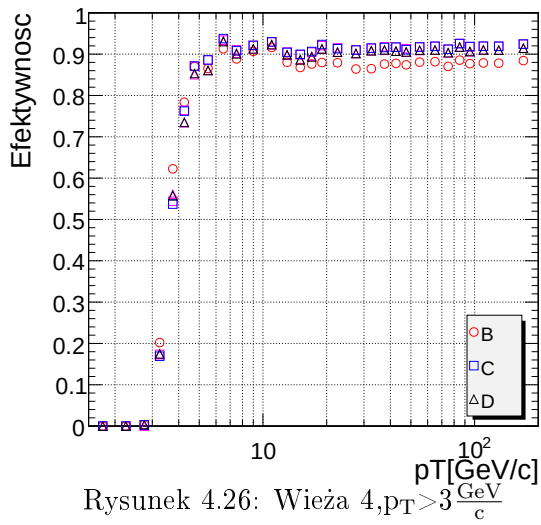
Rysunek 4.23: Wieża 3, $p_T > 30 \frac{\text{GeV}}{c}$

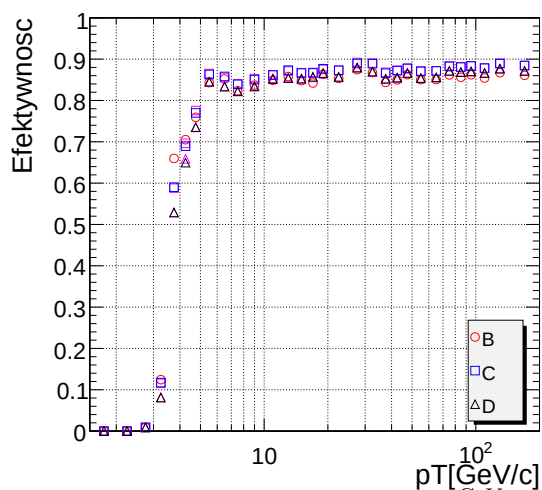


Rysunek 4.24: Wieża 3, $p_T > 60 \frac{\text{GeV}}{c}$

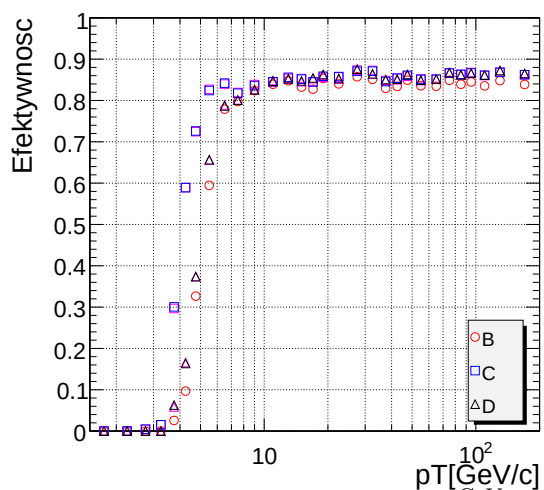


Rysunek 4.25: Wieża 3, $p_T > 100 \frac{\text{GeV}}{c}$

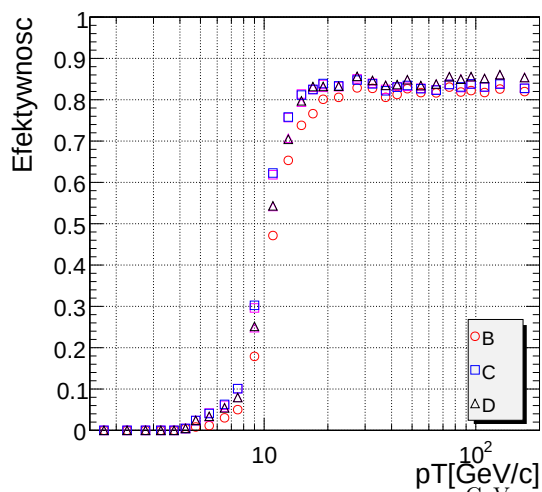




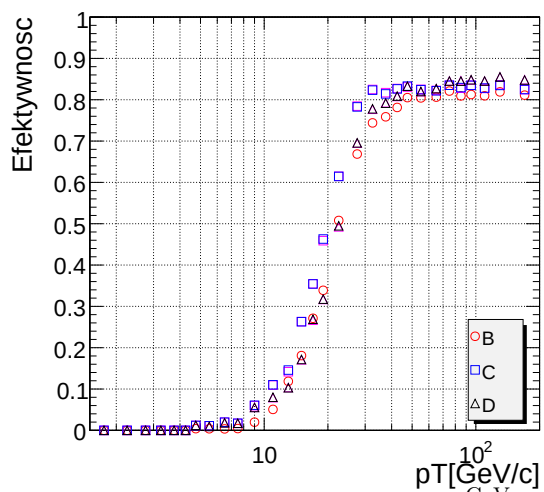
Rysunek 4.32: Wieża 5, $p_T > 3 \frac{\text{GeV}}{c}$



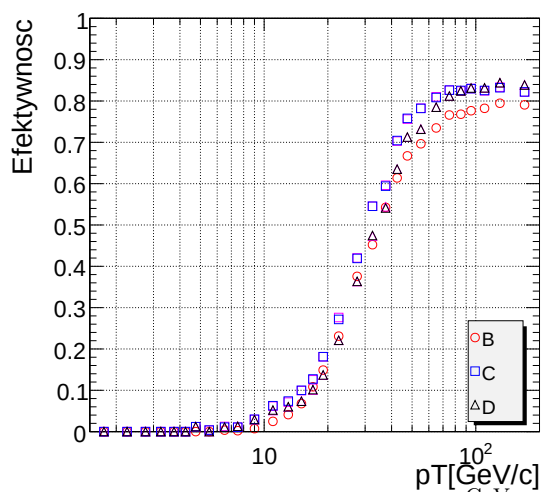
Rysunek 4.33: Wieża 5, $p_T > 6 \frac{\text{GeV}}{c}$



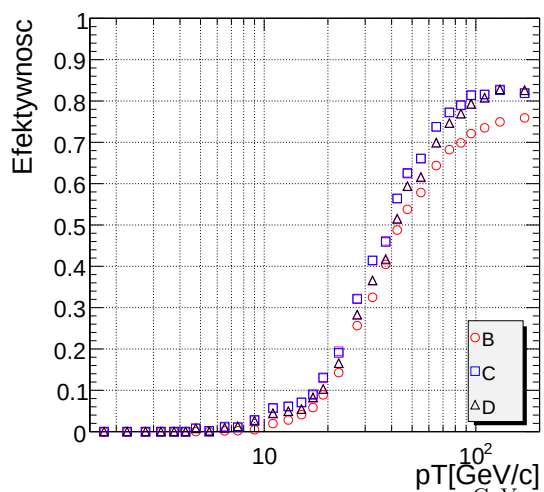
Rysunek 4.34: Wieża 5, $p_T > 14 \frac{\text{GeV}}{c}$



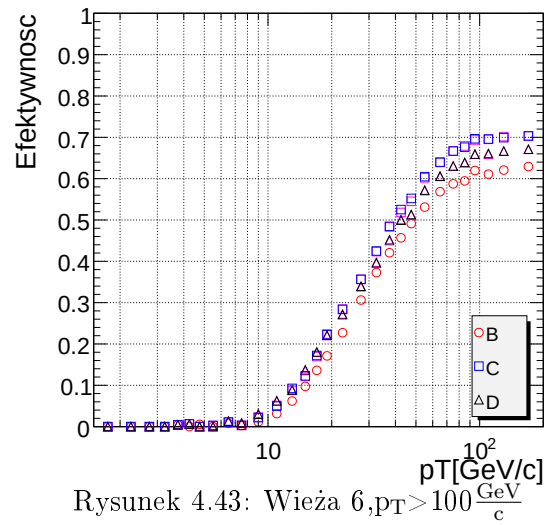
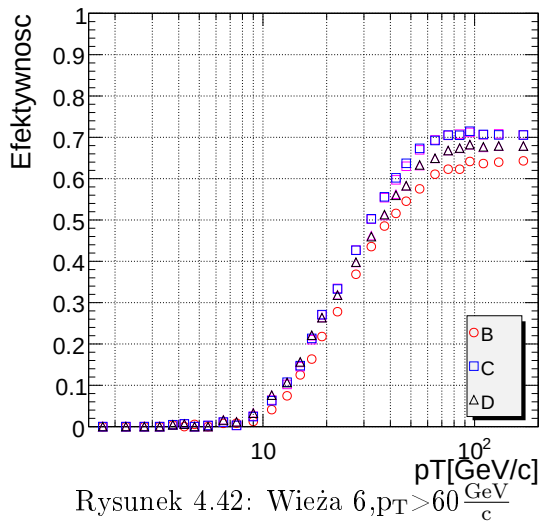
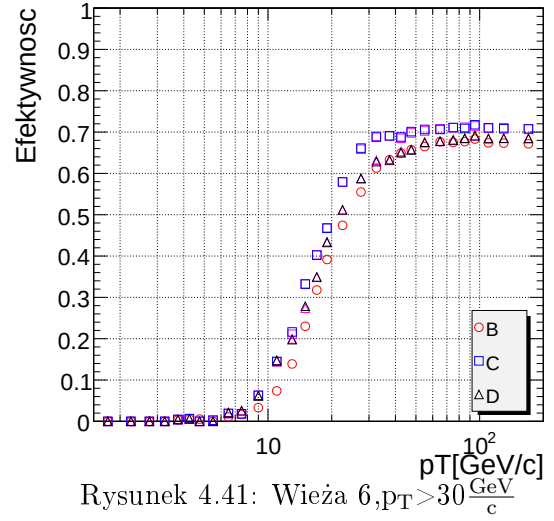
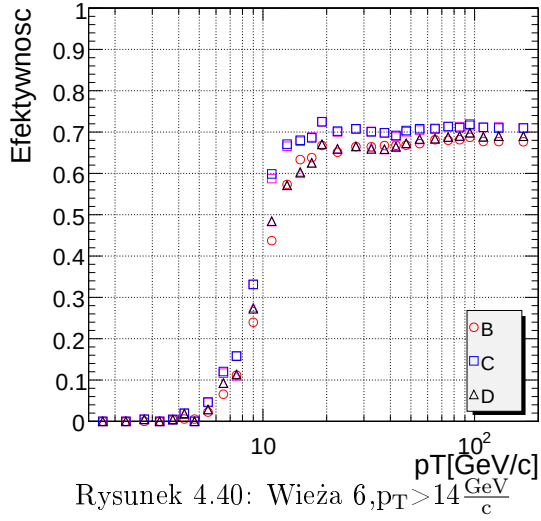
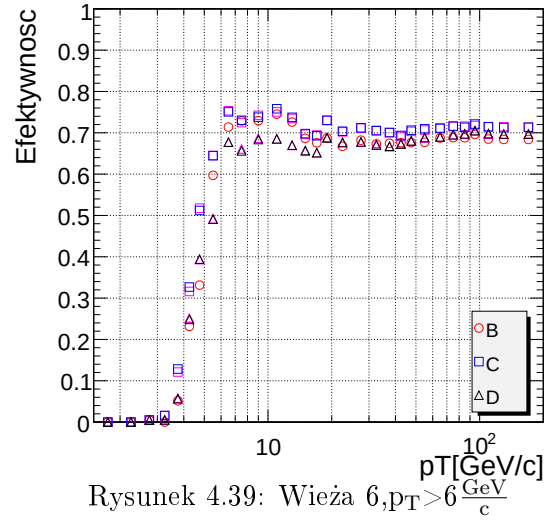
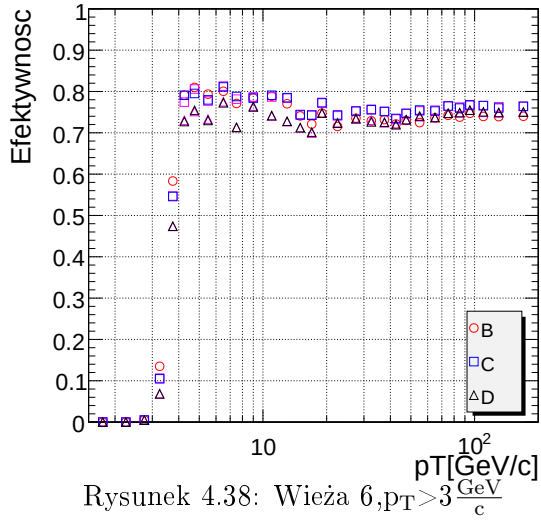
Rysunek 4.35: Wieża 5, $p_T > 30 \frac{\text{GeV}}{c}$

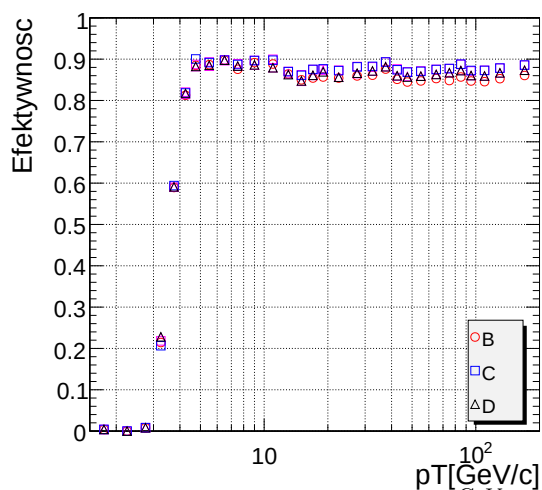


Rysunek 4.36: Wieża 5, $p_T > 60 \frac{\text{GeV}}{c}$

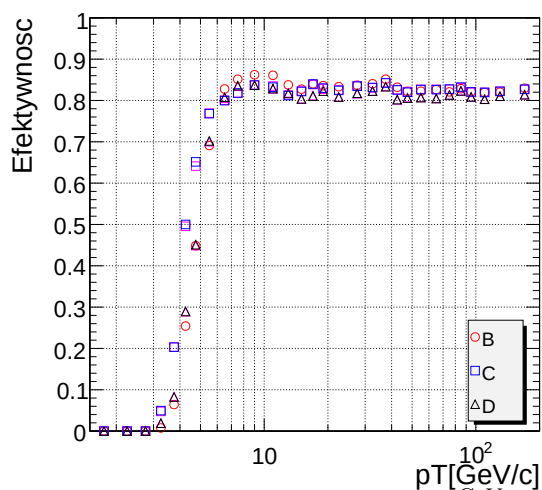


Rysunek 4.37: Wieża 5, $p_T > 100 \frac{\text{GeV}}{c}$

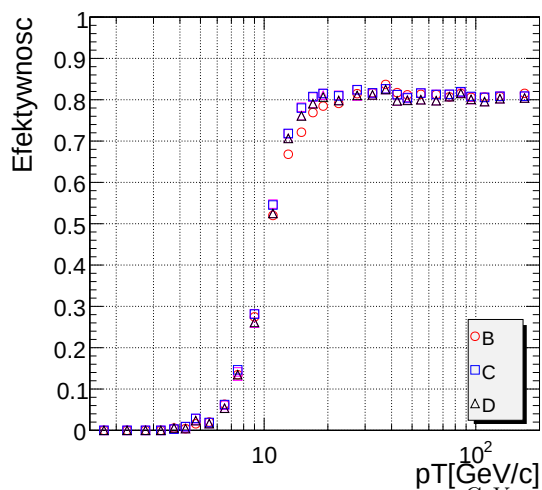




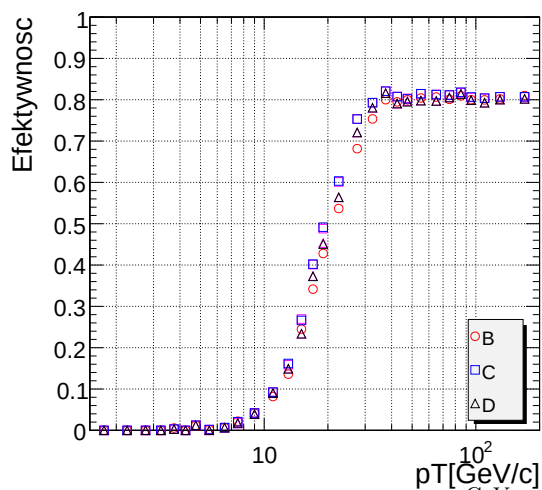
Rysunek 4.44: Wieża 7, $p_T > 3 \frac{\text{GeV}}{c}$



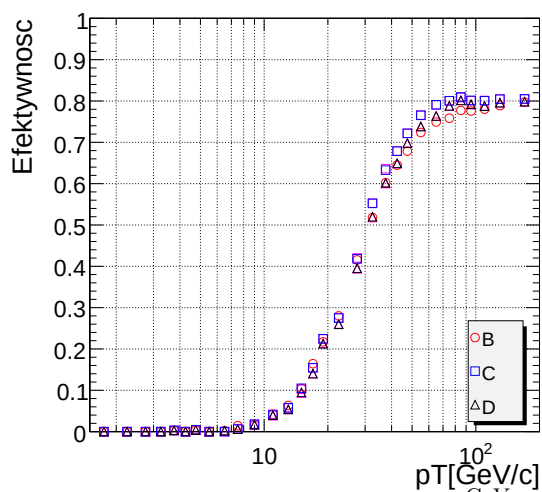
Rysunek 4.45: Wieża 7, $p_T > 6 \frac{\text{GeV}}{c}$



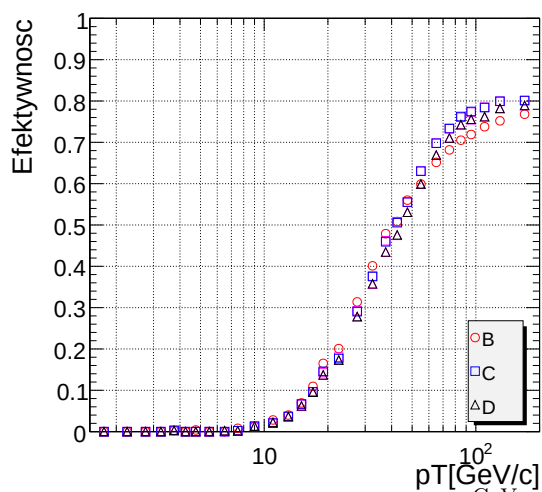
Rysunek 4.46: Wieża 7, $p_T > 14 \frac{\text{GeV}}{c}$



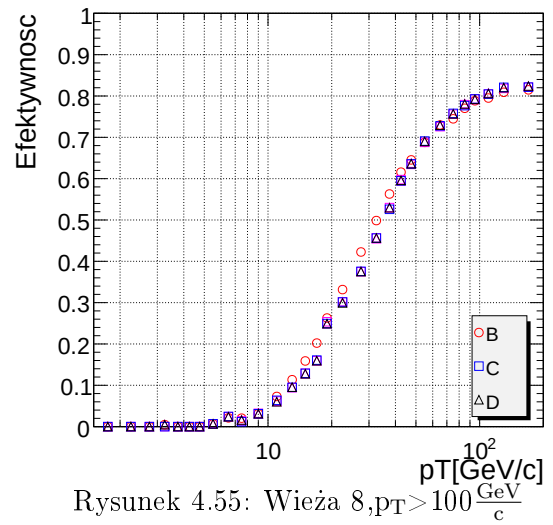
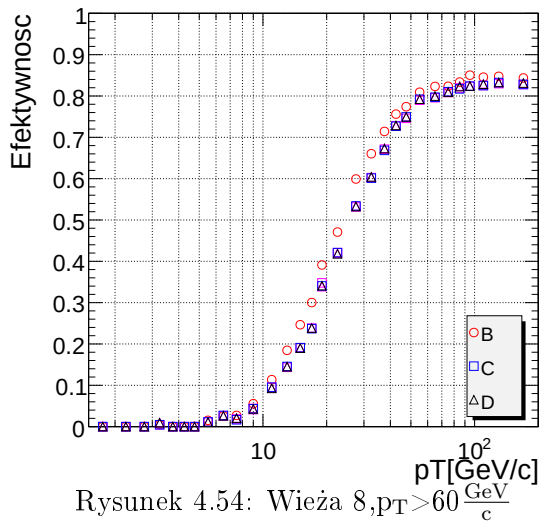
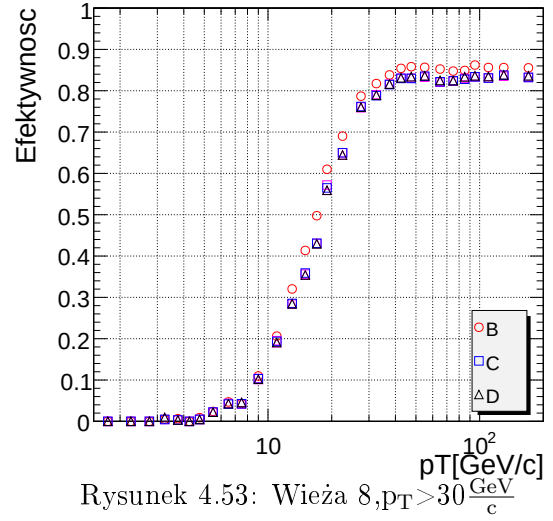
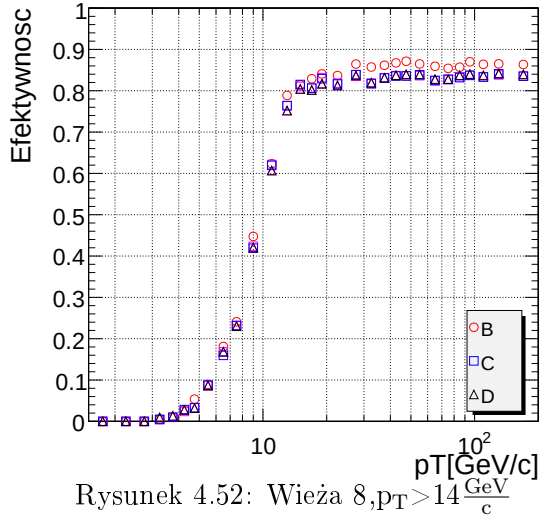
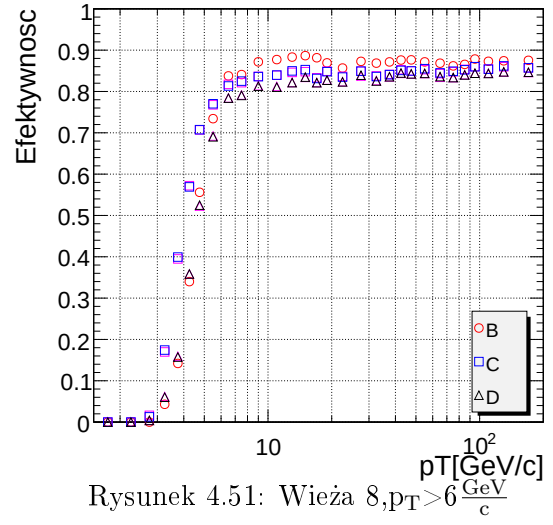
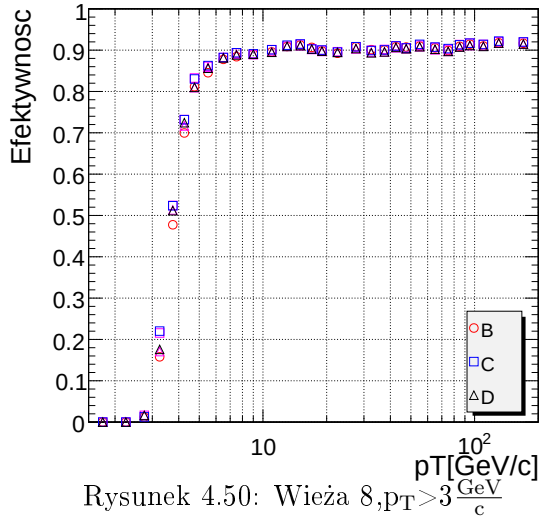
Rysunek 4.47: Wieża 7, $p_T > 30 \frac{\text{GeV}}{c}$

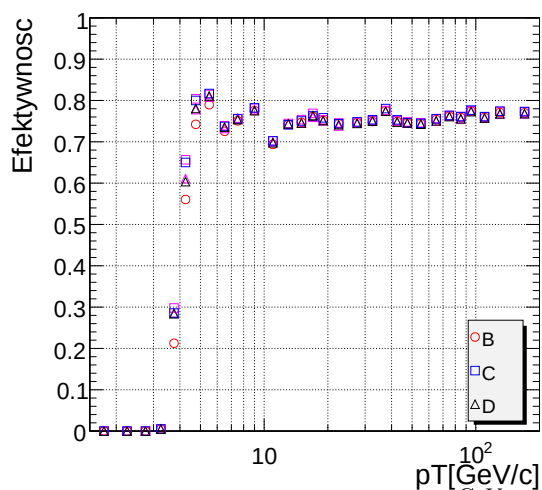


Rysunek 4.48: Wieża 7, $p_T > 60 \frac{\text{GeV}}{c}$

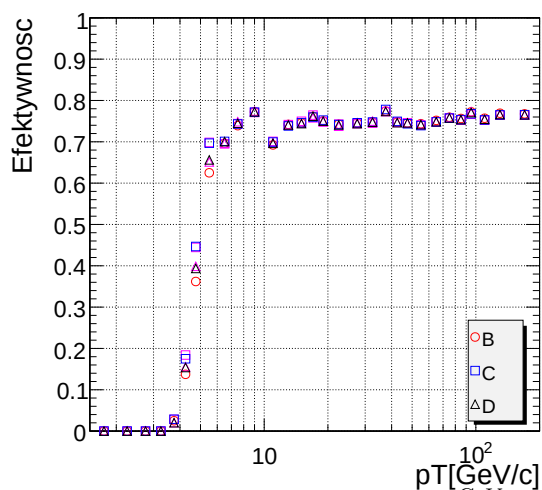


Rysunek 4.49: Wieża 7, $p_T > 100 \frac{\text{GeV}}{c}$

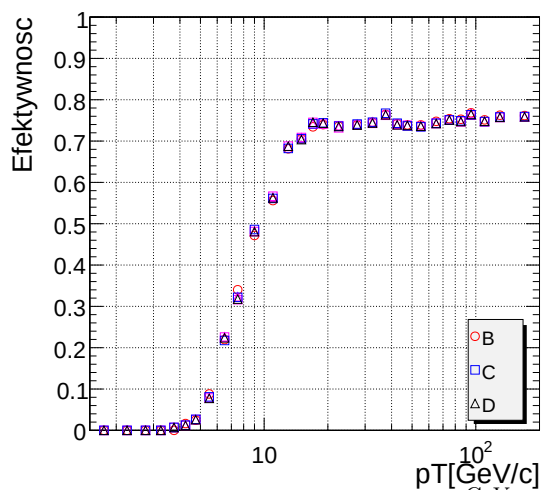




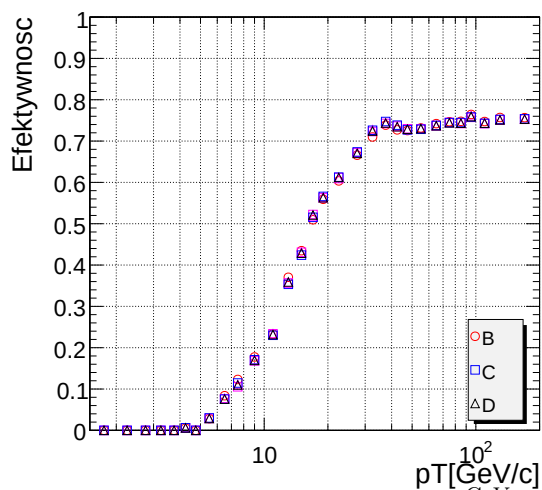
Rysunek 4.56: Wieża 9, $p_T > 3 \frac{\text{GeV}}{c}$



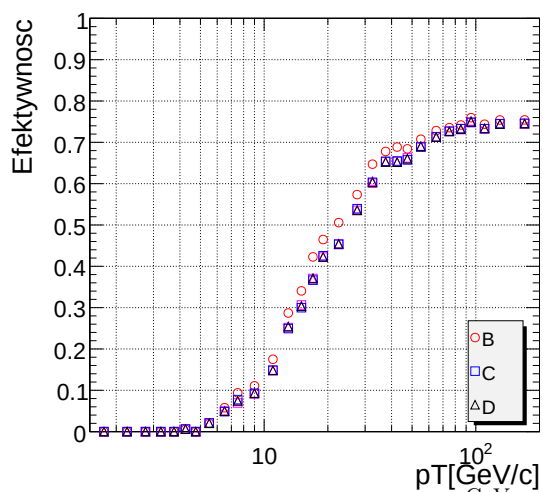
Rysunek 4.57: Wieża 9, $p_T > 6 \frac{\text{GeV}}{c}$



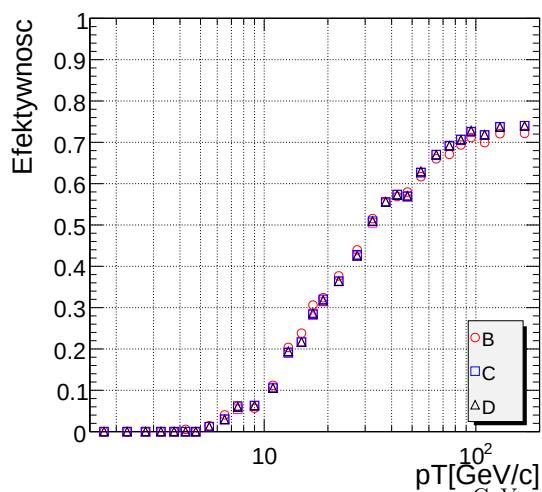
Rysunek 4.58: Wieża 9, $p_T > 14 \frac{\text{GeV}}{c}$



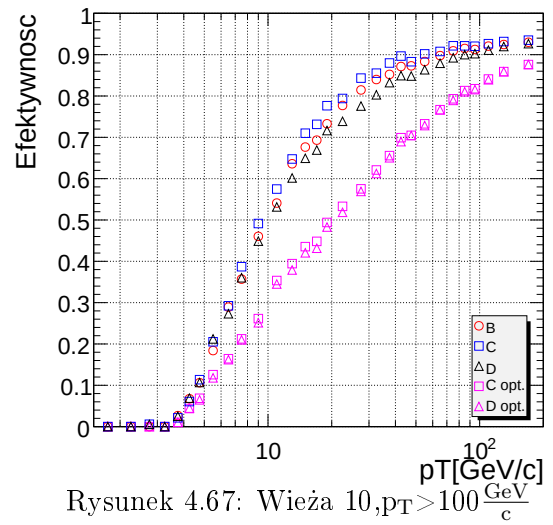
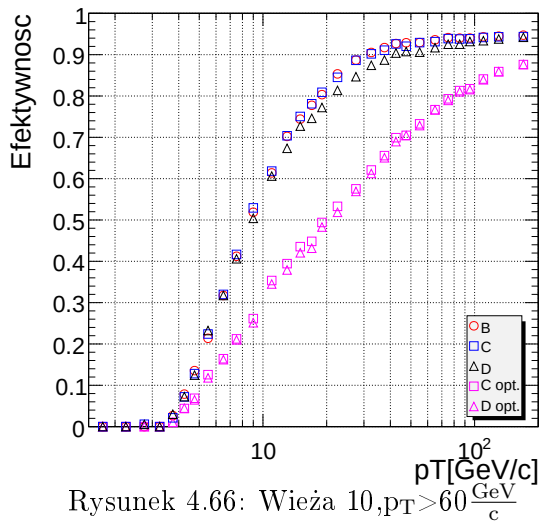
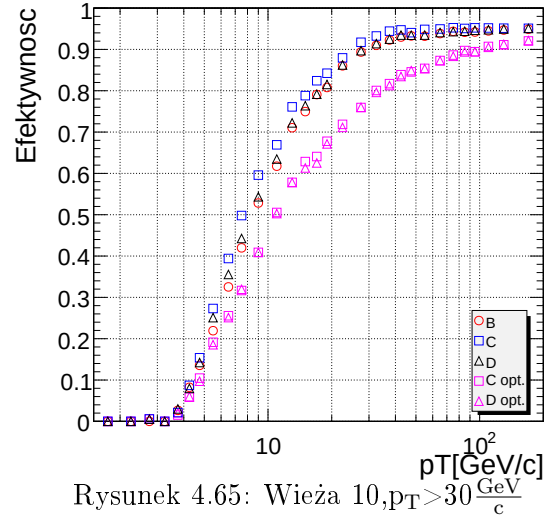
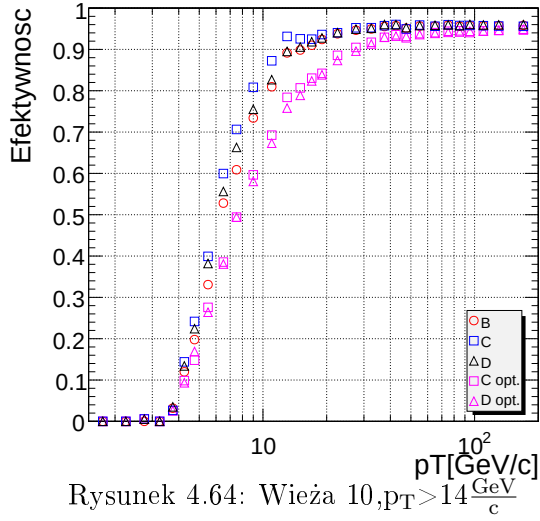
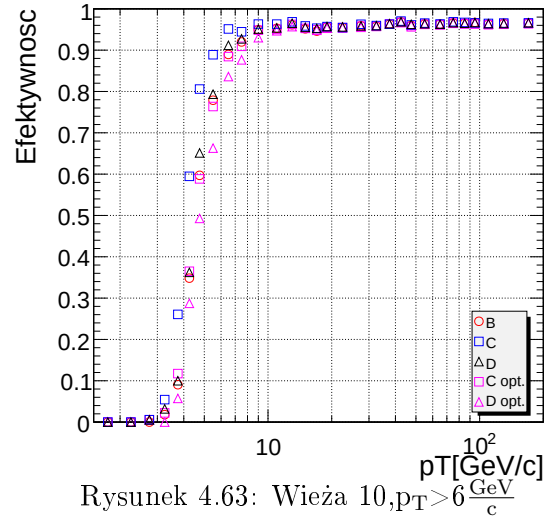
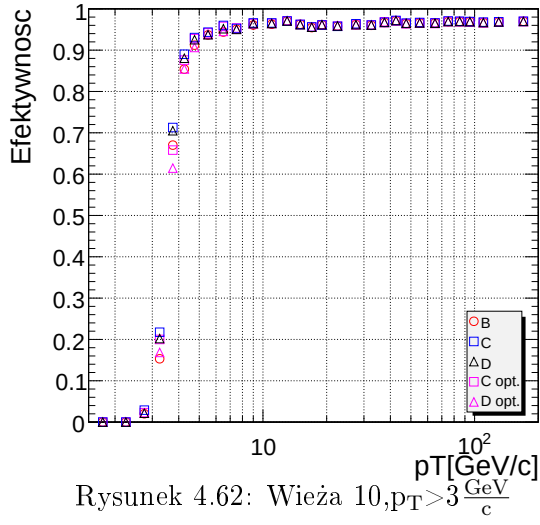
Rysunek 4.59: Wieża 9, $p_T > 30 \frac{\text{GeV}}{c}$

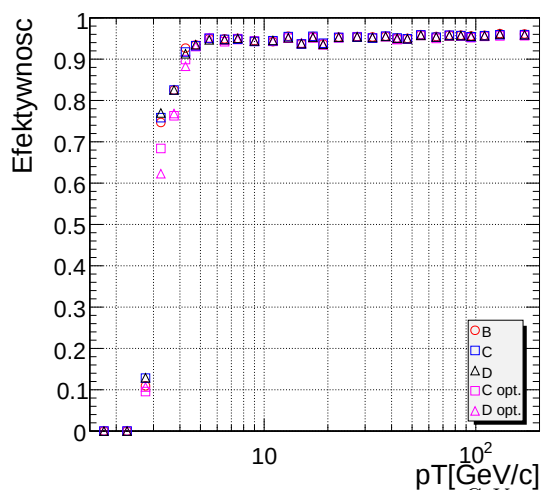


Rysunek 4.60: Wieża 9, $p_T > 60 \frac{\text{GeV}}{c}$

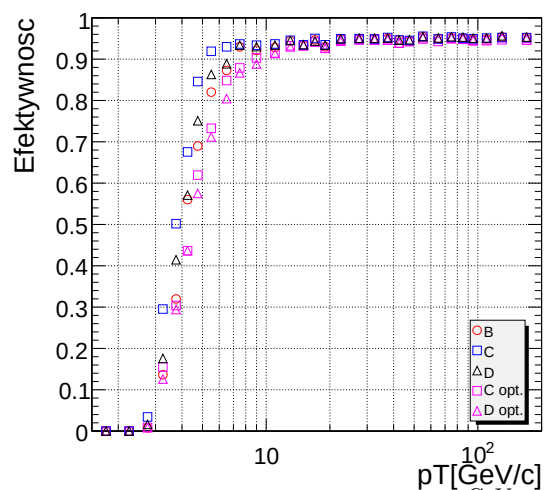


Rysunek 4.61: Wieża 9, $p_T > 100 \frac{\text{GeV}}{c}$

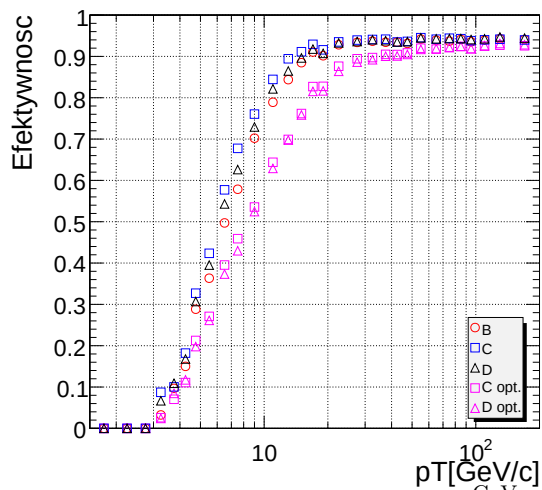




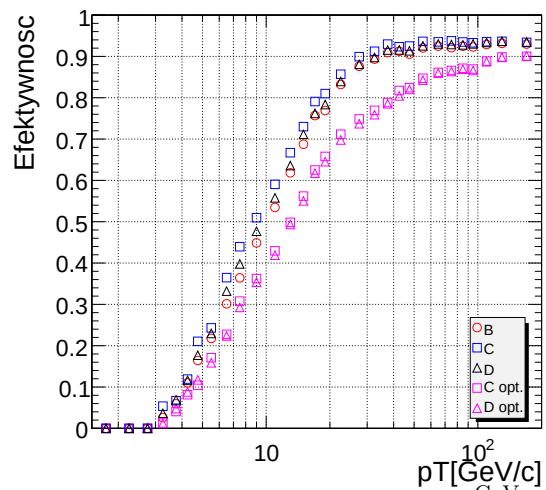
Rysunek 4.68: Wiza 11, $p_T > 3 \frac{\text{GeV}}{c}$



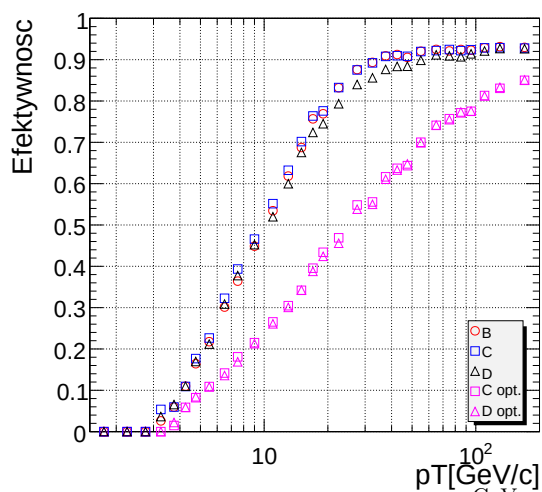
Rysunek 4.69: Wiza 11, $p_T > 6 \frac{\text{GeV}}{c}$



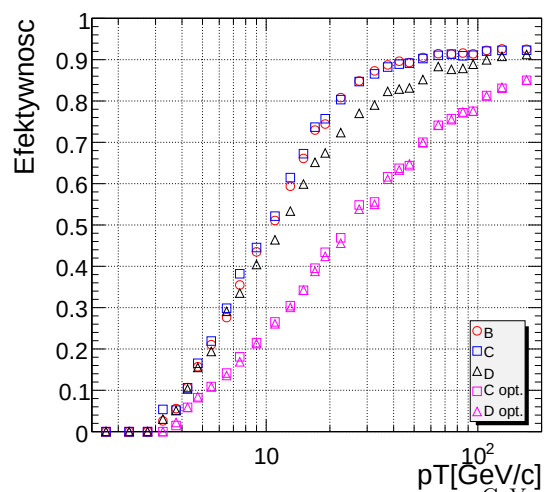
Rysunek 4.70: Wiza 11, $p_T > 14 \frac{\text{GeV}}{c}$



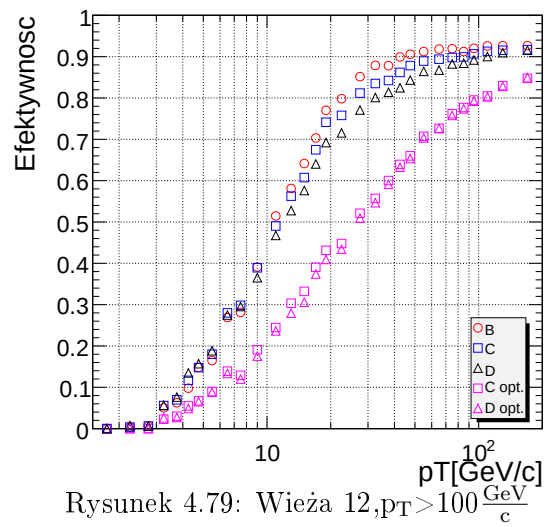
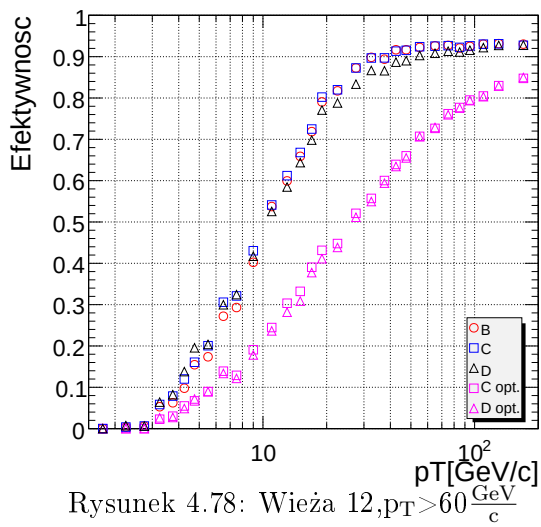
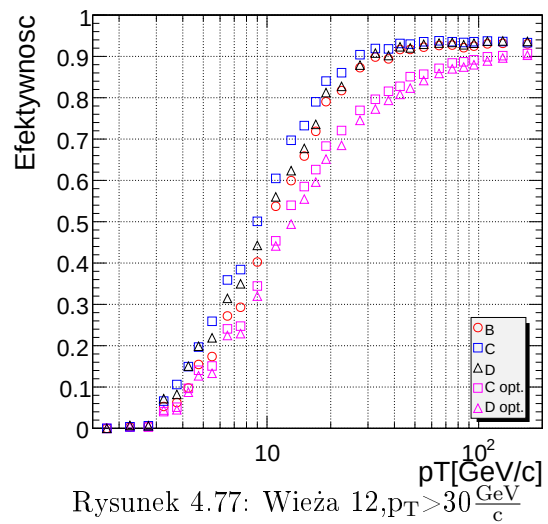
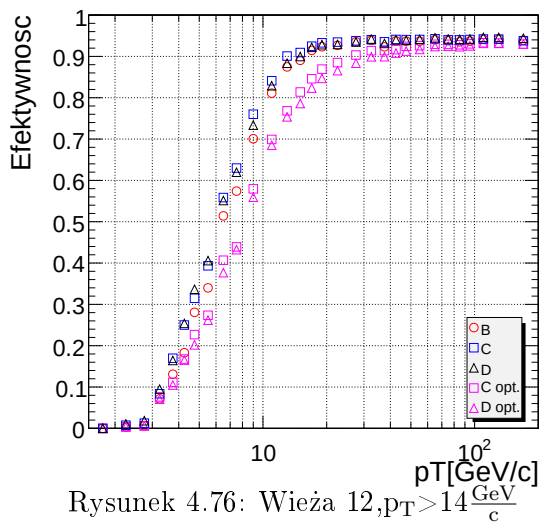
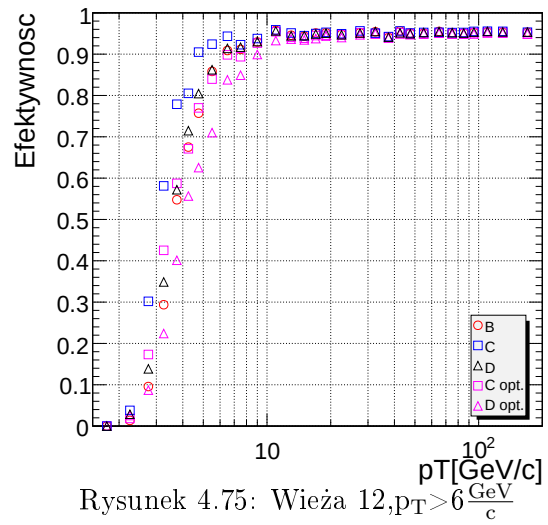
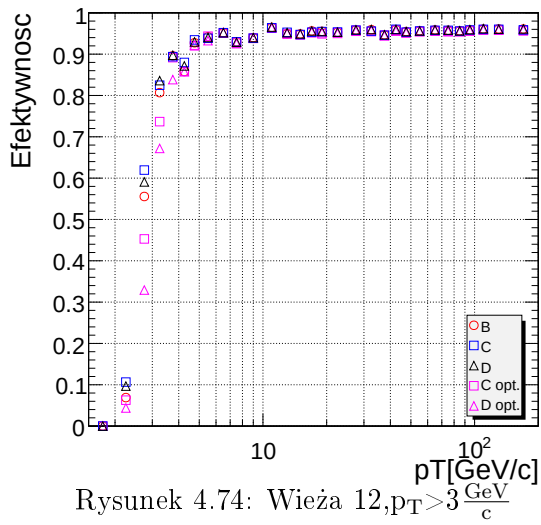
Rysunek 4.71: Wiza 11, $p_T > 30 \frac{\text{GeV}}{c}$

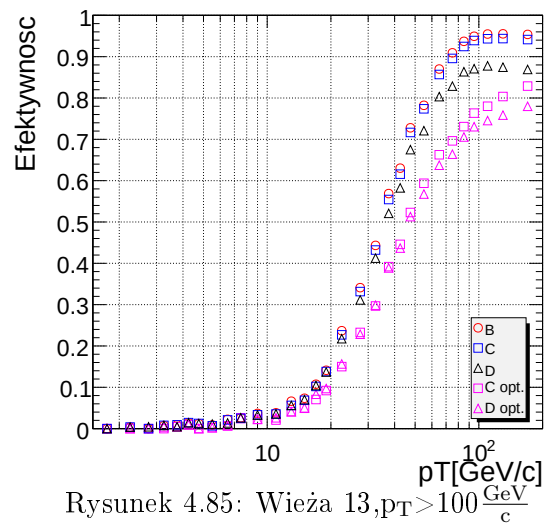
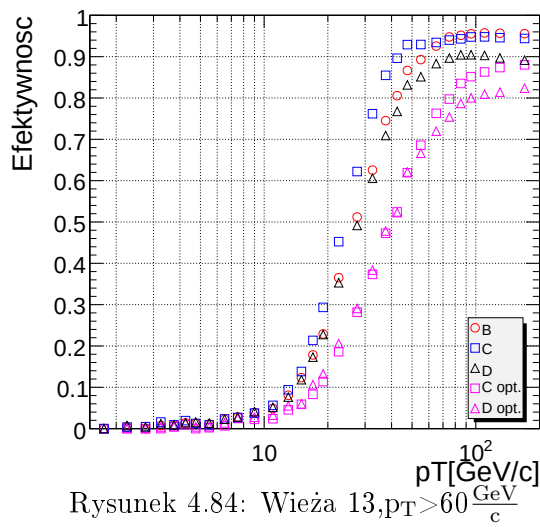
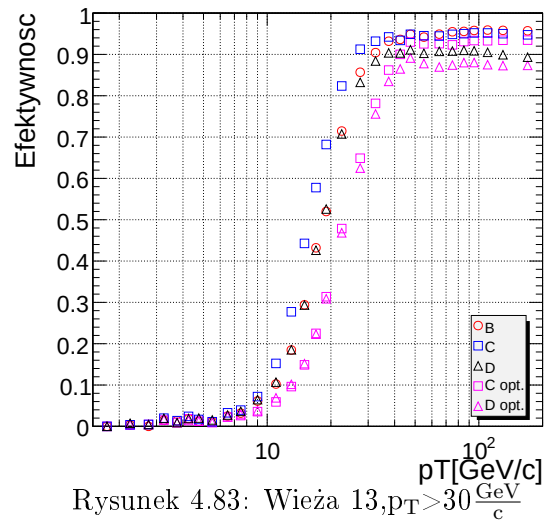
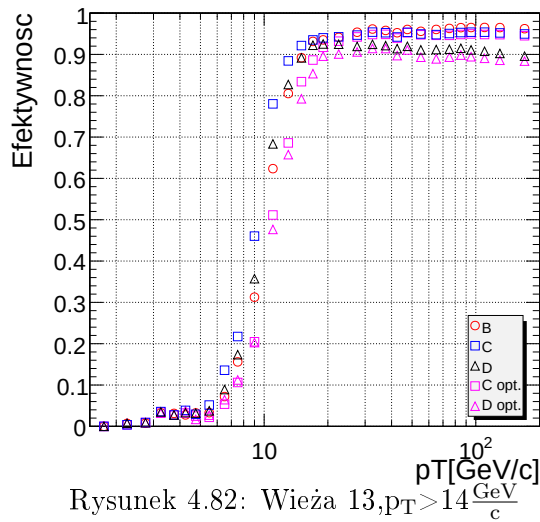
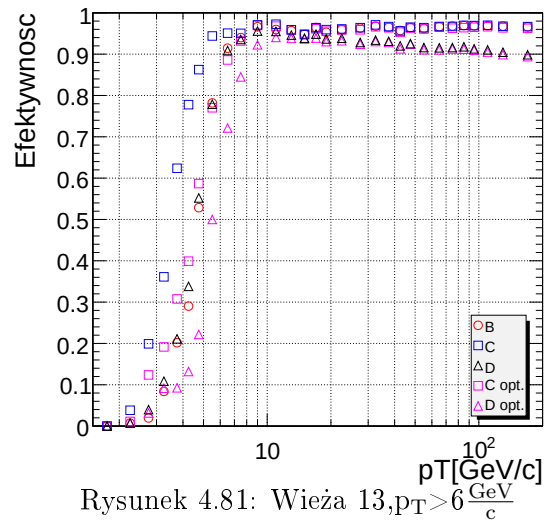
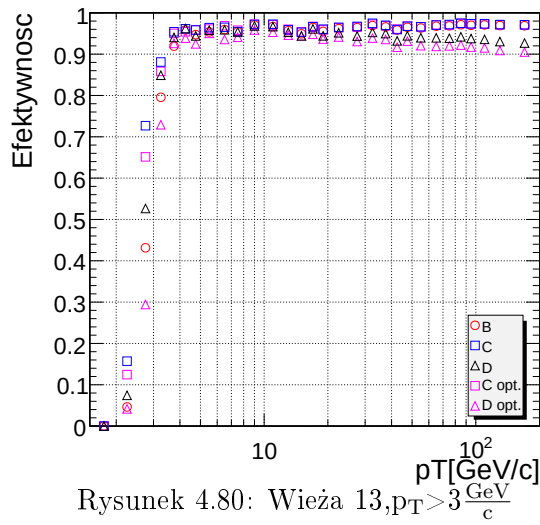


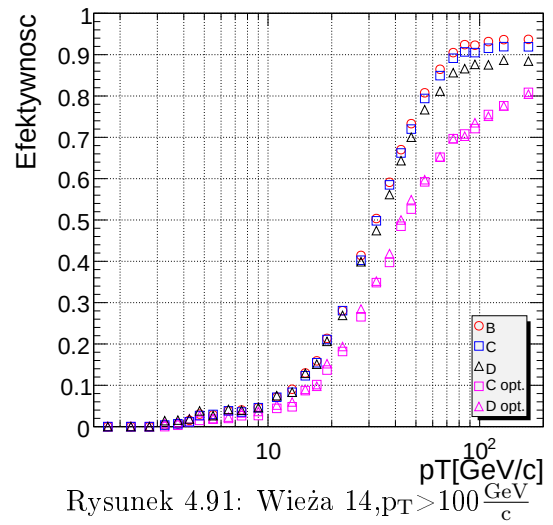
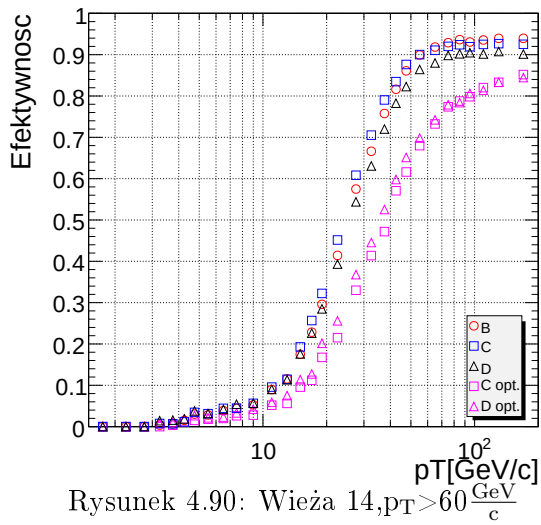
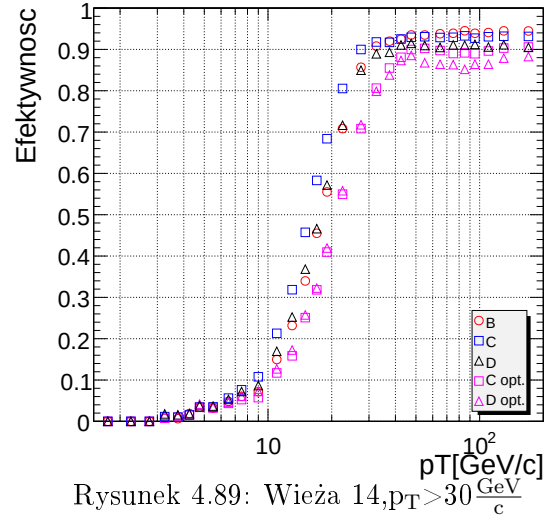
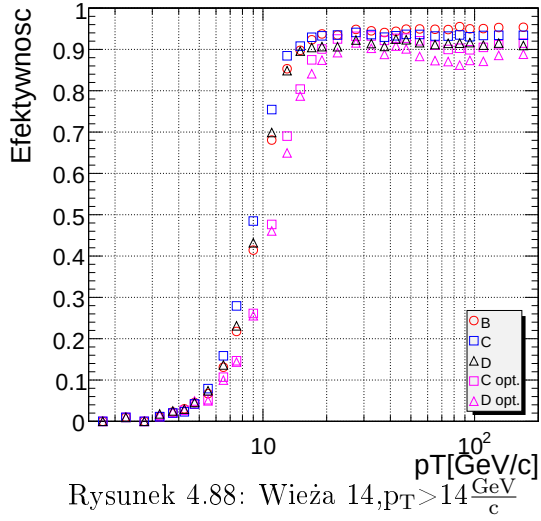
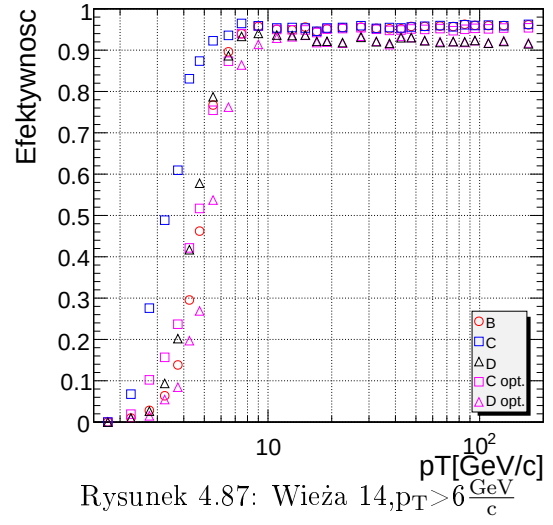
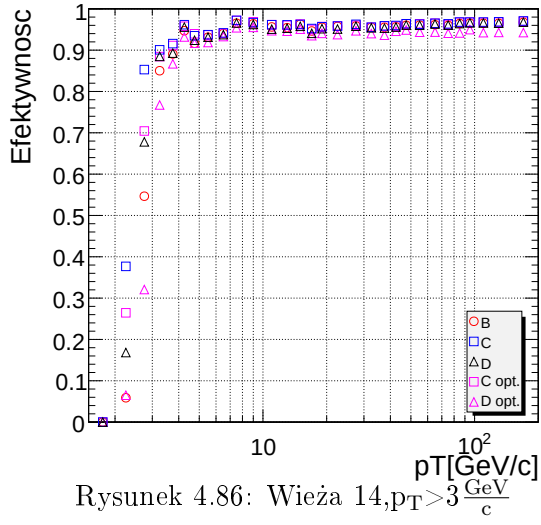
Rysunek 4.72: Wiza 11, $p_T > 60 \frac{\text{GeV}}{c}$

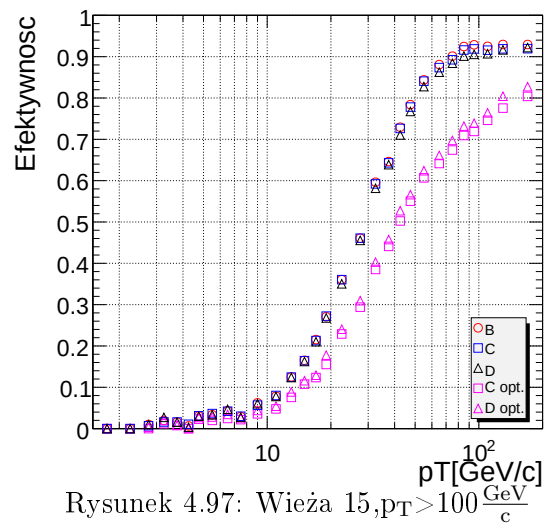
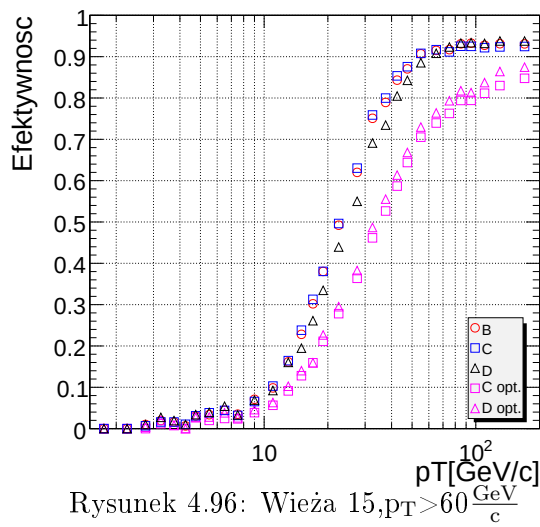
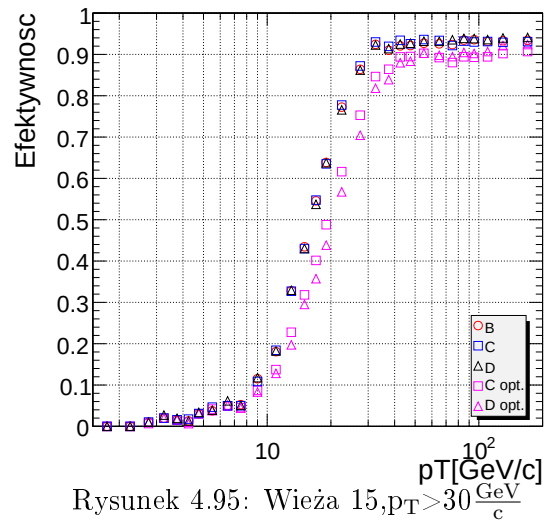
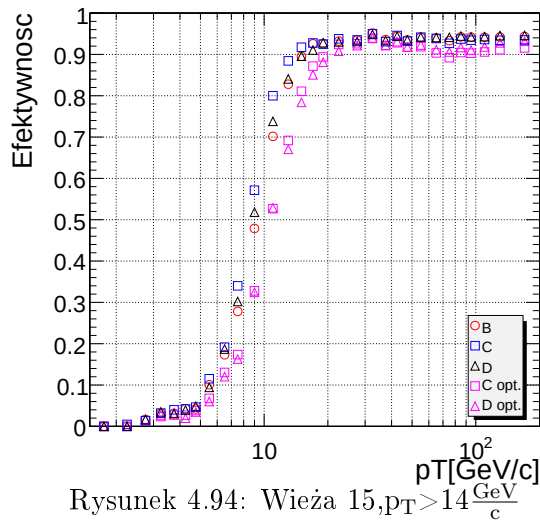
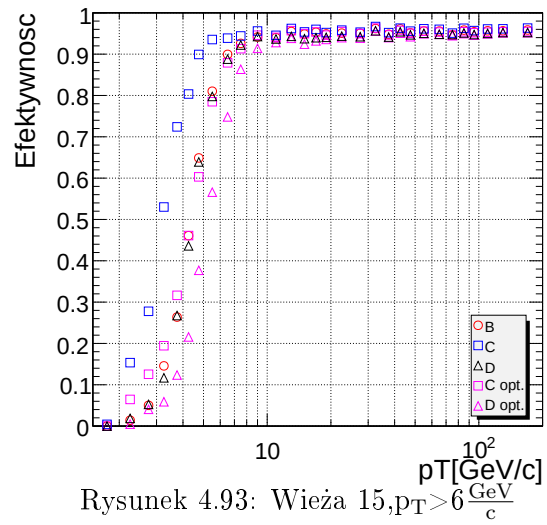
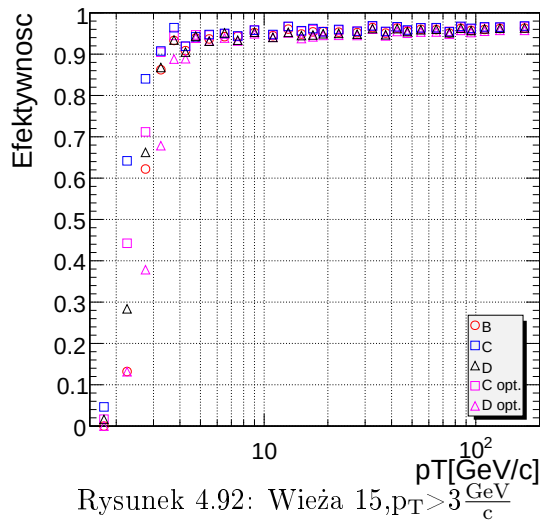


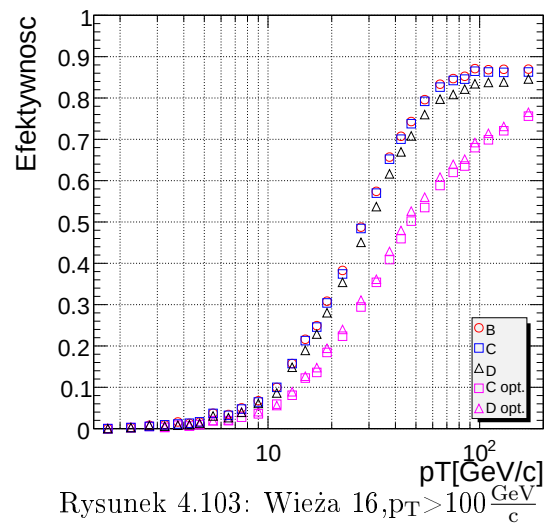
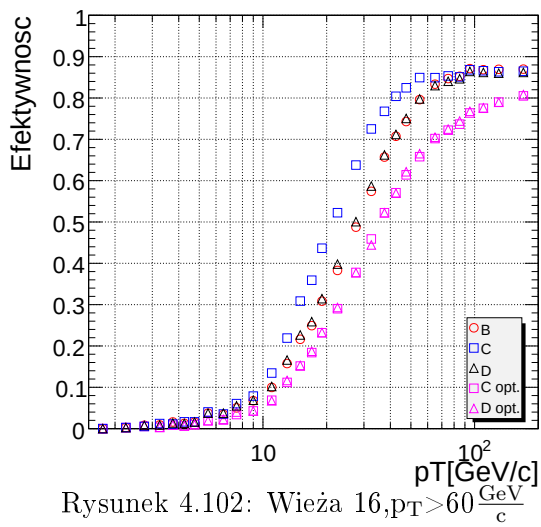
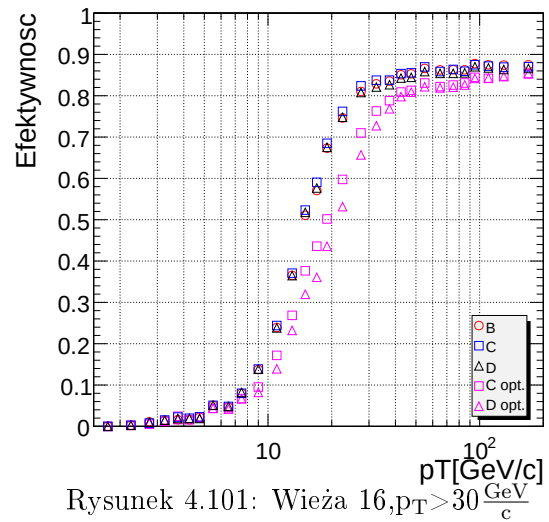
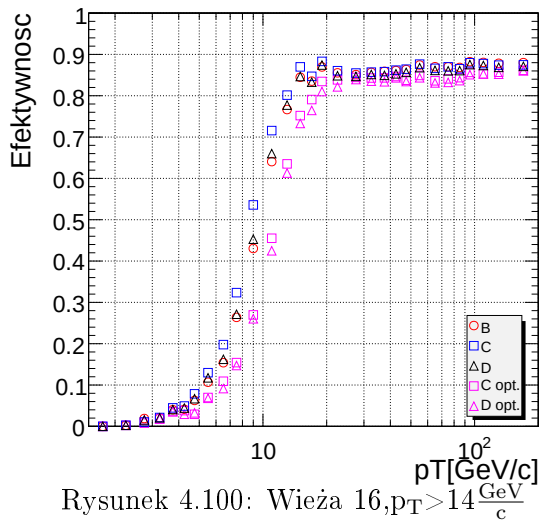
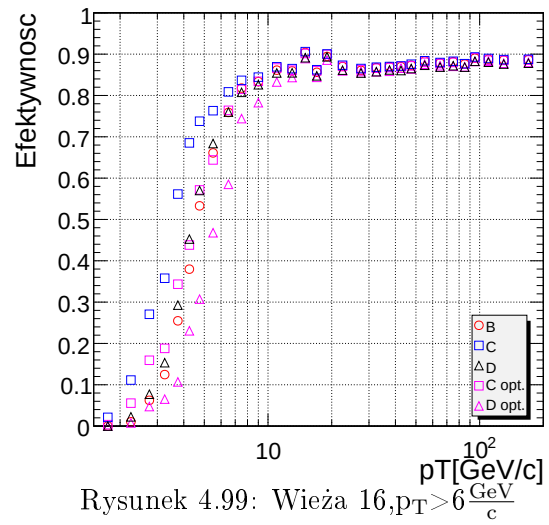
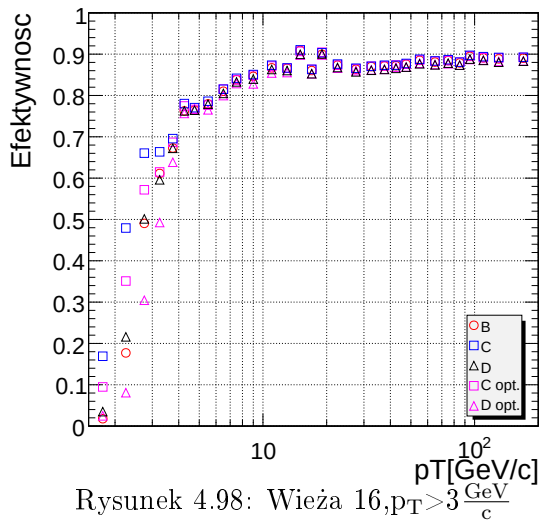
Rysunek 4.73: Wiza 11, $p_T > 100 \frac{\text{GeV}}{c}$

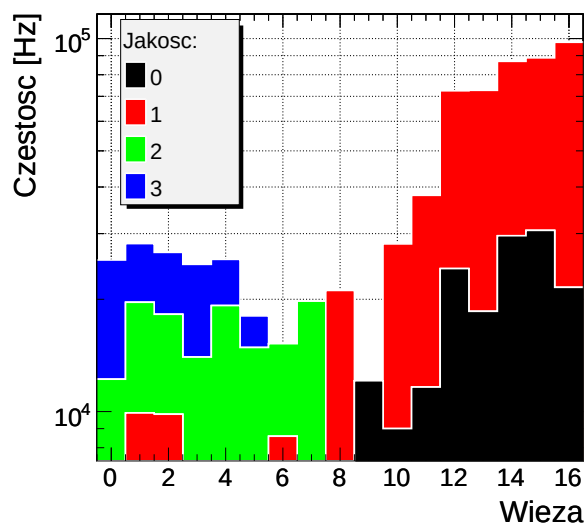




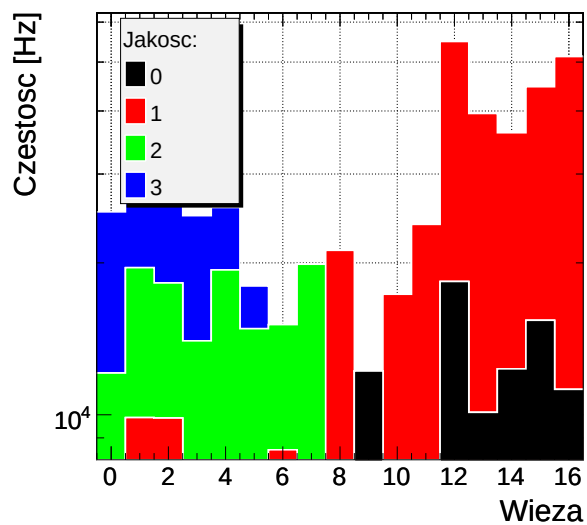




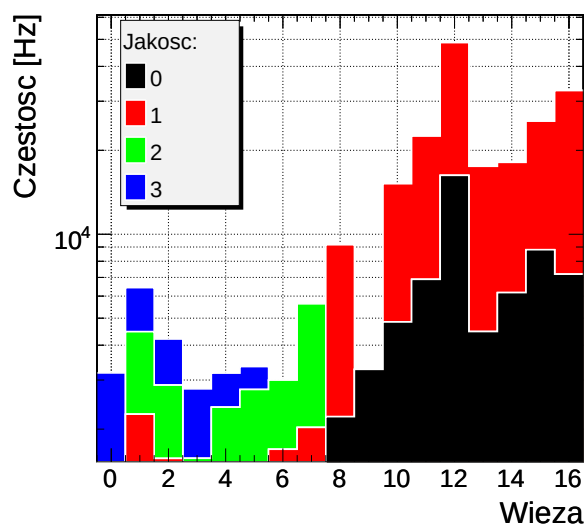




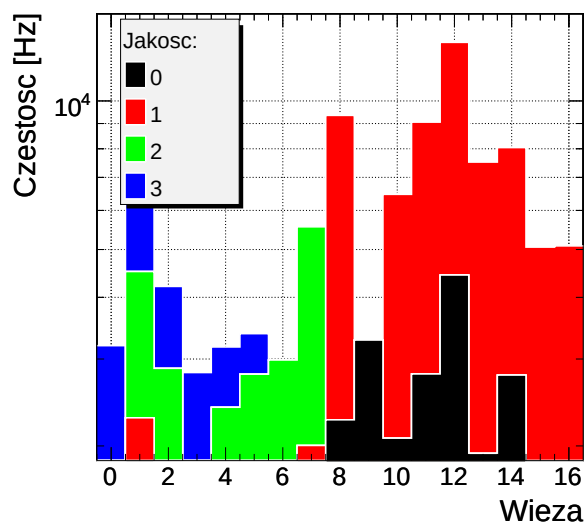
Rysunek 4.104: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pęrowym 9.



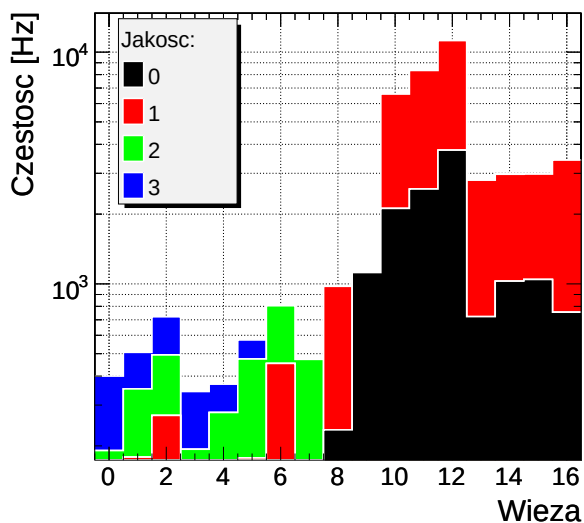
Rysunek 4.105: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pęrowym 9.



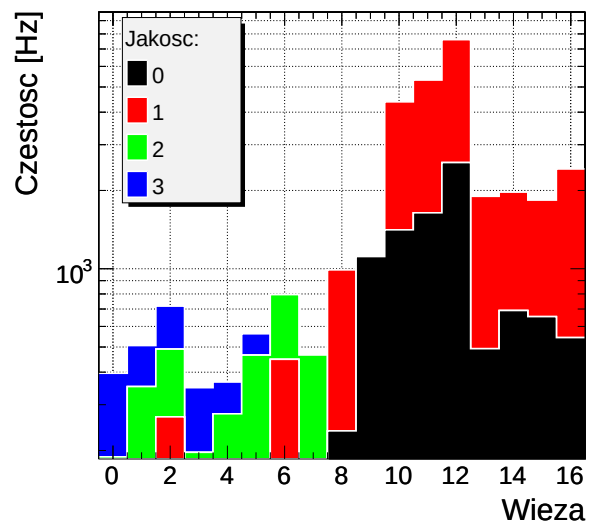
Rysunek 4.106: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pęrowym 13.



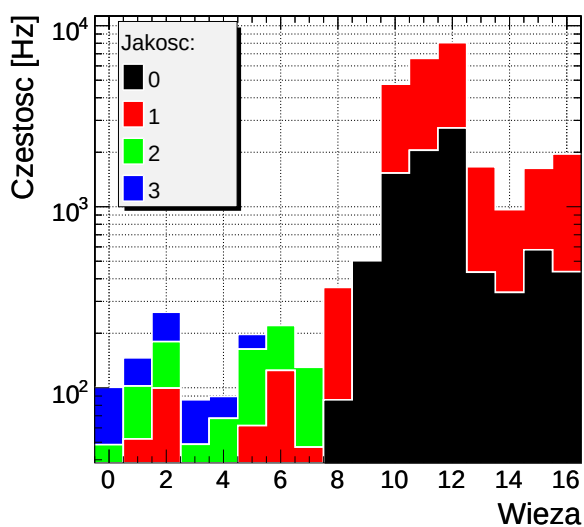
Rysunek 4.107: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pęrowym 13.



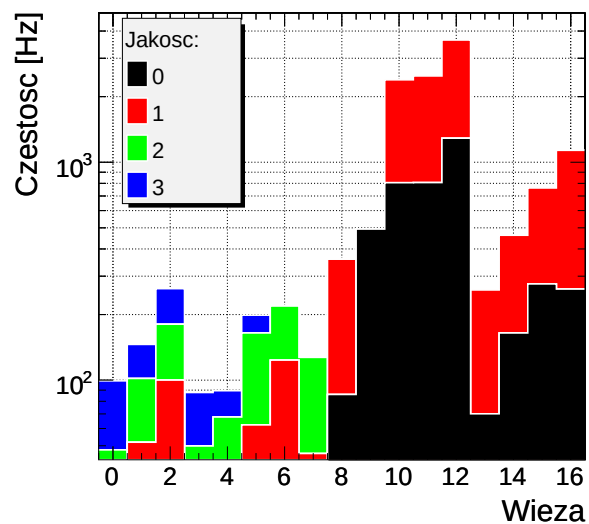
Rysunek 4.108: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pętlowym 18.



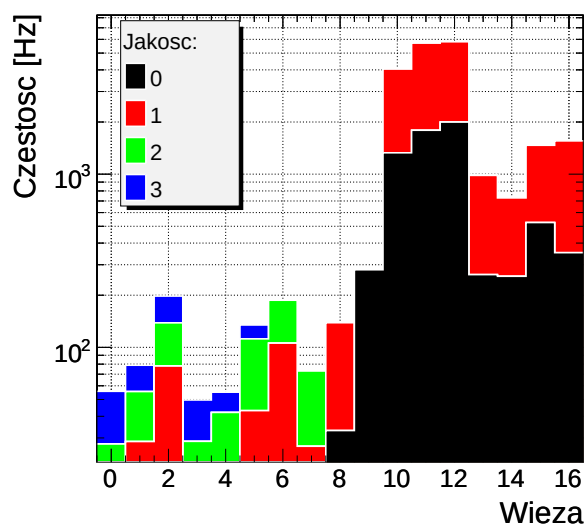
Rysunek 4.109: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pętlowym 18.



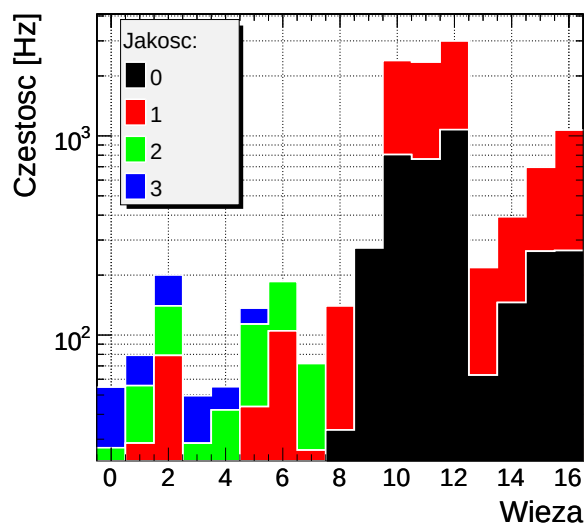
Rysunek 4.110: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pętlowym 24.



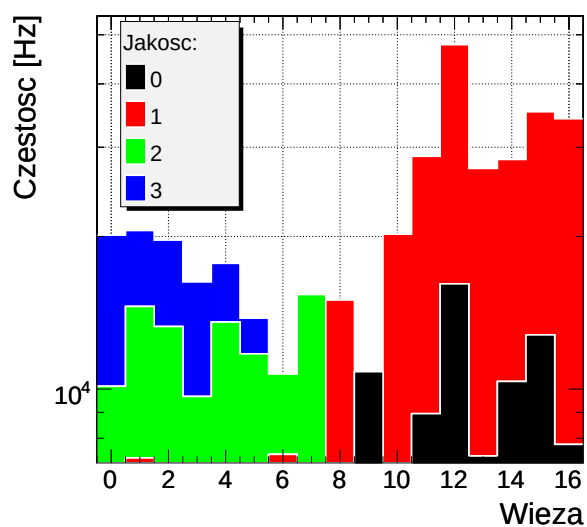
Rysunek 4.111: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pętlowym 24.



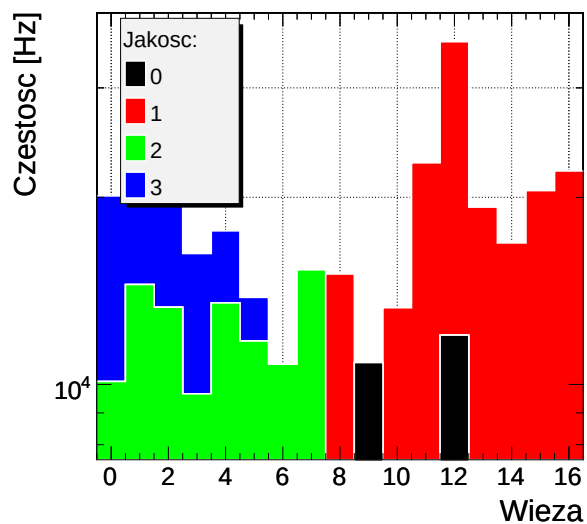
Rysunek 4.112: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pętlowym 31.



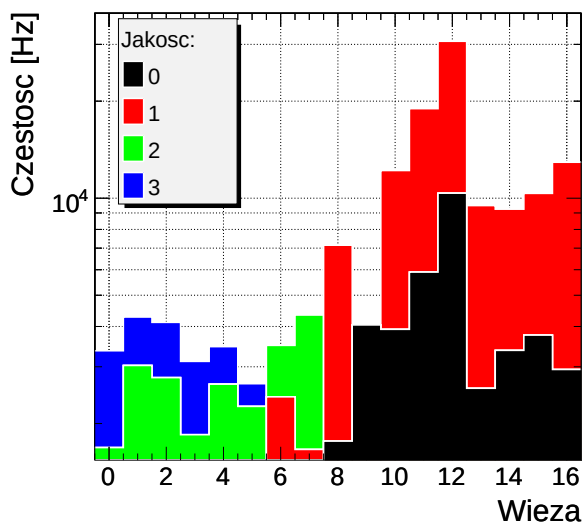
Rysunek 4.113: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm C, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pętlowym 31.



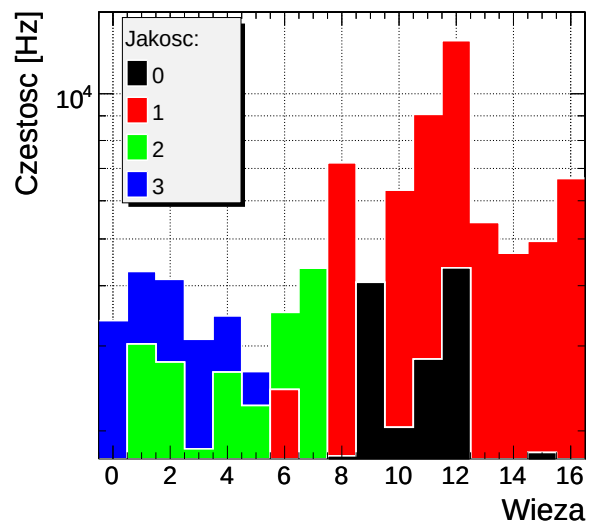
Rysunek 4.114: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pętlowym 9.



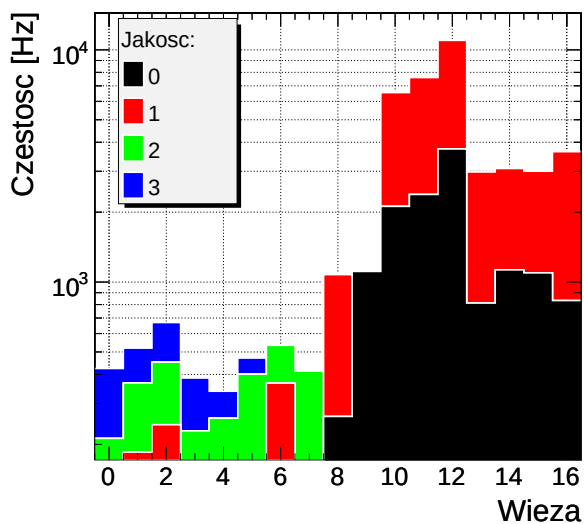
Rysunek 4.115: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pętlowym 9.



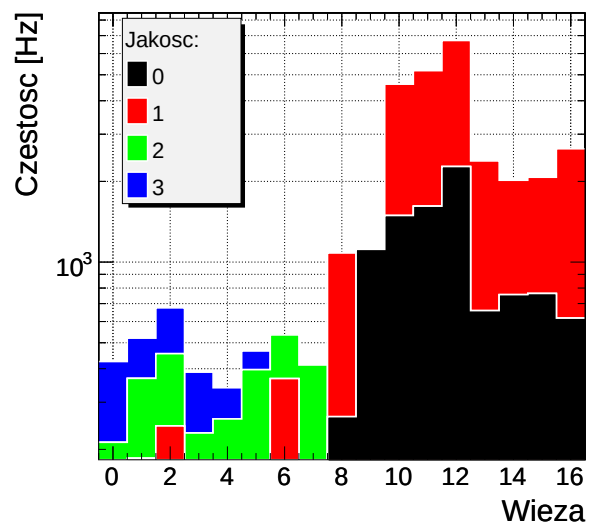
Rysunek 4.116: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pęrowym 13.



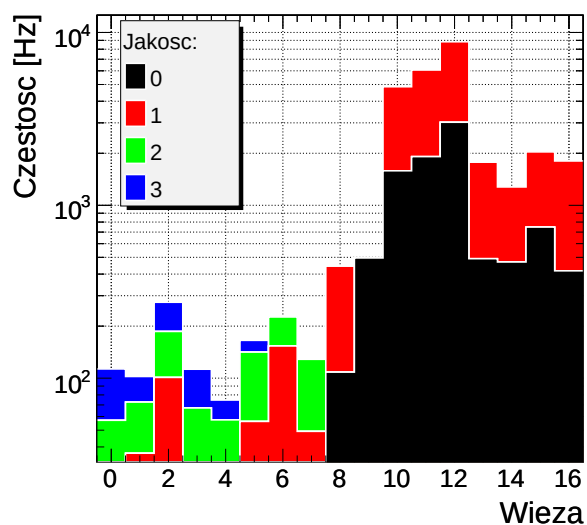
Rysunek 4.117: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pęrowym 13.



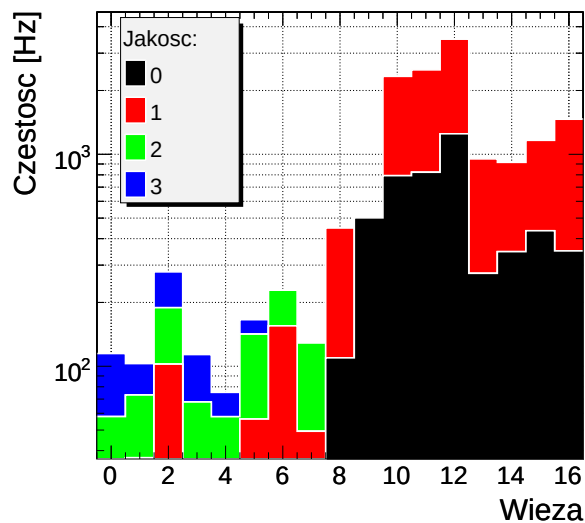
Rysunek 4.118: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pęrowym 18.



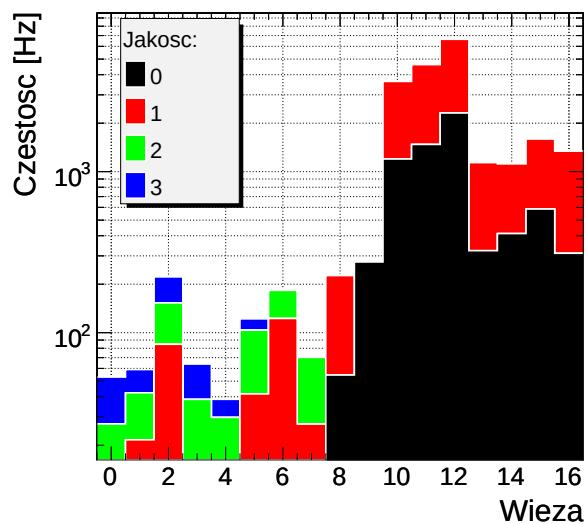
Rysunek 4.119: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pęrowym 18.



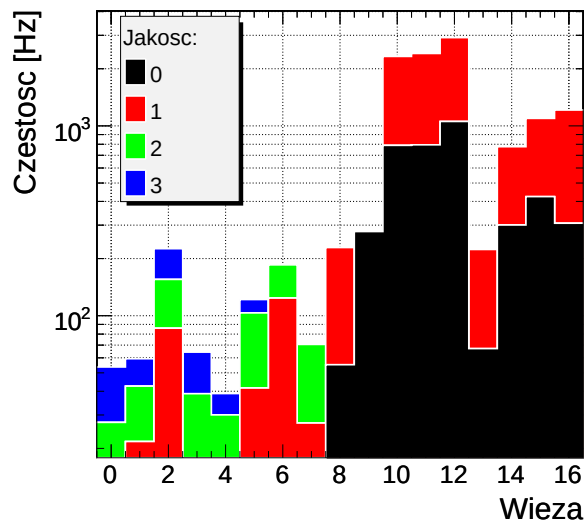
Rysunek 4.120: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pętlowym 24.



Rysunek 4.121: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pętlowym 24.



Rysunek 4.122: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, brak optymalizacji, cięcie na kodzie pętlowym 31.



Rysunek 4.123: Częstość zliczeń w poszczególnych wieżach - algorytm D, włączona optymalizacja, cięcie na kodzie pętlowym 31.

Rozdział 5

Podsumowanie

W pracy tej zaprojektowane, zaimplementowane i przetestowane zostały dwa algorytmy (C oraz D) generacji wzorców pędowych. Dodatkowo testom poddany został trzeci z algorytmów (B) powstały w ramach pracy doktorskiej Karola Buńkowskiego. W testach najlepiej wypadł algorytm D, dając nieco lepsze lub zbliżone (w niektórych wieżach) krzywe efektywności niż algorytm C. Wzorce wygenerowane algorytmem B charakteryzowały się nieco gorszymi krzywymi efektywności niż wzorce generowane algorytmami C oraz D.

Wybór algorytmu generacji wzorców zależeć będzie od dwóch czynników. Pierwszy z nich to wpływ szumów komór RPC na częstość trygera działającego z danym zestawem wzorców. Możliwość symulacji szumów w komorach RPC w środowisku CMSSW pojawiała się, gdy praca ta była w końcowym etapie pisania. Odpowiedź trygera z wygenerowanymi wzorcami w obecności szumów nie została zbadana.

Drugim z czynników mających wpływ na wybór algorytmu jest możliwość kompilacji wygenerowanych wzorców dla wykorzystywanych przez tryger RPC układów FPGA. Układy te charakteryzują się ograniczoną pojemnością, co narzuca ograniczenia na ilość wzorców, którą można użyć. Ograniczenia te można w pewnym stopniu ominąć zwiększając dopuszczalny rozmiar scalania wzorców, co jednak może odbić się negatywnie na częstości trygera. Należy podkreślić, że ograniczona pojemność układów FPGA jest najważniejszym z czynników decydujących o możliwości użycia danego zestawu wzorców. Próbne kompilacje wzorców generowanych algorytmem D nie wykazały żadnych problemów.

Należy wspomnieć, że tryger RPC działa równolegle do dwóch innych trygerów - trygera DT oraz CSC. Informacje o kandydatach na miony pochodzące z tych trzech systemów są łączone przez tryger GMT. Warto się zastanowić, czy optymalizacji wzorców pędowych nie należy przeprowadzić uwzględniając obecność trygerów DT oraz CSC.

Obecne implementacje procesora PAC nie posiadają możliwości redukcji klastrów, w pracy tej wpływ deklustracji również nie był badany. Możliwe, że implementacja algorytmu redukcji klastrów pozwoliłaby na ograniczenie częstości trygerów pochodzących z trygera RPC.

Bibliografia

- [1] D.Clowe M.Bradac A.H.Gonzalez M.Markevitch S.W.Randall C.Jones D.Zaritsky, *A direct empirical proof of the existence of dark matter*, arXiv:astro-ph/0608407v1, 2006
- [2] The LEP Working Group for Higgs Boson Searches *Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP*, CERN-EP/2003-011
- [3] T.Hambye K.Riesselmann, *Matching conditions and Higgs mass upper bounds revisited*, Phys.Rev. D55 (1997) 7255-7262
- [4] CMS collaboration, *CMS Physics TDR: Volume II* J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34 995-1579, doi:10.1088/0954-3899/34/6/S01
- [5] D Acosta et al *CMS High Level Trigger*, CMS AN 2007/009
- [6] CMS collaboration, *CMS Physics Technical Design Report Volume I: Software and Detector Performance*, 2006
- [7] CMS collaboration, *The magnet Project Technical Design Report*, CERN/LHCC 97-10, CMS TDR 1
- [8] CMS collaboration, *The Tracker Project Technical Design Report*, CERN/LHCC 98-6, CMS TDR 5
- [9] CMS collaboration, *CMS ECAL Technical Design Report*, CERN/LHCC 97-33, CMS TDR 4
- [10] K. Banzuzi et al *Link System and Crate Layout of the RPC Pattern Comparator Trigger for the CMS detector*, CMS IN 2002/065
- [11] W M Zabolotny et al *Implementation of the data acquisition system for the Resistive Plate Chamber pattern comparator muon trigger in the CMS experiment*, 2007 Meas. Sci. Technol. 18 2456-2464
- [12] A Fengler,M Kudła,P Zalewski *Ghosts Buster for the RPC Based Muon Trigger*, CMS NOTE 1998/012
- [13] A Kalinowski et al *Sorting Tree and Ghostbuster for RPC Muon Trigger*, CMS IN 2001/007

- [14] K Buńkowski, *Optimization, Synchronization Calibration and Diagnostic of the RPC Muon Trigger System for the CMS detector*, praca doktorska w przygotowaniu