

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł F I Z Y K I



Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Fizyka Techniczna
w specjalności Fizyka Medyczna

Rozszerzenie funkcjonalności i optymalizacja generatora zderzeń cząstek
CALM

Filip Skóra
284562

Promotor
Dr Inż. Małgorzata Janik

WARSZAWA 2020

Streszczenie

Rozszerzenie funkcjonalności i optymalizacja generatora zderzeń cząstek CALM

Badanie funkcji korelacji kątowych w zderzeniach proton-proton pozwala uzyskać wiele informacji na temat natury cząstek elementarnych. Aby lepiej zrozumieć zachodzące zjawiska tworzone są programy komputerowe do symulowania takich zderzeń. Istnieje kilka znanych generatorów jak np. PYTHIA czy PHOJET, które jednak są rozbudowane i skomplikowane co przeszkadza w dokładniejszej analizie wpływu poszczególnych czynników na rozkłady funkcji korelacyjnych. Generator CALM powstał z myślą o prostszym zamodelowaniu zderzeń proton-proton, aby można było jasno określić jak poszczególne mechanizmy fizyczne wpływają na ostatecznie obserwowane struktury. Robocza wersja programu została napisana przez kierującego pracą dyplomową na potrzeby opracowania danych eksperymentu ALICE na Wielkim Zderzaku Hadronów w CERN, jednakże ze względu na szerokie zainteresowanie modelem, zasadne jest szersze opublikowanie zarówno uzyskanych z modelu przewidywań teoretycznych jak i samego kodu źródłowego programu, co umożliwiłoby również innym naukowcom dostosowanie symulacji do swoich potrzeb. Celem tej pracy inżynierskiej był rozwój kodu źródłowego programu CALM: wprowadzenie plików konfiguracyjnych, umożliwiających prostszą zmianę parametrów i ustawień wejściowych modelu oraz optymalizacja i modularyzacja istniejącego kodu. Przed publikacją programu napisano instrukcję użytkownika oraz dokumentację techniczną kodu aby ułatwić korzystanie z niego zarówno programiście jak i użytkownikowi. W pracy można znaleźć opis wykonanych czynności wraz z wynikami testów programu po przeprowadzeniu modyfikacji.

Słowa kluczowe:

Koreacje kątowe, CERN, ALICE, LHC, Monte Carlo, fizyka wysokich energii

(podpis opiekuna naukowego)

(podpis dyplomanta)

Abstract

Functionality development and optimization of the CALM event generator

Studying the angular correlation function in proton-proton collisions provides a lot of information about the nature of elementary particles. To aid the understanding of the occurring phenomena computer simulations can be employed. Several popular event generators, such as PYTHIA or PHOJET, are quite complex. It impedes more detailed analysis of influence of individual factors on correlation function distributions. The CALM generator was designed to model proton-proton collisions more easily so that it is possible to clearly determine how individual physical mechanisms affect the eventually observed structures. The draft version of the program was written by the head of the thesis for the analysis of data from the ALICE experiment on the Large Hadron Collider in CERN, but due to the wide interest in the model, it is reasonable to wider the publication of both theoretical predictions generated by CALM as well as its source code itself, which would also allow other scientists to adapt the simulation to their needs. The purpose of this engineering work is to develop the source code of CALM: to implement the configuration files allowing simpler change of model input parameters and settings with optimizing and modularizing the already existing code. In addition to publishing the program, the user manual and code technical documentation was written to make it easier to use for both the programmer and the ordinary user. This thesis includes a description of the actions performed along with the results of the program tests after modifications.

Keywords:

Angular correlations, CERN, ALICE, LHC, Monte Carlo, HEP, high energy physics

(supervisor's signature)

(student's signature)

Oświadczenie o samodzielności wykonania pracy

Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki

Ja, niżej podpisany:

Filip Skóra, 284562

student Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, świadomy odpowiedzialności prawnej oświadczam, że przedłożoną do obrony pracę dyplomową inżynierską pt.:

Rozszerzenie funkcjonalności i optymalizacja generatora zderzeń cząstek CALM

wykonałem samodzielnie pod kierunkiem

Dr Inż. Małgorzaty Janik

Jednocześnie oświadczam, że:

- praca nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 o prawie autorskim i prawach pokrewnych, oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- praca nie zawiera danych i informacji uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami,
- praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem dyplomu lub tytułu zawodowego w wyższej uczelni,
- promotor pracy jest jej współtwórcą w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Oświadczam także, że treść pracy zapisanej na przekazanym nośniku elektronicznym jest zgodna z treścią zawartą w wydrukowanej wersji niniejszej pracy dyplomowej.

Warszawa, dnia

(podpis dyplomanta)

Oświadczenie o udzieleniu Uczelni licencji do pracy

Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki

Ja, niżej podpisany:

Filip Skóra, 284562

student Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, niniejszym oświadczam, że zachowując moje prawa autorskie udzielam Politechnice Warszawskiej nieograniczonej w czasie, nieodpłatnej licencji wyłącznej do korzystania z przedstawionej dokumentacji pracy dyplomowej pt.:

Rozszerzenie funkcjonalności i optymalizacja generatora zderzeń cząstek CALM

w zakresie jej publicznego udostępniania i rozpowszechniania w wersji drukowanej i elektronicznej*.

Warszawa, dnia

(podpis dyplomanta)

*Na podstawie Ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. 2005 nr 164 poz. 1365) Art. 239. oraz Ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2000 r. Nr 80, poz. 904, z późn. zm.) Art. 15a. "Uczelni w rozumieniu przepisów o szkolnictwie wyższym przysługuje pierwszeństwo w opublikowaniu pracy dyplomowej studenta. Jeżeli uczelnia nie opublikowała pracy dyplomowej w ciągu 6 miesięcy od jej obrony, student, który ją przygotował, może ją opublikować, chyba że praca dyplomowa jest częścią utworu zbiorowego."

Spis treści

1 Wstęp	13
2 Zderzenia wysokich energii	14
2.1 Model Standardowy	14
2.2 Zderzenia hadronów	15
2.3 Funkcje korelacji kątowych	16
2.3.1 Pseudopospieszność	16
2.3.2 Kąt azymutalny	17
2.3.3 Konstrukcja funkcji korelacyjnej	18
2.4 Zasady zachowania w zderzeniach hadronów	20
2.5 Minidżety	20
3 ConservAtion Laws Model	21
3.1 Modele Monte Carlo	21
3.2 Schemat działania	21
3.2.1 Zdefiniowanie cząstek wynikających ze zderzenia	22
3.2.2 Ustalenie energii całkowitej zderzenia do rozdzielenia	23
3.2.3 Wygenerowanie zdarzenia poprzez rozwiązanie problemu N ciał	23
3.2.4 Zdefiniowanie lokalizacji wierzchołków	23
3.3 Opcje CALM	24
3.4 Tpi	24
3.5 Wyniki CALM	25
4 Rozkłady funkcji korelacyjnych	28
4.1 Korelacje $\pi^+ \pi^+$	28
4.2 Korelacje $\pi^+ \pi^-$	29
4.3 Korelacje $\pi^0 \pi^0$	30
4.4 Korelacje $K^+ K^+$	31
4.5 Korelacje pp	32
5 Modyfikacje kodu	33
5.1 Modularyzacja kodu źródłowego	33
5.2 Wprowadzenie plików konfiguracyjnych	34
6 Testy programu	36
6.1 Wykresy krotności zderzenia	37
6.2 Rozkłady pędu poprzecznego	39
6.3 Rozkłady pseudopospieszności η	42
6.4 Rozkłady kąta azymutalnego ϕ	45
6.5 Korelacje kątowe	48
7 Pomoce do programu	54
7.1 Instrukcja obsługi	54
7.2 Dokumentacja kodu	54
8 Podsumowanie	55

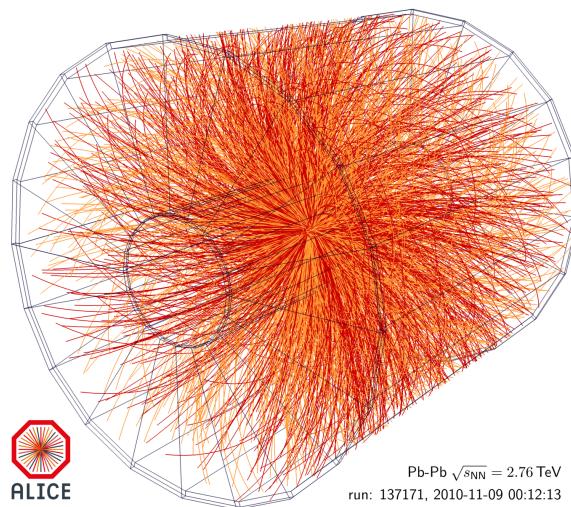
Literatura	57
Spis rysunków	59
Spis tabel	60
Załączniki	61
A Instrukcja obsługi CALM	61
B Dokumentacja CALM	61
C Kod źródłowy CALM	61

1. Wstęp

Aby lepiej zrozumieć nasz świat, naukowcy różnych dziedzin cały czas badają jego właściwości. Do zgłębiania niektórych z nich powstają wielkie instytucje naukowe pozwalające na przeprowadzanie eksperymentów o nieporównywalnie większej skali niż dotychczas. Z taką myślą powstał, między innymi, Europejski Ośrodek Badań Jądrowych CERN w Genewie w którym znajduje się największy na świecie zderzacz, nazwany Wielkim Zderzaczem Hadronów (ang. Large Hadron Collider, LHC).

LHC może przyśpieszać protony oraz czasami jony ołowiu i pozwala on na uzyskanie nieosiągalnej do tej pory energii zderzenia sięgającej nawet $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$. W wyniku kolizji powstaje pewna ilość różnych cząstek, które możemy wykryć detektorami oraz wyznaczyć m.in. ich typ, energię i kierunek poruszania się. Dane z takich kolizji są analizowane i opisywane przez fizyków z CERN w celu wyjaśnienia praw fizyki cząstek elementarnych oraz rozwoju, obecnie głównej, teorii do ich opisu - Modelu Standardowego.

Jedynym eksperymentem LHC, który został zaprojektowany do pomiaru zderzeń ciężkich jonów, jest eksperyment ALICE (ang. A Large Ion Collider Experiment) [1].



Rysunek 1-1: Obraz zderzenia jonów ołowiu o energii 2.76A TeV uzyskany z detektora ALICE. Źródło: [2].

Na rysunku 1-1 można zobaczyć obraz cząstek powstały w wyniku takiego zderzenia. W tym przypadku [2] było to 2406 cząstek z czego około 80% stanowiły piony. Detektor ALICE służy również do badania podstawowych zderzeń proton-proton, i właśnie do wyników tych zderzeń będziemy w tej pracy porównywać te uzyskane przez nas.

2. Zderzenia wysokich energii

2.1 Model Standardowy

Model Standardowy to teoria która klasyfikuje podstawowe cząstki i opisuje zasady interakcji pomiędzy nimi. Powstał na podstawie koncepcji pola Yang-Millsa z 1954 roku [3] i był regularnie rozwijany aż do współczesnej postaci. Model Standardowy opisuje trzy z czterech fundamentalnych oddziaływań które istnieją we wszechświecie: elektromagnetyczne, słabe i silne. Gravitacja, jest czwartą siłą której ów model nie zawiera.

Model Standardowy zakłada 3 typy cząstek elementarnych: kwarki, leptony oraz bozony (rysunek 2-2).

Fermiony			Bozony	
Kwarki	U górny $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 2.3 MeV/c ²	C powabny $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 1.27 GeV/c ²	t szczytowy $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 173.5 GeV/c ²	foton γ 0 0 1 91.2 GeV/c ²
	d dolny $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 4.8 MeV/c ²	S dziwny $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 95 MeV/c ²	b spodni $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 4.2 GeV/c ²	bozon Z Z^0 0 0 1 80.4 GeV/c ²
Leptony	e elektron -1 $\frac{1}{2}$ 0.511 MeV/c ²	μ mion -1 $\frac{1}{2}$ 105.7 MeV/c ²	τ taon -1 $\frac{1}{2}$ 1.777 GeV/c ²	gluon g 0 0 1 7126 GeV/c ²
	ν_e neutrino elektronowe <2.2 eV/c ²	ν_μ neutrino mionowe <170 keV/c ²	ν_τ neutrino taonowe <15.5 MeV/c ²	bozon Higgsa H^0 0 0 0 Masa ładunek Spin
	I	II	III	

Rysunek 2-2: Cząstki elementarne, z których zbudowana jest znana materia. Źródło: [4].

Kwarki i leptony zaliczamy do grupy fermionów, o spinie 1/2. Podlegają one statystyce Fermiego-Diraca oraz zakazowi Pauliego. Istnieje 6 typów kwarków oraz antykwarków, 6 leptonów oraz 6 antyleptonów. Dodatkowo fermiony podzielone są na 3 generacje. Pierwsza generacja jest najbardziej stabilna i to cząstki z niej spotykamy najczęściej. Kwarki górnego i dolnego tworzą protony i neutrony, które wspólnie z leptonem - elektronem - tworzą atomy.

2.2 Zderzenia hadronów

Model Standardowy zakłada, że każdy rodzaj oddziaływania przenoszony jest przez przenośniki siły - bozony.

- Elektromagnetyczne: przenoszone jest przez fotony.
- Słabe: przez 3 bozony W^+ W^- oraz Z^0 .
- Silne: przez 8 gluonów, które łączą kwarki w hadrony.

W Modelu Standardowym istnieje również bozon Higgsa. Jego istnienie zostało przewidziane w podstawach Modelu Standardowego przez Petera Higgsa w 1964 [5]. W 2012, dwa eksperymenty w CERN - ATLAS i CMS - potwierdziły istnienie Bozonu Higgsa [6].

Jedynie leptony mogą być obserwowane jako wolne cząstki. Występowanie kwarków jest ograniczone, nie mogą one bowiem istnieć samodzielnie lecz jedynie łączą się w układy zwane Hadronami. Systemy trzy-kwarkowe są nazywane barionami a systemy kwark-antykwark są nazywane mezonami. Gluony natomiast będące nośnikami ładunku koloru w oddziaływaniach silnych, potrafią oddziaływać również ze sobą nawzajem co jest powodem bardzo małego zasięgu oddziaływania silnego [7].

2.2 Zderzenia hadronów

Jak sama nazwa wskazuje głównym celem programu LHC są zderzenia hadronów. Wspomniany wcześniej detektor ALICE dostarczył danych, które pozwoliły badać zderzenia proton-proton o energiach $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ oraz $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ (wyniki eksperymentalne można znaleźć m.in. w Ref. [8]). Z powodu doskonałej zdolności identyfikacji cząstek, ten detektor zapewnia bardzo precyzyjne pomiary wyników takich zderzeń, które nie mogą być dokonane przez żaden inny detektor LHC. Analiza zderzeń proton-proton umożliwia analizę pewnych właściwości, które są trudniejsze przy badaniu większych systemów, np. zderzeń jonów ołowiu.

2.3 Funkcje korelacji kątowych

2.3 Funkcje korelacji kątowych

Ta praca skupia się na analizie korelacji kątowych $\Delta\eta\Delta\phi$ dla zderzeń proton-proton. Wyznaczane z tych zderzeń funkcje korelacyjne stworzone są na różnicach pseudopospieszności η oraz różnicami w kącie azymutalnym ϕ między parą cząstek. Analizowane będą korelacje dla następujących cząstek:

- piony - mezony składające się z kwarków pierwszej generacji: π^+ są skonstruowane z kwarku górnego oraz antydonnego, π^- natomiast z kwarków antygórnego i dolnego
- kaony - także mezony, K^+ składa się z kwarów górnego oraz antydziwnego, K^- z antygórnego oraz dziwnego
- protony - bariony, składają się z dwóch kwarków górnych oraz jednego dolnego, antyproton składa się z dwóch antygórnych oraz jednego antydolnego

2.3.1 Pseudopospieszność

Pseudopospieszność η jest to przeliczony kąt między kierunkiem poruszania się cząstki wytworzonej w zderzeniu a osią wiązki przed zderzeniem. Zdefiniowana jest jako:

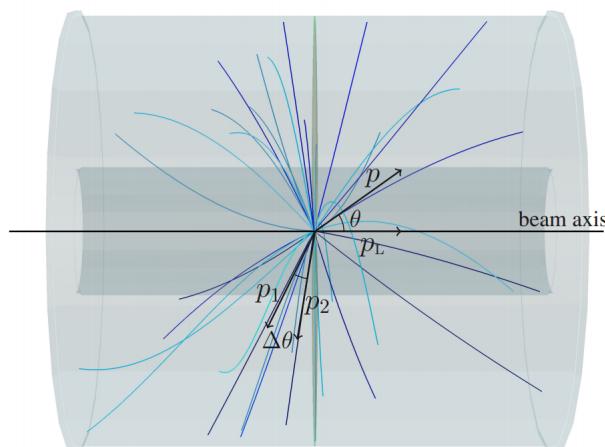
$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right], \quad (1)$$

gdzie:

θ - kąt pomiędzy p i p_L

p - pęd cząstki

p_L - składowa pędu o kierunku zgodnym z osią wiązki



Rysunek 2-3: Definicja θ i $\Delta\theta$ w geometrii detektora ALICE. Źródło: [9].

2.3 Funkcje korelacji kątowych

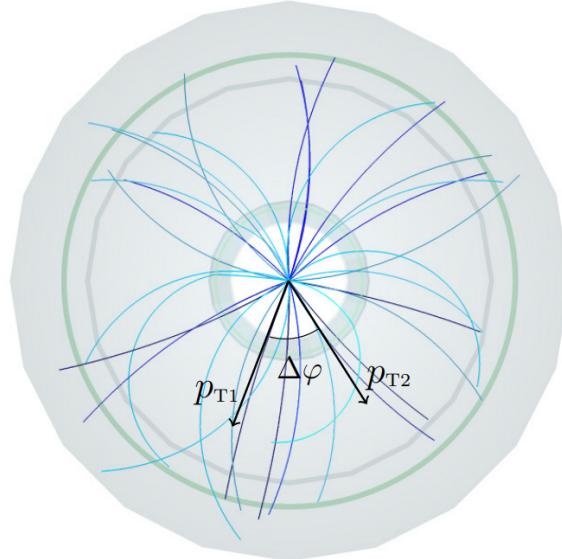
W przypadku korelacji kątowych bierzemy pod uwagę różnice pseudopospieszności pomiędzy dwoma cząstkami:

$$\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2. \quad (2)$$

2.3.2 Kąt azymutalny

Kąt azymutalny zdefiniowany jest jako składowa pędu cząstki w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki. Do uzyskania rozkładu korelacji kątowych analizować będziemy różnicę tego kąta dla dwóch cząstek:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2. \quad (3)$$



Rysunek 2-4: Definicja $\Delta\phi$ w geometrii detektora ALICE. Źródło: [9].

2.3 Funkcje korelacji kątowych

2.3.3 Konstrukcja funkcji korelacyjnej

Jak wspomniano, funkcje korelacyjne wyznacza się dla par cząstek. Dla każdej pary określa się różnicę pseudopospieszności i różnicę pomiędzy kątami azymutalnymi. Konstrukcja docelowej funkcji korelacyjnej polega na wyznaczeniu poziomu badanego sygnału oraz podzielenie go przez tło.

Rozkład sygnału $S(\Delta\eta, \Delta\phi)$ jest uzyskany przez policzenie ilości par o tych wartościach w zadanym przedziale $\Delta\eta$ i $\Delta\phi$, gdzie każda cząstka ze zdarzenia została sparowana z każdą inną cząstką z tego zderzenia:

$$S(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{d^2 N_{pairs}^{signal}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}. \quad (4)$$

Gdzie całkowita liczba par zadana jest równaniem:

$$N_{pairs}^{signal} = N \cdot (N - 1), \quad (5)$$

gdzie:

N - liczba wszystkich cząstek w zderzeniu.

Rozkład tła $B(\Delta\eta, \Delta\phi)$ szacuje się tworząc pary cząstek, które nie mogły ze sobą fizycznie oddziaływać. W tej pracy do tego celu użyto znanej metody *mieszanie przypadków* (ang. event mixing). Polega ona na dobraniu, że wszystkich cząstek, pary, która będzie złożona z cząstek z różnych zderzeń. Dzięki temu nie będą one fizycznie skorelowane, a co za tym idzie taka para nie będzie niosła żadnej przydatnej informacji poza efektami akceptancji detektora. Żeby ulepszyć rozkład tła, każda cząstka jest miksuwana z dziesięcioma innymi i zapisywana jest każda taka korelacja.

$$B(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{d^2 N_{pairs}^{bckg}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}, \quad (6)$$

gdzie:

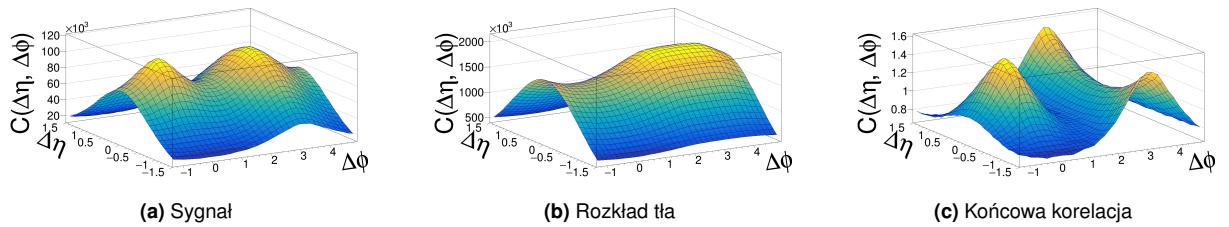
N_{pairs}^{bckg} - liczba par tła.

Wyznaczenie powyższych pozwala zdefiniować rozkład funkcji korelacyjnej:

$$C(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{N_{pairs}^{bckg}}{N_{pairs}^{signal}} \frac{S(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B(\Delta\eta, \Delta\phi)}. \quad (7)$$

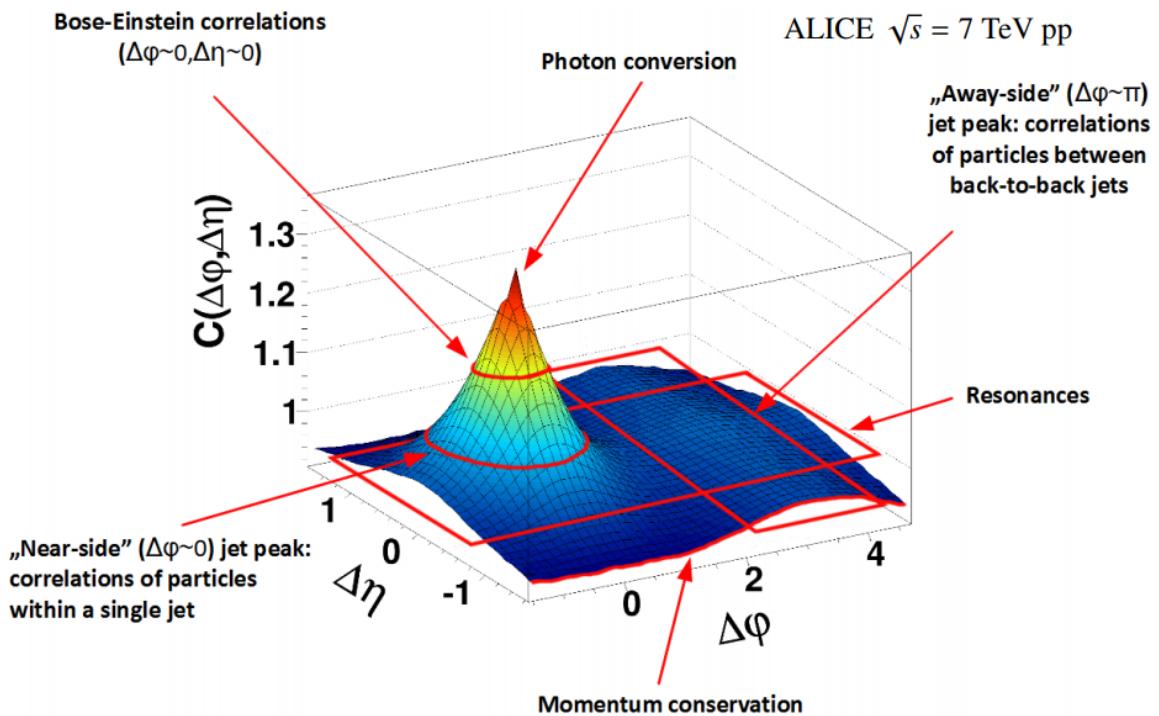
Na rysunku 2-5 przedstawiono kolejne etapy tworzenia rozkładu funkcji korelacyjnej.

2.3 Funkcje korelacji kątowych



Rysunek 2-5: Przykład tworzenia wykresu funkcji korelacyjnej.

Wiele efektów fizycznych ma wpływ na kształt funkcji korelacyjnych. Końcowy wygląd tej funkcji $C(\Delta\eta, \Delta\phi)$ jest połączeniem ich wszystkich, dlatego analiza tego kształtu może dostarczyć dużą ilość informacji o naturze cząstek elementarnych. Na rysunku 2-6 przedstawiono udział niektórych czynników na wykres przykładowej funkcji korelacyjnej.



Rysunek 2-6: Udział poszczególnych czynników w kształcie funkcji korelacyjnych w zderzeniach proton-proton o energii $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$. Źródło: [10].

2.4 Zasady zachowania w zderzeniach hadronów

2.4 Zasady zachowania w zderzeniach hadronów

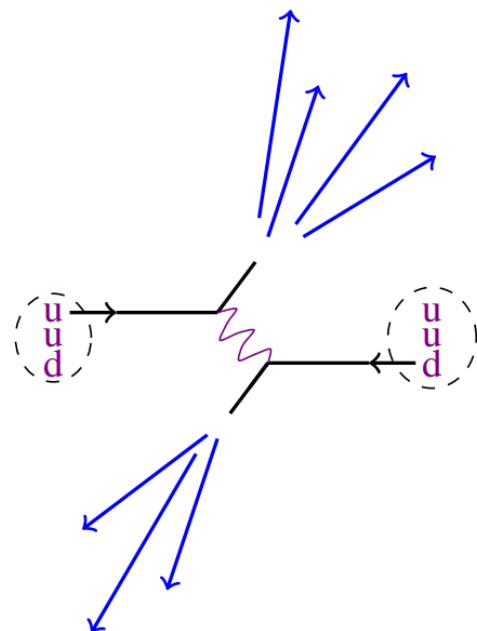
Zasady zachowania powinny być respektowane przez każde zderzenie niezależnie oraz również przez cząstki utworzone w jego wyniku. Jednak nie wszystkie rodzaje cząstek muszą przestrzegać wszystkich praw zachowania. Na przykład tylko bariony (protony) muszą przestrzegać zasad zachowania liczby barionowej. W tablicy 1 przedstawiono, które zasady zachowania przestrzegają badane cząstki.

Cząstki	Zasady zachowania			
	Pędzu	Ładunku	Dziwności	Liczby barionowej
Piony	✓	✓		
Kaony	✓	✓	✓	
Protony	✓	✓		✓
Lambdy	✓	–	✓	✓

Tablica 1: Przestrzeganie zasad zachowania przez badane rodzaje cząstek.

2.5 Minidżety

W procesie zderzania protonów większość wytworzonych cząstek rozprasza się tworząc, tak zwane, minidżety (ang. minijets). Minidżety są to grupy cząstek poruszających się w bardzo podobnym kierunku ($\Delta\eta, \Delta\phi \approx (0,0)$). Na rysunku 2-7 przedstawiono schemat tworzenia się minidżetów w zderzeniu.



Rysunek 2-7: Schemat tworzenia minidżetów. Źródło: [9].

3. ConservAtion Laws Model

ConservAtion Laws Model [11], w skrócie CALM, jest modelem typu Monte Carlo służącym do badania kształtu funkcji korelacji kątowych, stworzonych pod wpływem wyłącznie zasad zachowania obecnych w reakcjach jądrowych. Pierwotna wersja programu napisana została przez mgr inż. Annę Zaborowską oraz mgr inż. Piotra Modzelewskiego na potrzeby ich prac dyplomowych [9, 12] na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Program napisany został w języku C++ wykorzystując biblioteki CERN Root [13] oraz bazuje na architekturze generatora TERMINATOR [14].

3.1 Modele Monte Carlo

Modele Monte Carlo to takie, w których do zamodelowania zjawiska główną rolę odgrywa losowanie pewnych wielkości charakteryzujących to zjawisko. Losowanie opiera się o znane rozkłady prawdopodobieństwa.

Poprzez losowanie CALM uzyskuje następujące parametry:

- Krotności rodzajów cząstek (ilość pionów, kaonów, itd.)
- Typ cząstki (np. czy π^+ czy π^- czy π^0)
- Kierunek poruszania się cząstki
- Energię cząstki
- Która cząstka wejdzie w skład którego dżetu (dzielenie cząstek na dżety)
- Energię zderzenia

Aby uzyskać parametr program losuje parametry pośrednie a następnie sprawdza czy wynik jest zgodny z założeniami modelu, w przypadku CALM - czy są spełnione zasady zachowania.

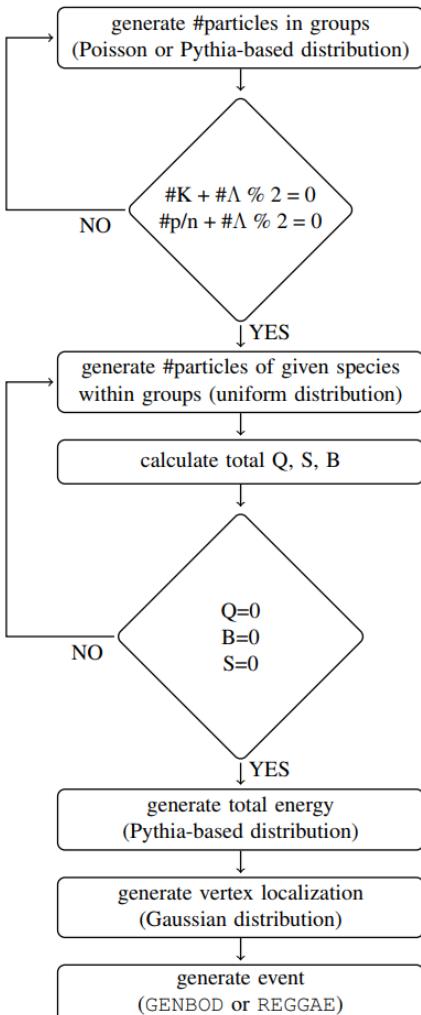
3.2 Schemat działania

Jeden z twórców modelu opisuje, w swojej pracy [12], proces tworzenia wyników zderzenia przez CALM. Można go podzielić na 4 etapy:

1. Zdefiniowanie cząstek wynikających ze zderzenia (opis w sekcji 3.2.1)
2. Ustalenie energii całkowitej zderzenia do rozdzielenia (opis w sekcji 3.2.2)
3. Wygenerowanie zdarzenia poprzez rozwiązanie problemu N ciał (opis w sekcji 3.2.3)
4. Zdefiniowanie lokalizacji wierzchołków (opis w sekcji 3.2.4)

Na rysunku 3-8 przedstawiono schemat generowania jednego zderzenia przez CALM.

3.2 Schemat działania



Rysunek 3-8: Algorytm generujący cząstki dla jednego zderzenia w CALM. Źródło: [12].

3.2.1 Zdefiniowanie cząstek wynikających ze zderzenia

CALM produkuje 13 typów hadronów, które można podzielić na 4 rodzaje:

- Piony (π^+ , π^0 , π^-)
- Kaony (K^+ , K^0 , \bar{K} , K^-)
- Nukleony (p , \bar{p} , n , \bar{n})
- Lambdy (Λ , $\bar{\Lambda}$)

Ilość cząstek danego rodzaju losowana jest z ustalonego rozkładu. Użytkownik może wybrać: czy chce aby CALM używa do tego rozkładu Poissona o średniej obliczonej, dla każdego rodzaju, w eksperymencie ALICE; czy woli aby rozkłady były zdefiniowane poprzez funkcje wyznaczone dzięki wynikom z generatora PYTHIA.

3.2 Schemat działania

Po wylosowaniu CALM sprawdza czy liczba cząstek dziwnych (lambdy i kaony) oraz barionów (lambdy i nukleony) jest parzysta, w przeciwnym razie, sprawdzane w następnym kroku zasady zachowania liczby barionowej oraz dziwności nie mają prawa się zgodzić.

Dalej CALM losuje typ dla każdej cząstki (prawdopodobieństwo na każdy typ jest takie samo) i sprawdza czy zostały spełnione zasady zachowania obecne w reakcjach jądrowych (tabela 1). Oblicza wtedy sumę ładunku, liczby barionowej oraz dziwności i weryfikuje czy każda z nich jest równa zero. Jeśli tak nie jest CALM powtarza losowanie typów dopóki warunek ten nie będzie spełniony.

3.2.2 Ustalenie energii całkowej zderzenia do rozdzielenia

Model wyznacza każdej z cząstek energię kinetyczną z ustalonej funkcji rozkładu energii. Zsumowana energia wszystkich cząstek nie może przekraczać zdefiniowanej energii maksymalnej zderzenia, jeśli jednak tak się stanie CALM powtarza ostatnią czynność.

3.2.3 Wygenerowanie zdarzenia poprzez rozwiązanie problemu N ciał

Wygenerowane wcześniej lista cząstek oraz całkowita ich energia posłużą do wygenerowania rozkładu przestrzennego cząstek. W CALM zaimplementowano dwa generatory Monte Carlo zdolne wykonać to zadanie.

Pierwszy z nich nazwany *GENBOD* został napisany w latach 70. bazując na pracy F. Jamesa [15]. *GENBOD* oferuje utworzenie rozkładu przestrzennego dla maksymalnie 18-stu cząstek w zderzeniu i został zawarty w klasie *TGenPhaseSpace* należącej do CERN Root [13].

Drugi nazwany *REGGAE* (ang. REscatterig-after-Genbod GenerAtor of Events) [16] to nowszy algorytm bazujący na *GENBOD* jednakże oferuje znacznie szybszą symulację oraz jest przystosowany do obsługi zderzeń o większej krotności cząstek.

3.2.4 Zdefiniowanie lokalizacji wierzchołków

Lokalizacja głównego wierzchołka w kierunkach x, y i z jest generowana z rozkładu Gaussa ze średnią wartością 0 cm i odchyleniem standardowym 5 cm. Następnie program zapisuje wyniki do pliku *root* w strukturze *TTree*.

3.3 Opcje CALM

3.3 Opcje CALM

Tak jak wcześniej wspomniano CALM korzysta z dwóch generatorów Monte Carlo, *GENBOD* oraz *REGGAE* (opcje *Global*). Oprócz możliwości wyboru między nimi model oferuje również zdolność przeprowadzenia symulacji tworzenia minidżetów. Możliwe jest zamodelowanie produkcji dwóch minidżetów w oparciu o sprawdzone wcześniej zasady zachowania (opcje *Minijets*) oraz można wymusić na programie aby owe zasady były zachowane również dla każdego minidżetu z osobna (opcje *MinijetsLocal*). Aby to osiągnąć CALM losowo dzieli cząstki na dwie grupy oraz dodaje ich cząstkom pęd w przeciwnych kierunkach. Jeśli użytkownik wybierze opcję *MinijetsLocal* wtedy dodatkowo sprawdzane są zasady zachowania indywidualnie dla każdego dżetu i w przypadku negatywnego wyniku testu dzielenie cząstek na grupy odbywa się ponownie aż do zamierzzonego skutku.

Można zatem powiedzieć, że CALM pozwala uzyskiwać wyniki zderzenia w sześciu opcjach, gdzie każda z nich ma jedną tworzącą podobne wyniki tylko w inny sposób (przy pomocy innego generatora MC):

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">■ GlobalReggae■ MinijetsReggae■ MinijetsLocalReggae | <ul style="list-style-type: none">■ Global■ Minijets■ MinijetsLocal |
|---|---|

3.4 Tpi

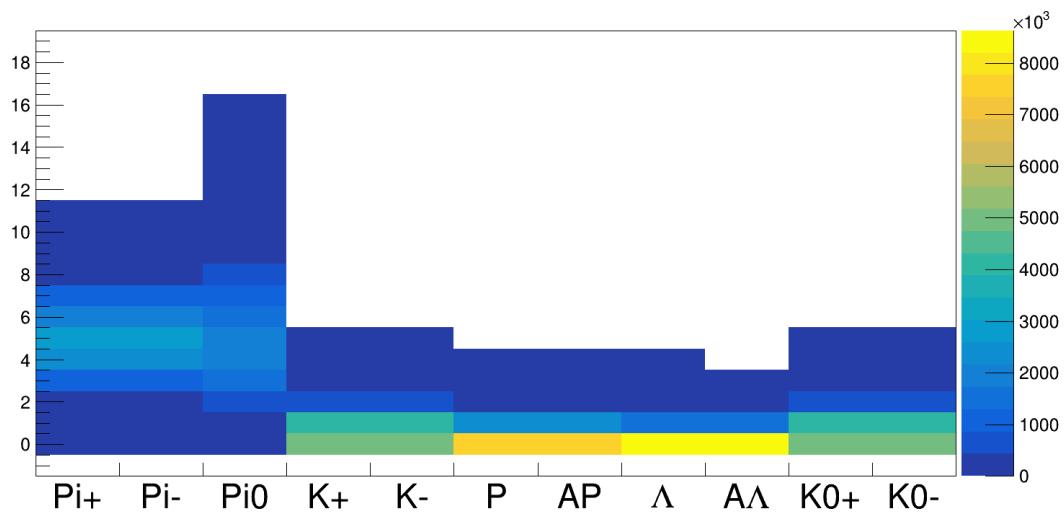
Na wyjściu z CALM otrzymujemy tylko plik z danymi cząstek, potrzebne jest zatem jeszcze narzędzie do jego analizy. W tej pracy użyto programu *Tpi* [17] autorstwa prof. dr hab. inż. Adama Kisiela i wykorzystanego również przez jednego z twórców modelu CALM Piotra Modzelewskiego w pracy dyplomowej [12].

Tpi przyjmuje listę plików *root* od CALM oraz parametry określające m.in. jaki typ korelacji chcemy zbadać. Z dostarczonych danych program wylicza surowe wykresy i zapisuje je do klas *Root* [13], te z kolei do pliku *root*. Funkcje korelacyjne program wylicza sposobem opisany w sekcji 2.3.3.

3.5 Wyniki CALM

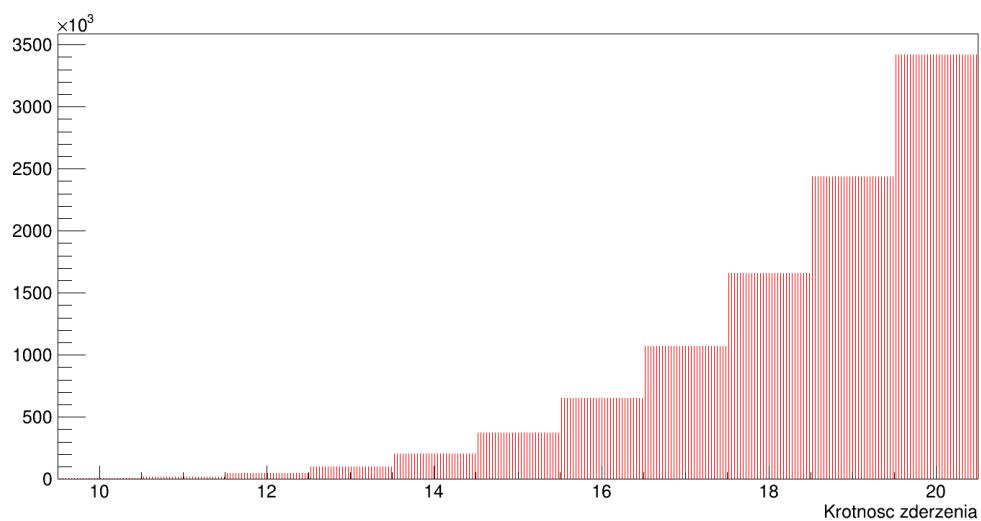
3.5 Wyniki CALM

Wykonano symulację zderzeń protonów używając opcji Global REGGAE. Z analizy pliku przez Tpi odczytano statystykę krotności, występowania cząstek w zderzeniach, w zależności od rodzaju cząstki (rysunek 3-9).



Rysunek 3-9: Rozkład występowania krotności danej cząstki dla opcji Global REGGAE.

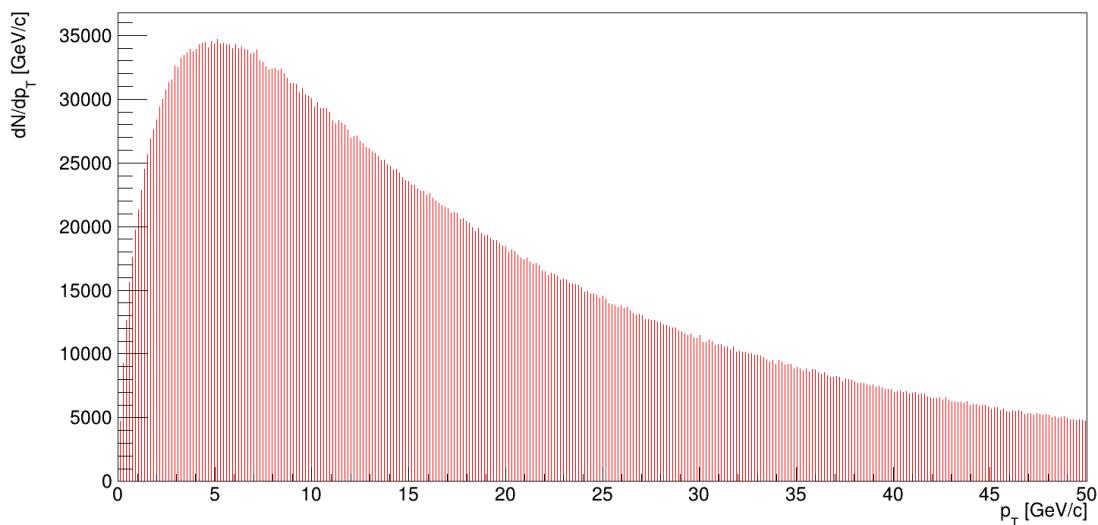
Oraz ogólną liczbę cząstek (krotność) w zderzeniu (rysunek 3-10).



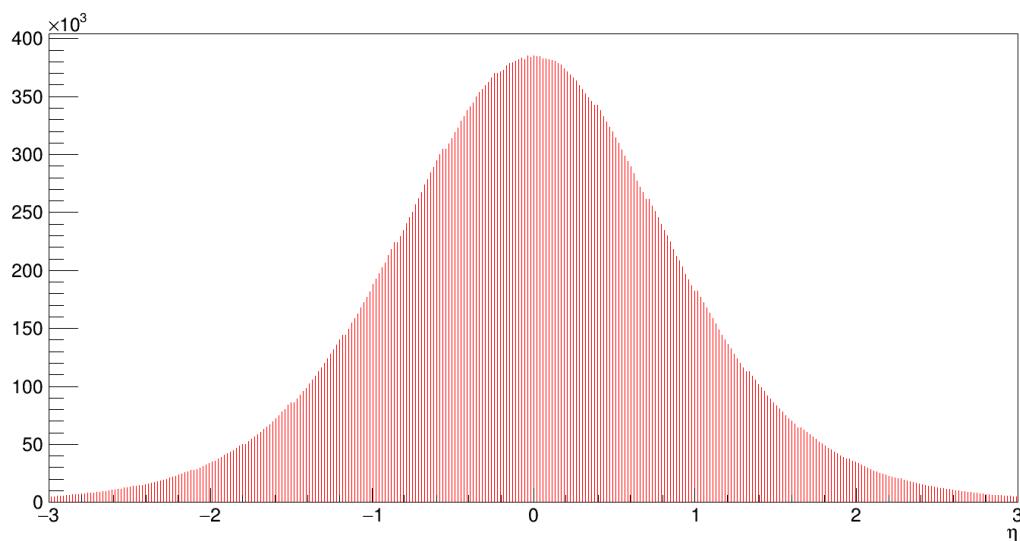
Rysunek 3-10: Rozkład występowania krotności zderzenia dla opcji Global REGGAE.

3.5 Wyniki CALM

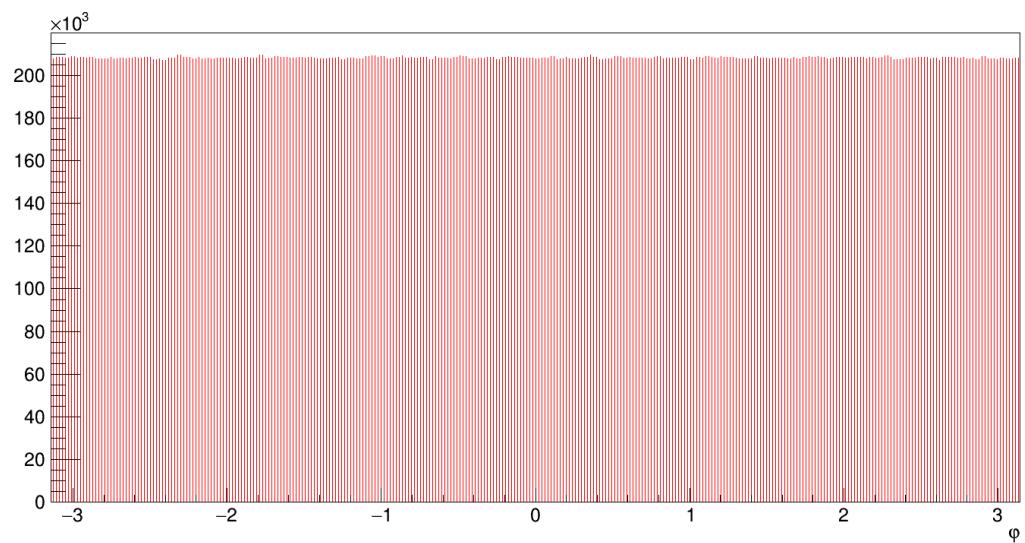
Na wykresie 3-9 widać, że najczęściej spotykanymi cząstkami po zderzeniu LHC są piony, które dzięki temu dadzą najlepszą statystykę do analizy. Na rysunkach 3-11, 3-12 oraz 3-13 przedstawiono rozkłady trzech ważnych wielkości: pędzu, pseudopośpieszności oraz kąta azymutalnego dla pionów dodatnich. Można zauważyc, że przy używanych parametrach modelu uzyskane rozkłady nie odpowiadają rozkładom uzyskanym eksperymentalnie.



Rysunek 3-11: Rozkład pędu π^+ .



Rysunek 3-12: Rozkład pseudopośpieszności dla π^+ .

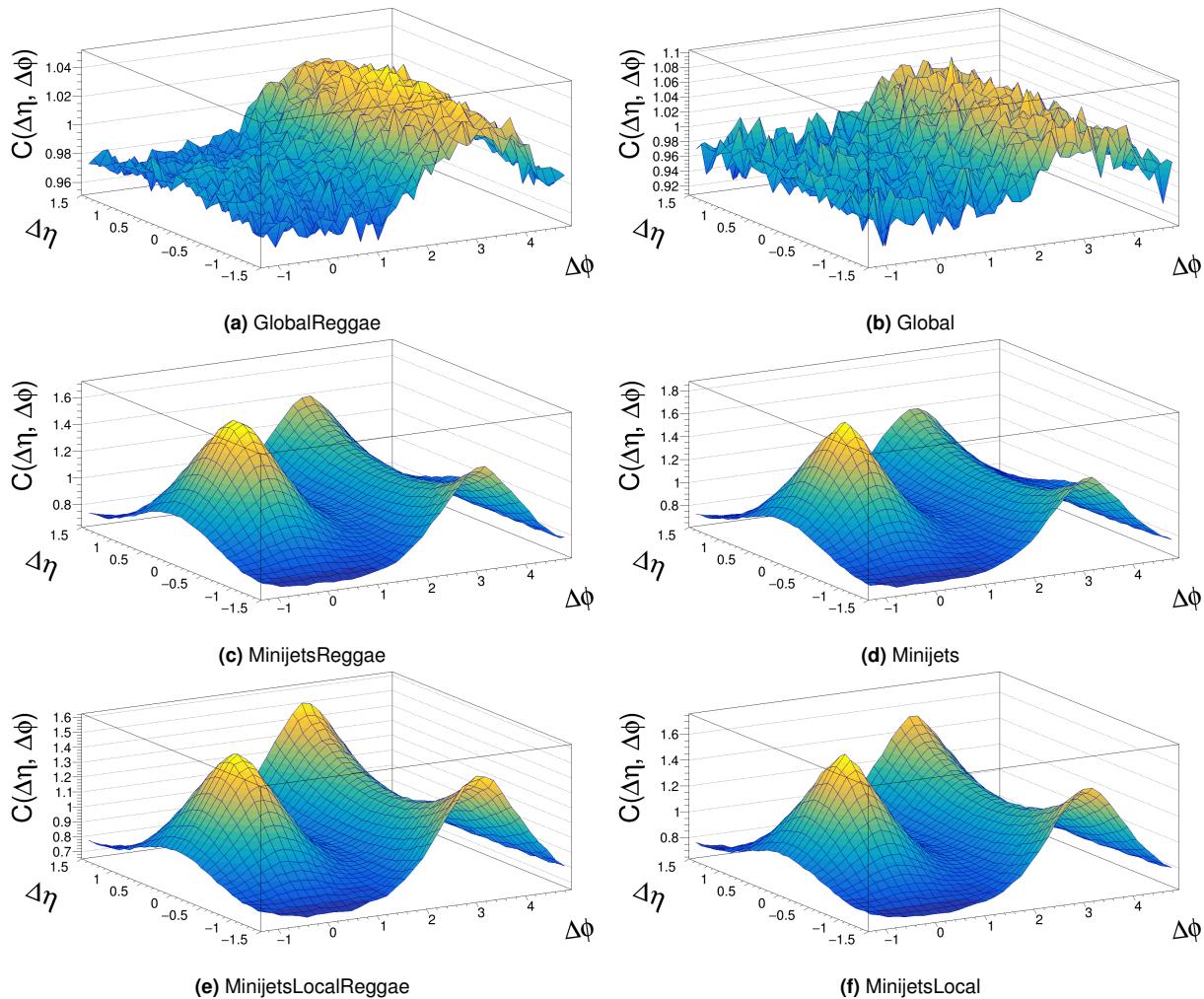


Rysunek 3-13: Rozkład kąta azymutalnego dla π^+ .

4. Rozkłady funkcji korelacyjnych

W tym rozdziale przedstawiono wykresy funkcji korelacyjnych utworzonych z wyników pierwotnej wersji generatora. Ustawiono energię maksymalną zderzenia na 7000 GeV oraz przedział krotności zderzenia na od 10 do 20 częstek. Wygenerowano 2 miliony zderzeń dla opcji Global (ze względu na wydłużony czas generacji dla tej opcji) oraz po 10 milionów dla pozostałych. Do tych wykresów, w następnych rozdziałach, będą porównywane te uzyskane z generatora po modyfikacjach.

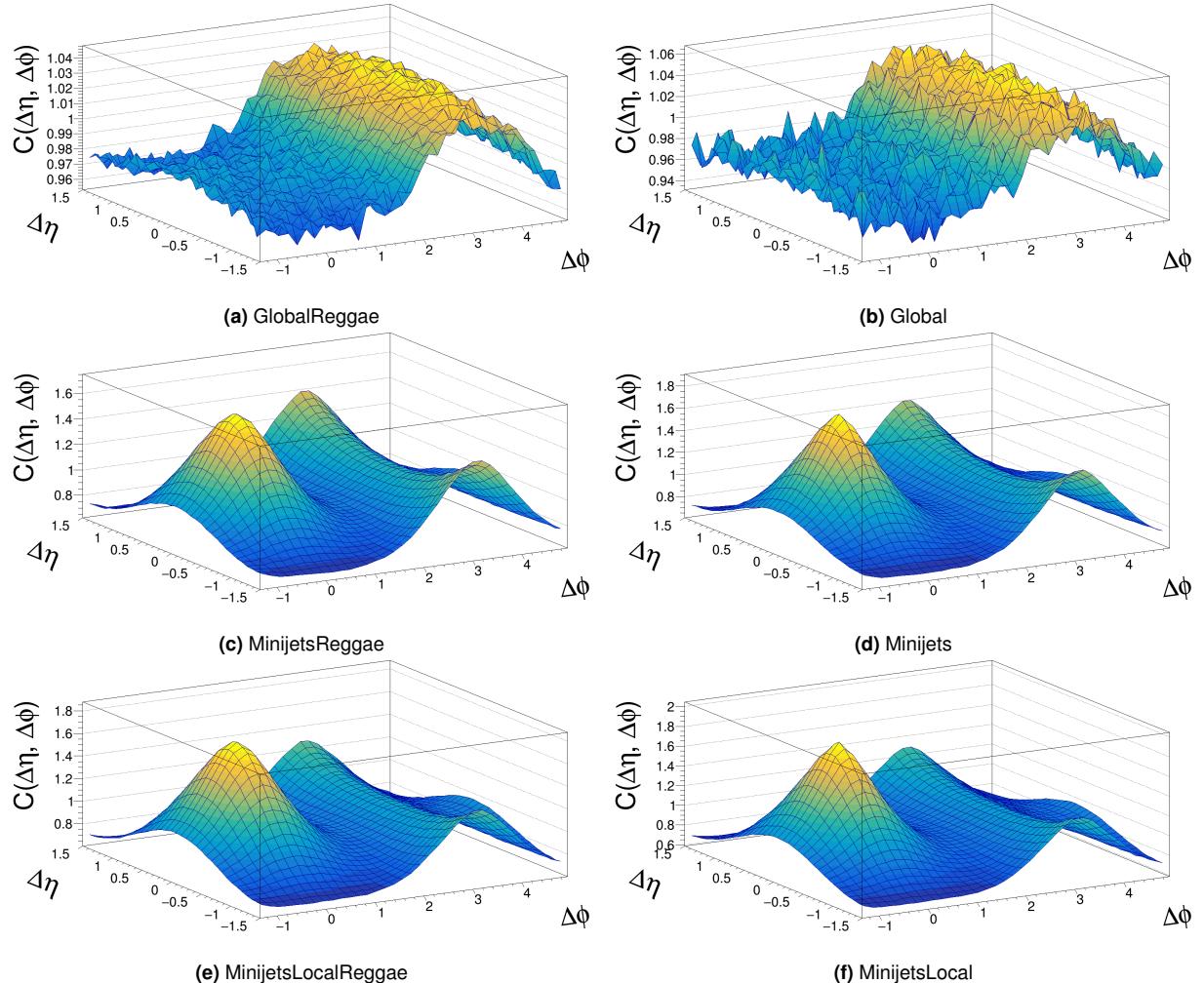
4.1 Korelacje $\pi^+ \pi^+$



Rysunek 4-14: Wykresy korelacji kątowych $\pi^+ \pi^+$.

Na rysunku 4-14 widać funkcje korelacyjne $\pi^+ \pi^+$ w przestrzeni $\Delta\phi \Delta\eta$ dla sześciu różnych ustawień generatora.

4.2 Korelacje $\pi^+\pi^-$

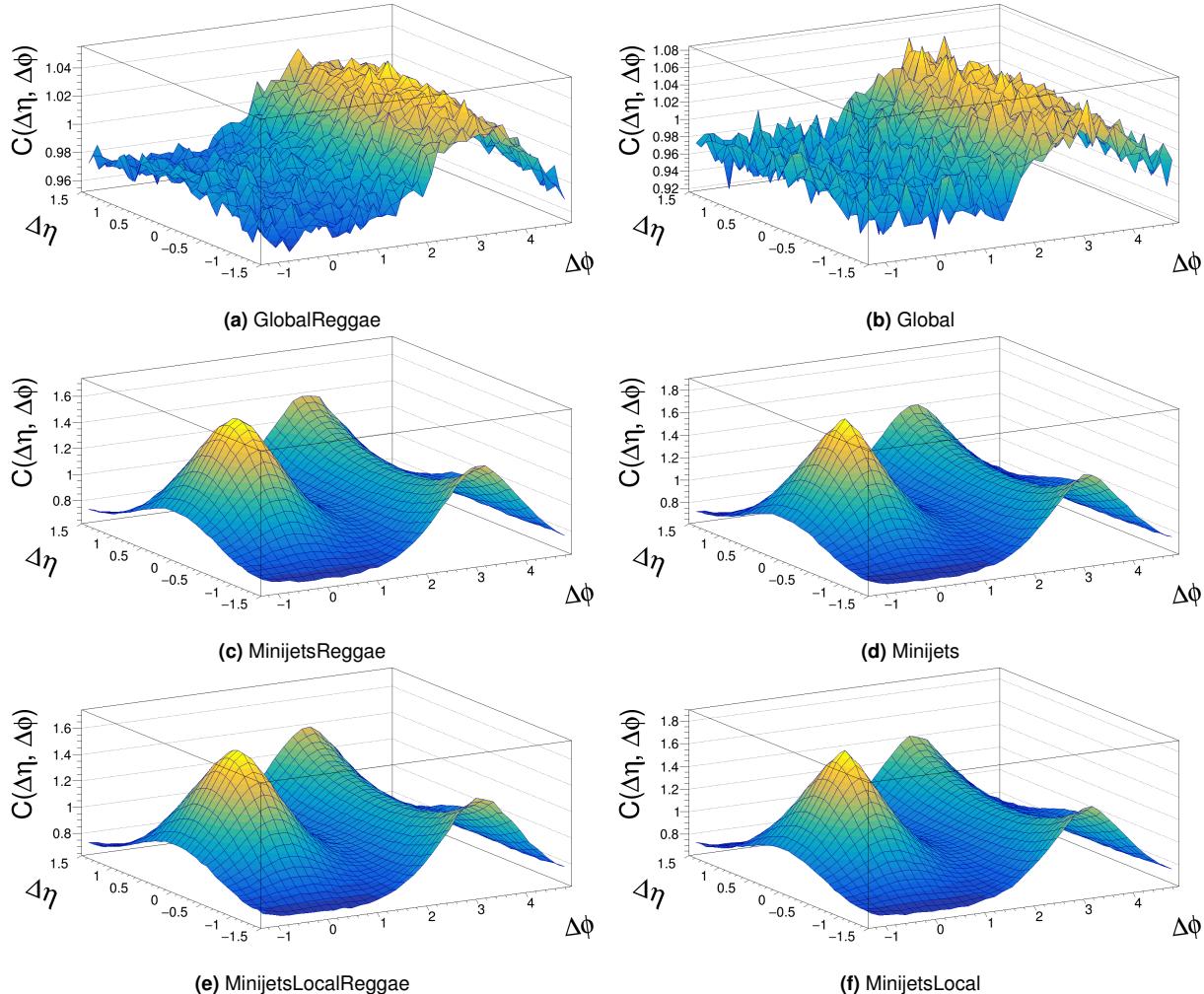


Rysunek 4-15: Wykresy korelacji kątowych $\pi^+\pi^-$.

Na rysunku 4-15 widać funkcje korelacyjne $\pi^+\pi^-$ w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla sześciu różnych ustawień generatora.

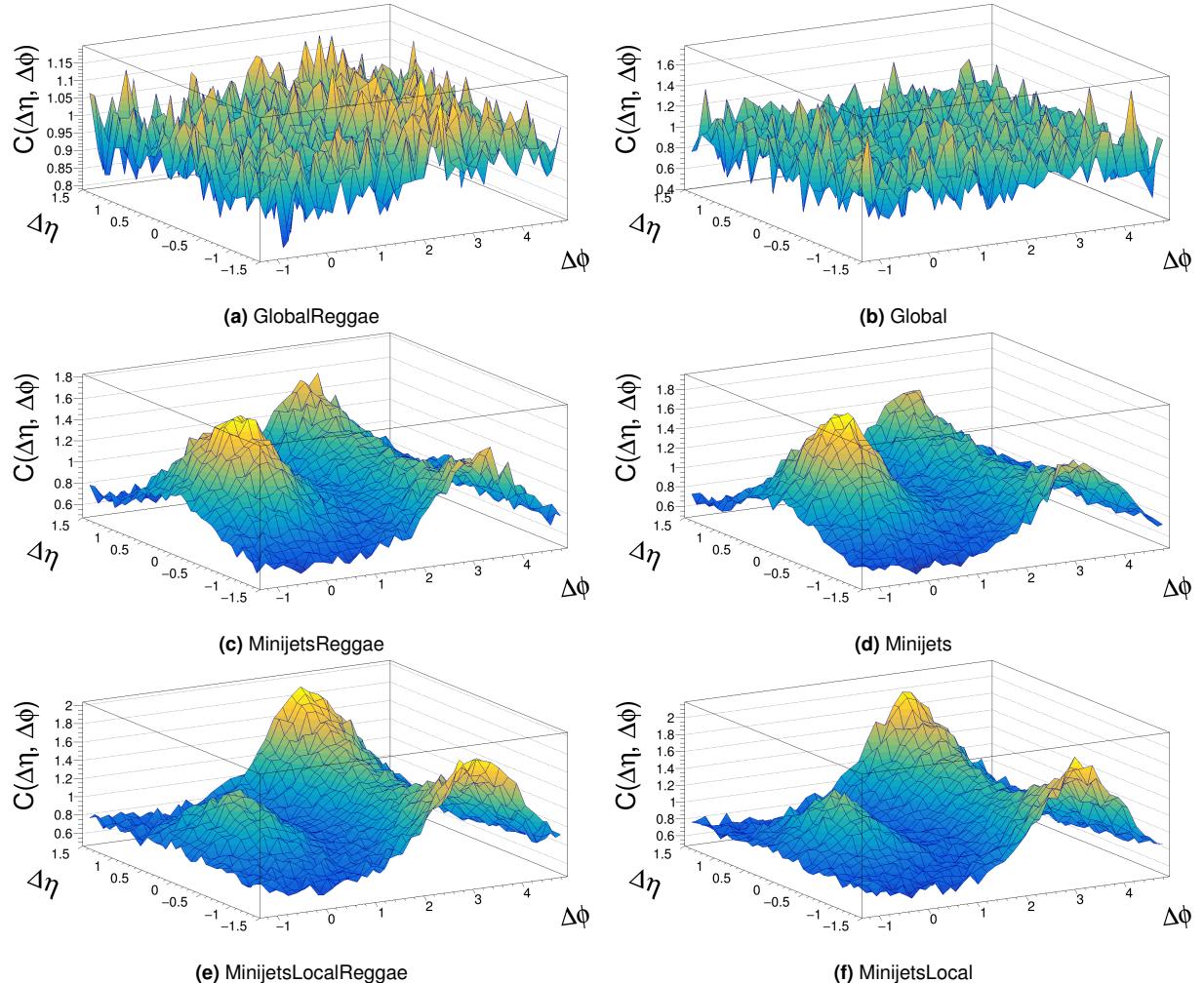
4.3 Korelacje $\pi^0\pi^0$

4.3 Korelacje $\pi^0\pi^0$



Rysunek 4-16: Wykresy korelacji kątowych $\pi^0\pi^0$.

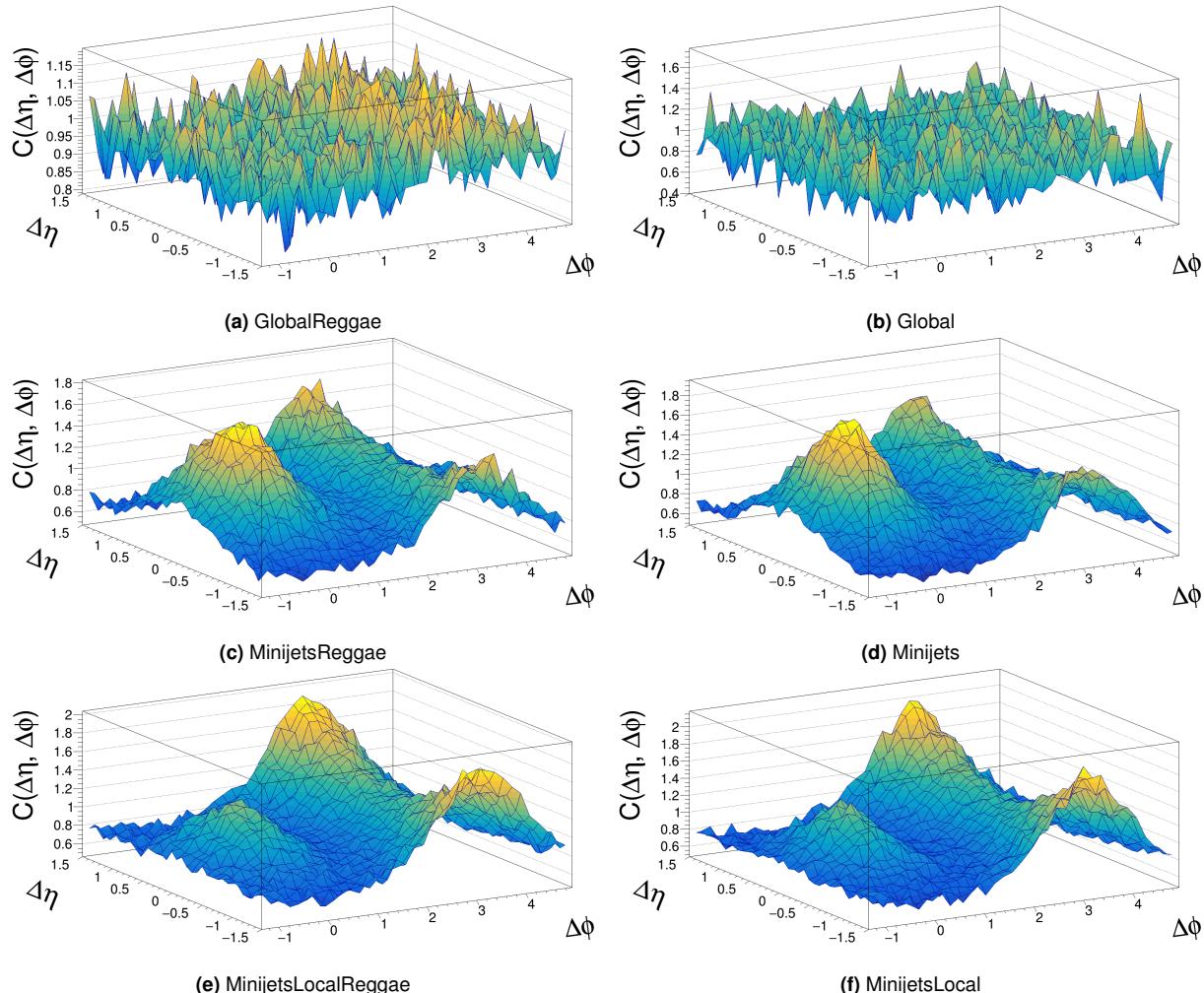
Na rysunku 4-16 widać funkcje korelacyjne $\pi^0\pi^0$ w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla sześciu różnych ustawień generatora.

4.4 Korelacje K^+K^+

 Rysunek 4-17: Wykresy korelacji kątowych K^+K^+ .

Na rysunku 4-18 widać funkcje korelacyjne K^+K^+ w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla sześciu różnych ustawień generatora.

4.5 Korelacje pp

4.5 Korelacje pp



Rysunek 4-18: Wykresy korelacji kątowych pp .

Na rysunku 4-18 widać funkcje korelacyjne pp w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla sześciu różnych ustawień generatora.

5. Modyfikacje kodu

5.1 Modularyzacja kodu źródłowego

Kod źródłowy został poddany uporządkowaniu w celu łatwiejszego odnajdywania się w nim osób chcących wprowadzać modyfikacje oraz takich, które wcześniej nie miały do czynienia z CALM.

Wydzielone metody:

- Wylosowanie krotności rodzajów cząstek (π, K, p, Λ) i sprawdzenie czy zasady zachowania mogą być spełnione (czy liczba barionów oraz liczba cząstek dziwnych są podzielne przez 2)
- Wylosowanie typu cząstki (np. K^+, K^-) i sprawdzenie czy są spełnione zasady zachowania
- Wylosowanie lokalizacji wierzchołków
- Wylosowanie energii dla każdej cząstki i sprawdzenie czy sumaryczna energia jest mniejsza niż dopuszczalna energia całkowita
- Pobranie mas poszczególnych cząstek z bazy danych
- Losowe podzielenie cząstek na dżety (Minijets i MinijetsLocal)
- Rozdysytrybuowanie energii na zdarzenie (Global i Minijets)
- Wygenerowanie rozkładu przestrzennego cząstek, odfiltrowanie najmniej prawdopodobnych przypadków (Global i Minijets)
- Rozdysytrybuowanie energii na zdarzenie, wygenerowanie rozkładu przestrzennego i sprawdzenie czy nie powstała ujemna energia (GlobalReggae i MinijetsReggae)
- Zapisanie wszystkich cząstek do tablicy wynikowej, która zostanie następnie zapisana do pliku (Global, Minijets, GlobalReggae, MinijetsReggae)

Nazwy w nawiasach oznaczają, że dana metoda przebiega inaczej dla podanych typów symulacji, a co za tym idzie zostały wydzielone osobne funkcje dla każdego z tych typów.

5.2 Wprowadzenie plików konfiguracyjnych

5.2 Wprowadzenie plików konfiguracyjnych

Dodatkowe pliki konfiguracyjne miały służyć większej swobodzie w kwestii doboru parametrów, których CALM używa w poszczególnych fazach symulacji. Dodano jeden plik config.ini, w którym wydzielono z kodu następujące parametry:

- Wydajność tworzenia się rodzaju cząstek - współczynnik średniej rozkładu Gaussa, zdefiniowany dla każdego rodzaju cząstki
- Wydajność tworzenia się cząstek - współczynnik średniej rozkładu Gaussa, mnożnik dla wszystkich rodzajów
- σ dla rozkładów gausa z których losowana jest lokalizacja wierzchołków
- Dzielnik energii, który determinuje jaka część wylosowanej energii cząstki zostanie przypisana pędowi cząstki a jaka na "pęd dżetowy"(używane tylko dla minidżetów)
- Funkcje rozkładów do losowania krotności cząstek (pionów, kaonów, nukleonów i lambd), dla losowania z własnych rozkładów
- Przedziały rozkładów do losowania krotności cząstek, dla losowania z własnych rozkładów
- Funkcja rozkładu do losowania energii cząstki
- Przedziały rozkładu do losowania energii cząstki
- Maksymalna energia całkowita zdarzenia
- Parametr mówiący o tym czy chcemy korzystać z własnych rozkładów (podanych w pliku) czy z Poissona o średniej licznej przy użyciu wydajności tworzenia cząstek (podanych w pliku)

Zamieniono również możliwość korzystania z rozkładów Pythia (więcej informacji w sekcji 3.2.1) na możliwość korzystania z rozkładów własnych, ponieważ będące w pliku konfiguracyjnym funkcje, można dowolnie zdefiniować.

```
[Multipliers]  
# charged particle yields per rapidity unit from 900 GeV  
# default: 1.493,0.183,0.083,0.048  
# data from http://arxiv.org/pdf/1504.00024v1.pdf (ALICE),  
# lambdas from http://arxiv.org/pdf/1012.3257v2.pdf (ALICE)  
Nmean = 1.493,0.183,0.083,0.048  
  
# Interval of rapidity, rapidity <-2.5;2.5>  
# default: 5  
RapidityInterval = 5  
  
# standard deviation of three dimensional gaussian distribution  
# default: 5.,5.,5.  
XYZ = 5.,5.,5.
```

5.2 Wprowadzenie plików konfiguracyjnych

```
# divideEn[0]: energy of particles, divideEn[1]: boostenergy
# default: 1,1
divideEn = 1,1

[Distributions]
# TF1("title", Distr, xMin, xMax)
# default custom distribution functions taken from PYTHIA
# custom distribution function for pions
# default: 0.334508*TMath::Gaus(x,56.8221,23.5326)*
# (5.97354e-07*x*x*x-8.88401e-05*x*x+0.00434252*x-0.0274243)
pionsMultDistr = 0.334508*TMath::Gaus(x,56.8221,23.5326)*
(5.97354e-07*x*x*x-8.88401e-05*x*x+0.00434252*x-0.0274243)
# custom distribution function minimum range for pions
# default: 8
pionsMultDistr_xMin = 8
# custom distribution function maximum range for pions
# default: 150
pionsMultDistr_xMax = 150

[...]

# energy distribution function for all particles
# default: 0.922477*(TMath::Power(x+2.15717,-1.57383)-1.40499e-05)
singleEnergyDistr = 0.922477*(TMath::Power(x+2.15717,-1.57383)-1.40499e-05)
# energy distribution function minimum range for for all particles
# default: 0.4
singleEnergyDistr_xMin = 0.4
# energy distribution function maximum range for for all particles
# default: 1100
singleEnergyDistr_xMax = 1100

[Rest of parameters]
# custom distribution for particles yield (pions, kaons, nucleons, lambdas)
# 1: YES, 0: NO
# default: 0
customMult = 0
```

Rysunek 5-19: Fragment wprowadzonego pliku konfiguracyjnego.

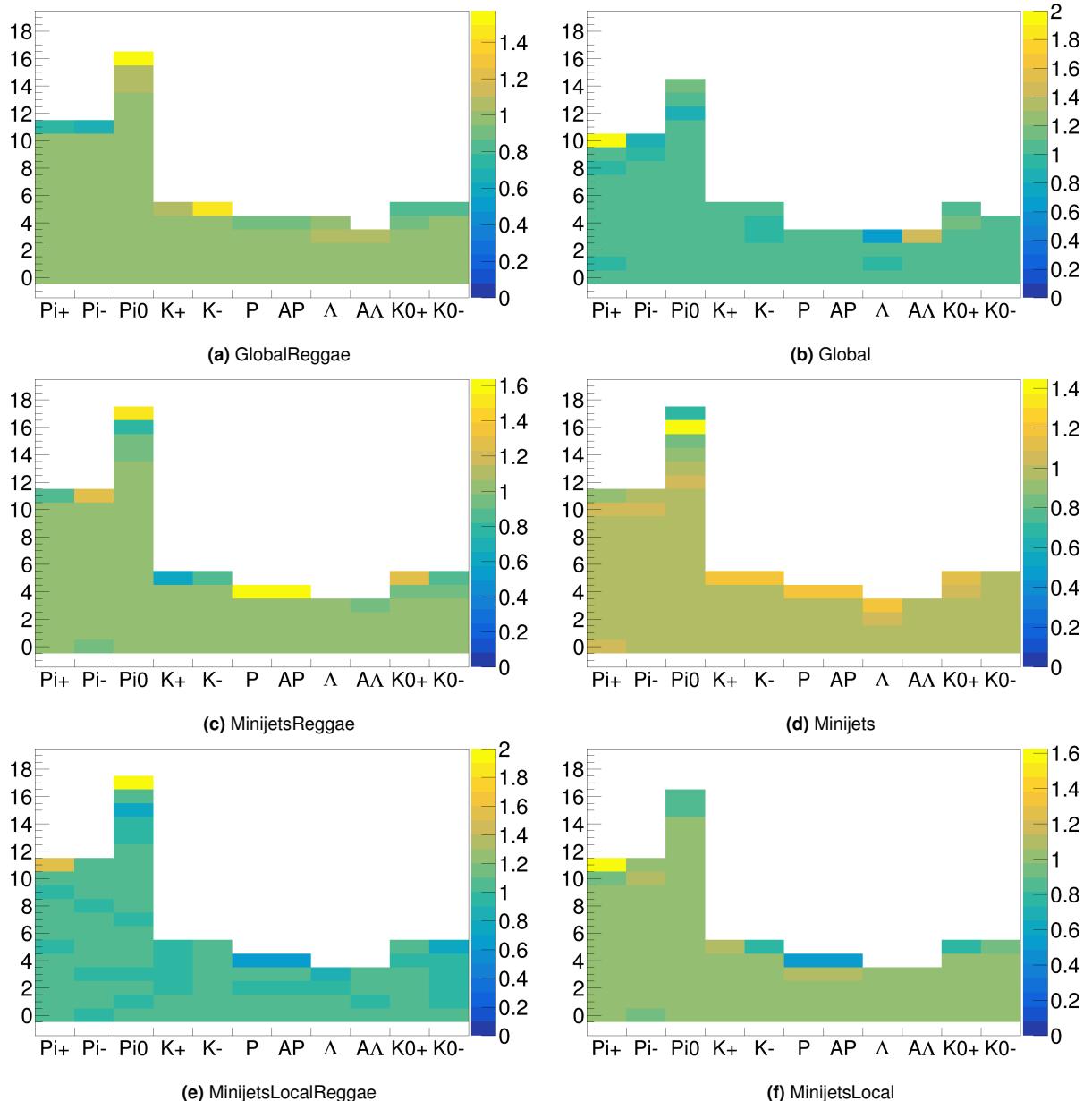
Na rysunku 5-19 przedstawiono wygląd wprowadzonego pliku konfiguracyjnego z wyodrębnionymi parametrami i ich opisami.

6. Testy programu

W tej sekcji przedstawiono wyniki testów programu po wykonanych modyfikacjach, opisanych w poprzednim rozdziale. Ponownie wygenerowano 2 miliony zderzeń dla opcji Global oraz po 10 milionów dla pozostałych, a następnie przygotowano wykresy porównawcze.

6.1 Wykresy krotności zderzenia

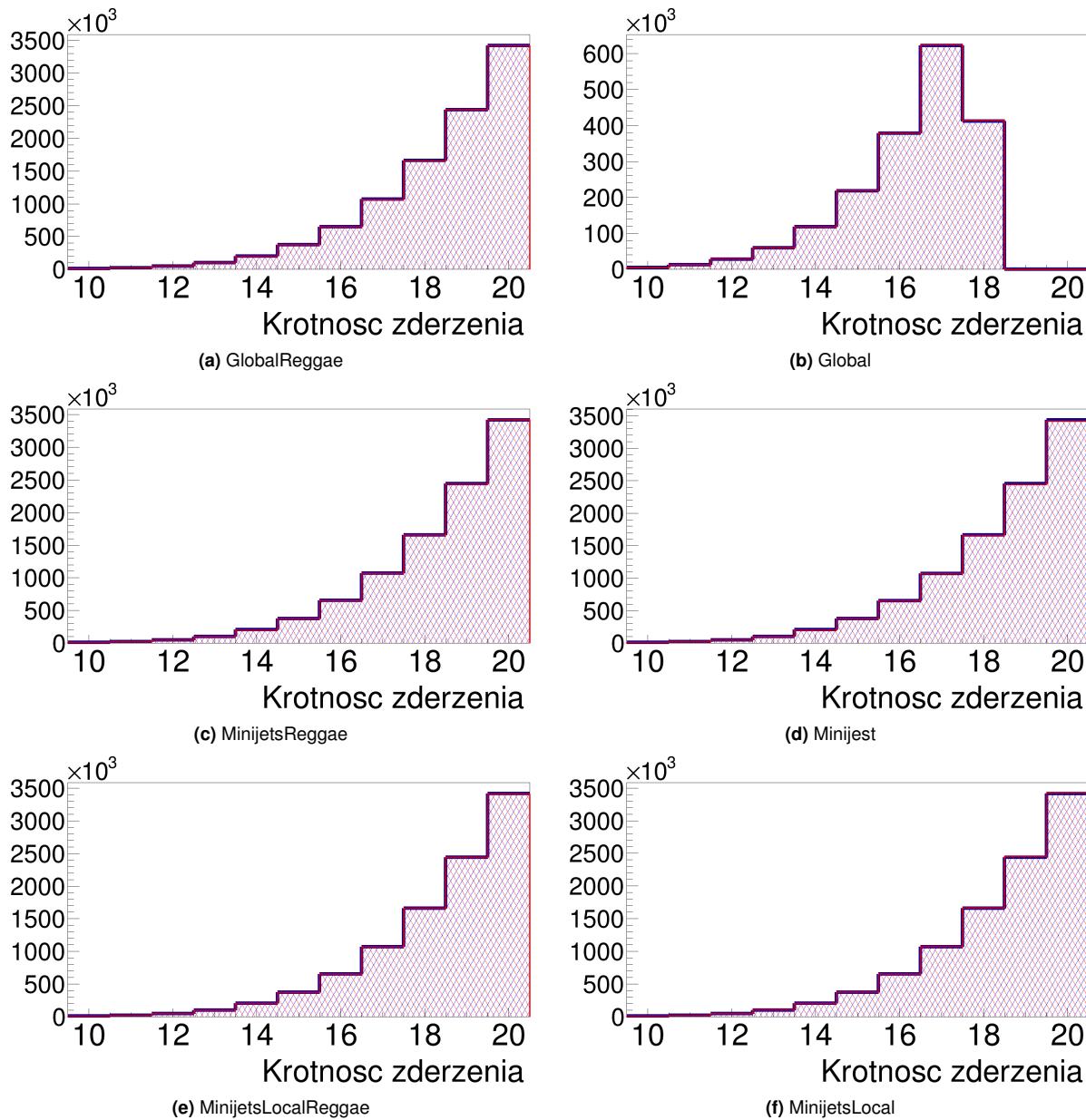
6.1 Wykresy krotności zderzenia



Rysunek 6-20: Różnica rozkładów występowania krotności danej cząstki wśród wszystkich zderzeń.

Na rysunku 6-20 można zobaczyć porównanie rozkładów występowania krotności danej cząstki dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia wynik podzielenia histogramów uzyskanych z danych po modyfikacjach przez histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.1 Wykresy krotności zderzenia

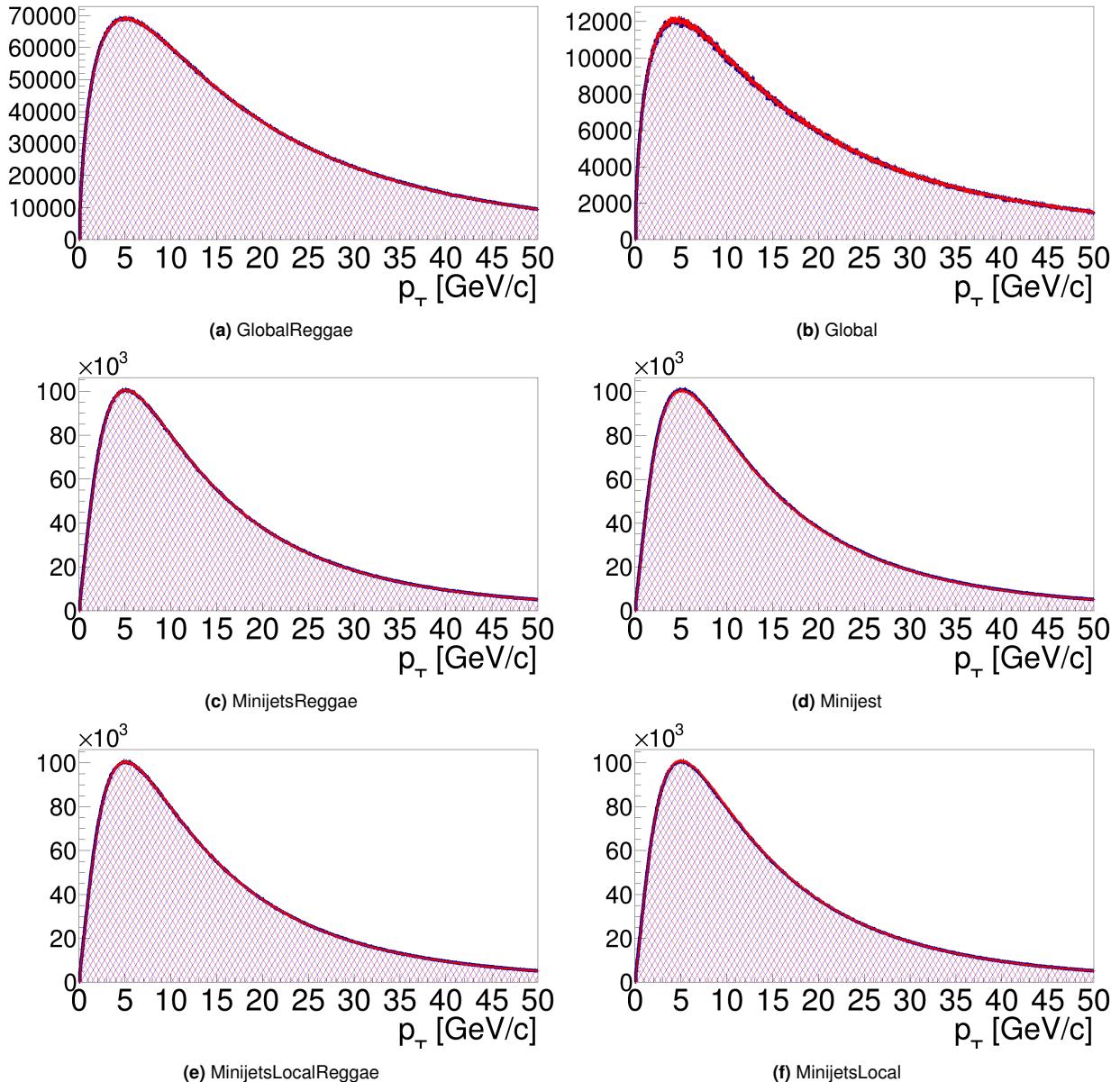


Rysunek 6-21: Rozkład krotności cząstek w zderzeniu.

Na rysunku 6-21 można zobaczyć porównanie rozkładów występowania krotności wszystkich cząstek po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych przed modyfikacją (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady krotności po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.2 Rozkłady pędu poprzecznego

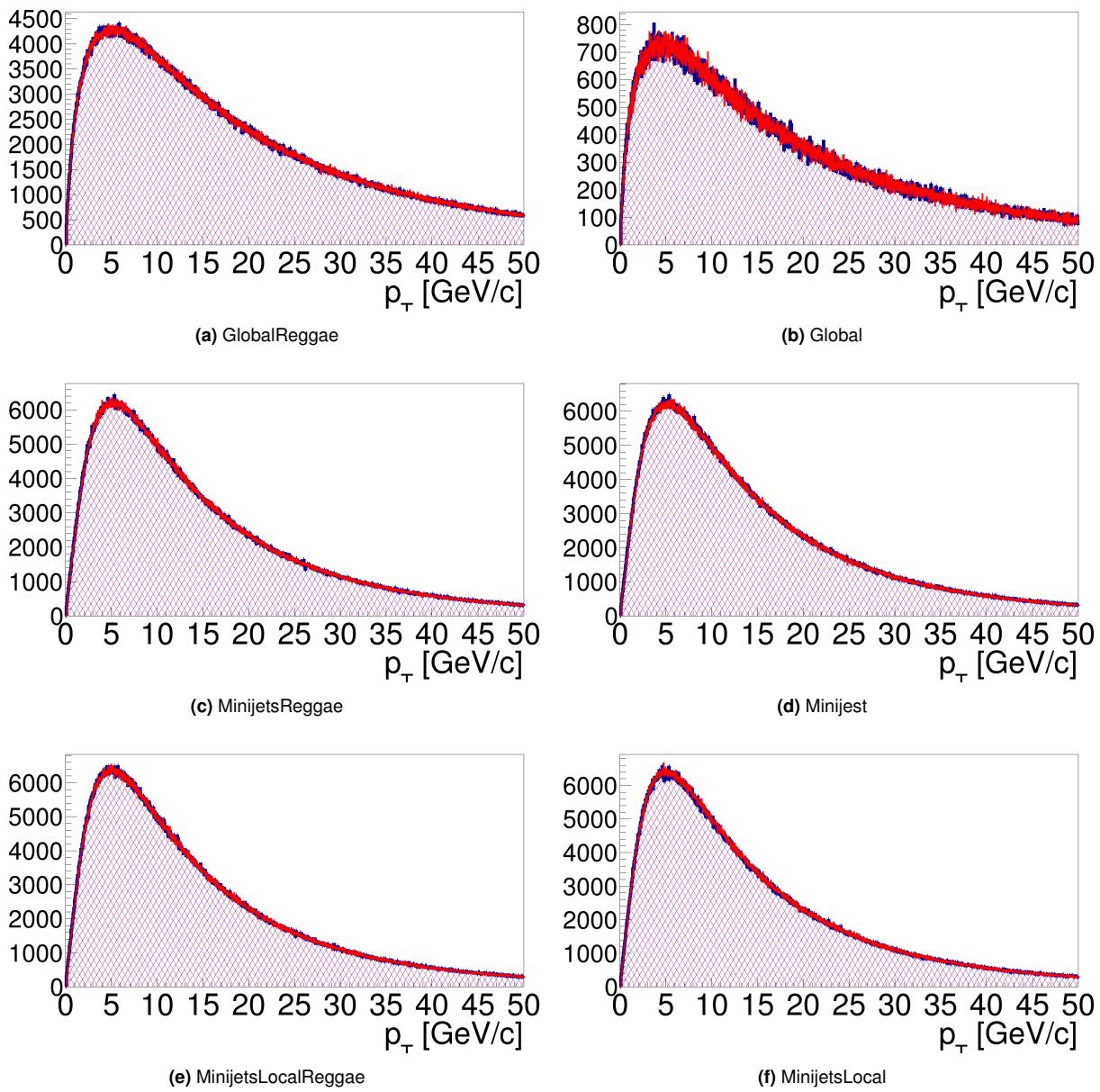
6.2 Rozkłady pędu poprzecznego



Rysunek 6-22: Rozkłady pędu poprzecznego pionów.

Na rysunku 6-22 można zobaczyć porównanie rozkładów pędu poprzecznego pionów po modyfikacjach (kolor czerwony: —) do tych sprzed modyfikacji (kolor niebieski: —) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

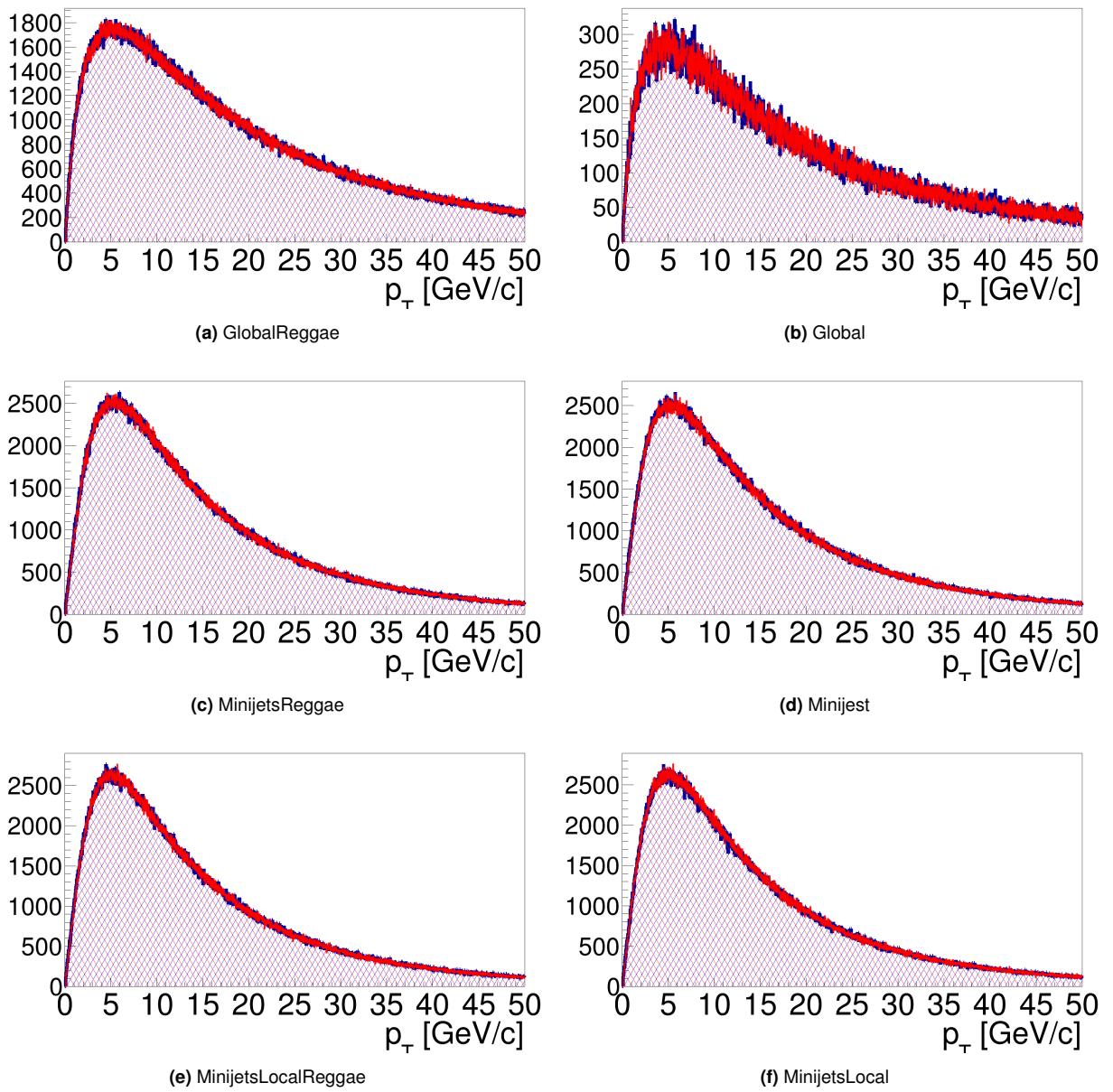
6.2 Rozkłady pędu poprzecznego



Rysunek 6-23: Rozkłady pędu poprzecznego kaonów.

Na rysunku 6-23 można zobaczyć porównanie rozkładów pędu poprzecznego kaonów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych przed modyfikacją (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.2 Rozkłady pędu poprzecznego

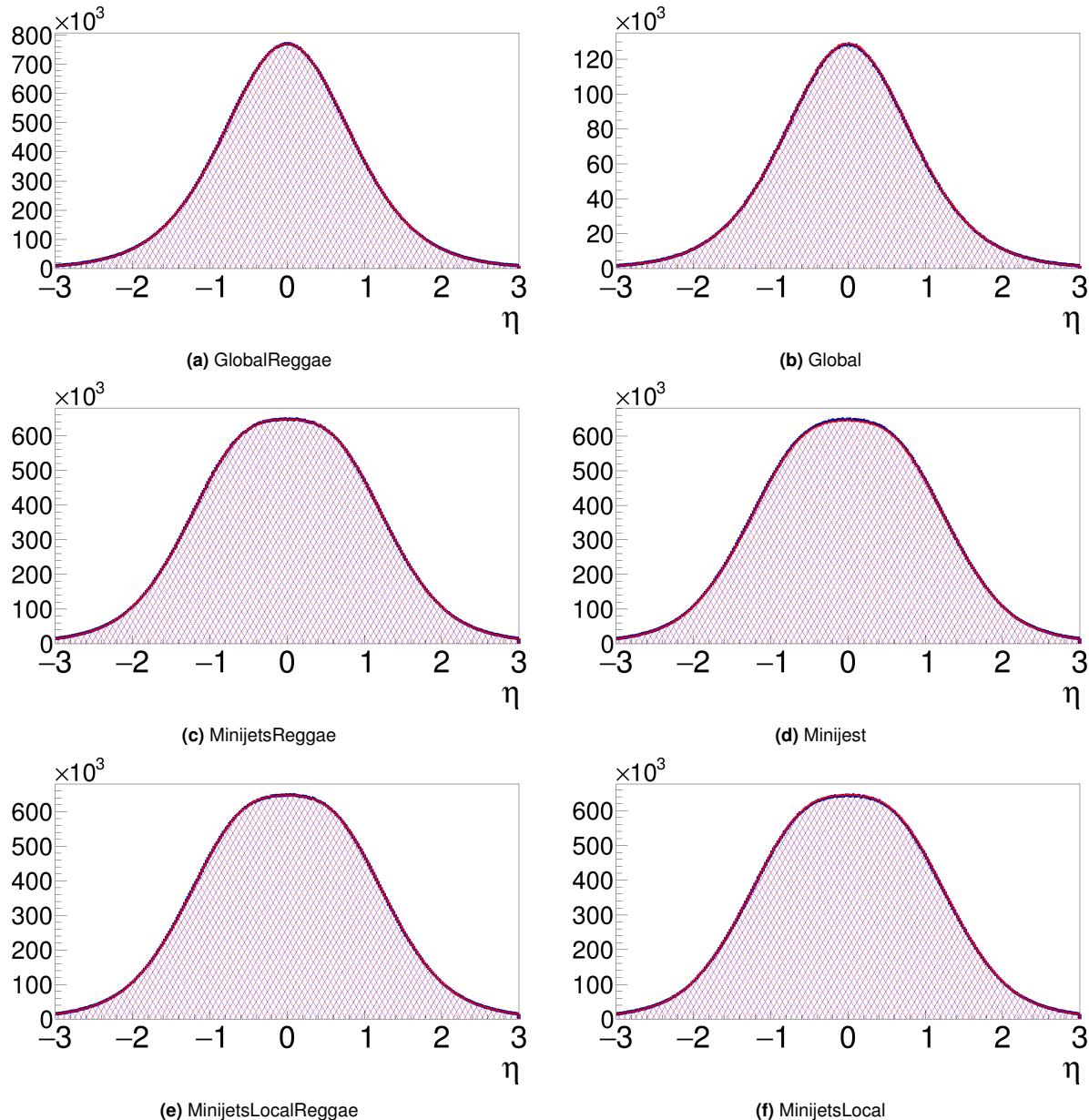


Rysunek 6-24: Rozkłady pędu poprzecznego protonów.

Na rysunku 6-24 można zobaczyć porównanie rozkładów pędu poprzecznego protonów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych sprzed modyfikacji (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.3 Rozkłady pseudopośpieszności η

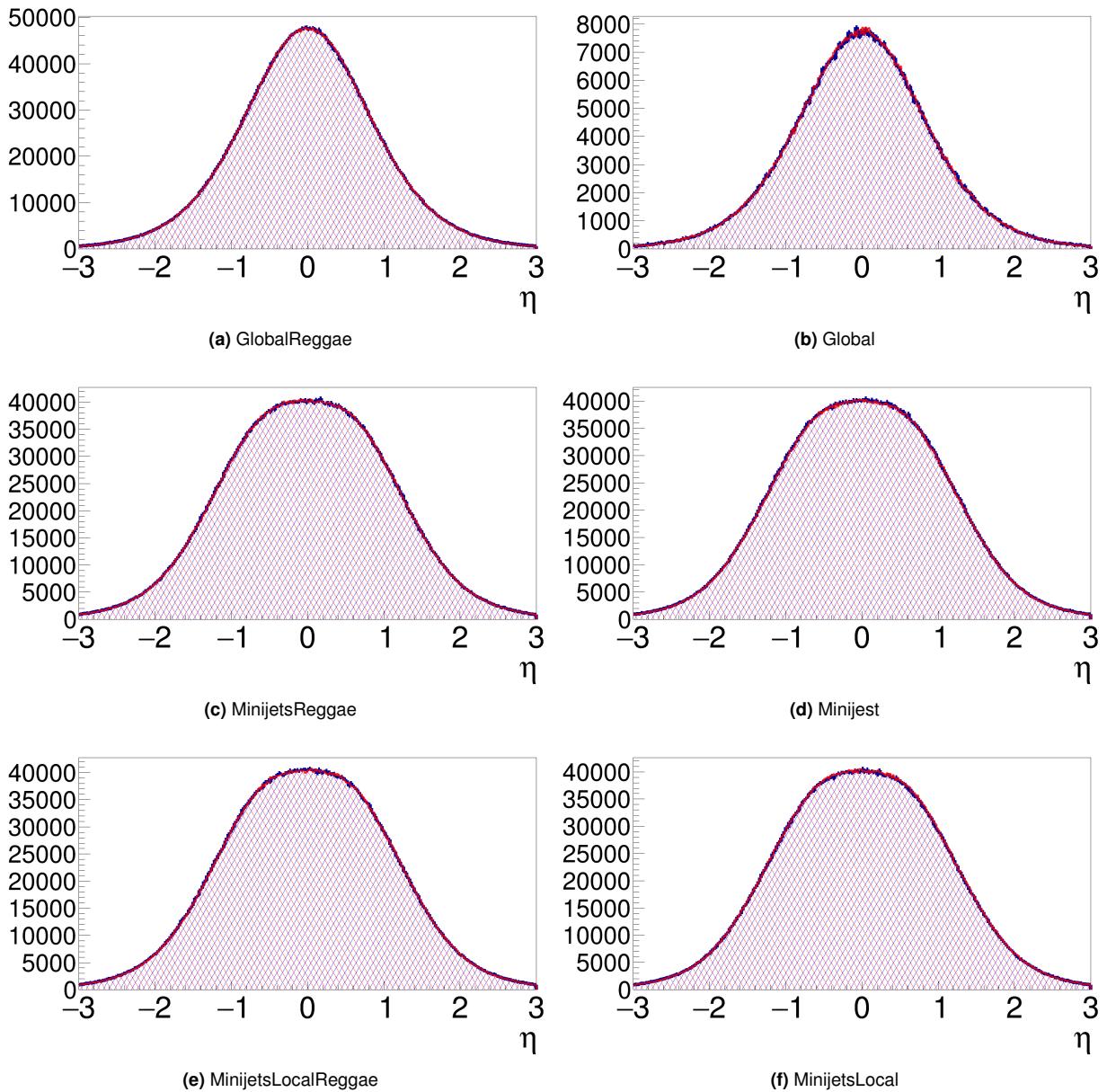
6.3 Rozkłady pseudopośpieszności η



Rysunek 6-25: Rozkłady pseudopośpieszności pionów.

Na rysunku 6-25 można zobaczyć porównanie rozkładów pseudopośpieszności pionów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych przed modyfikacją (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

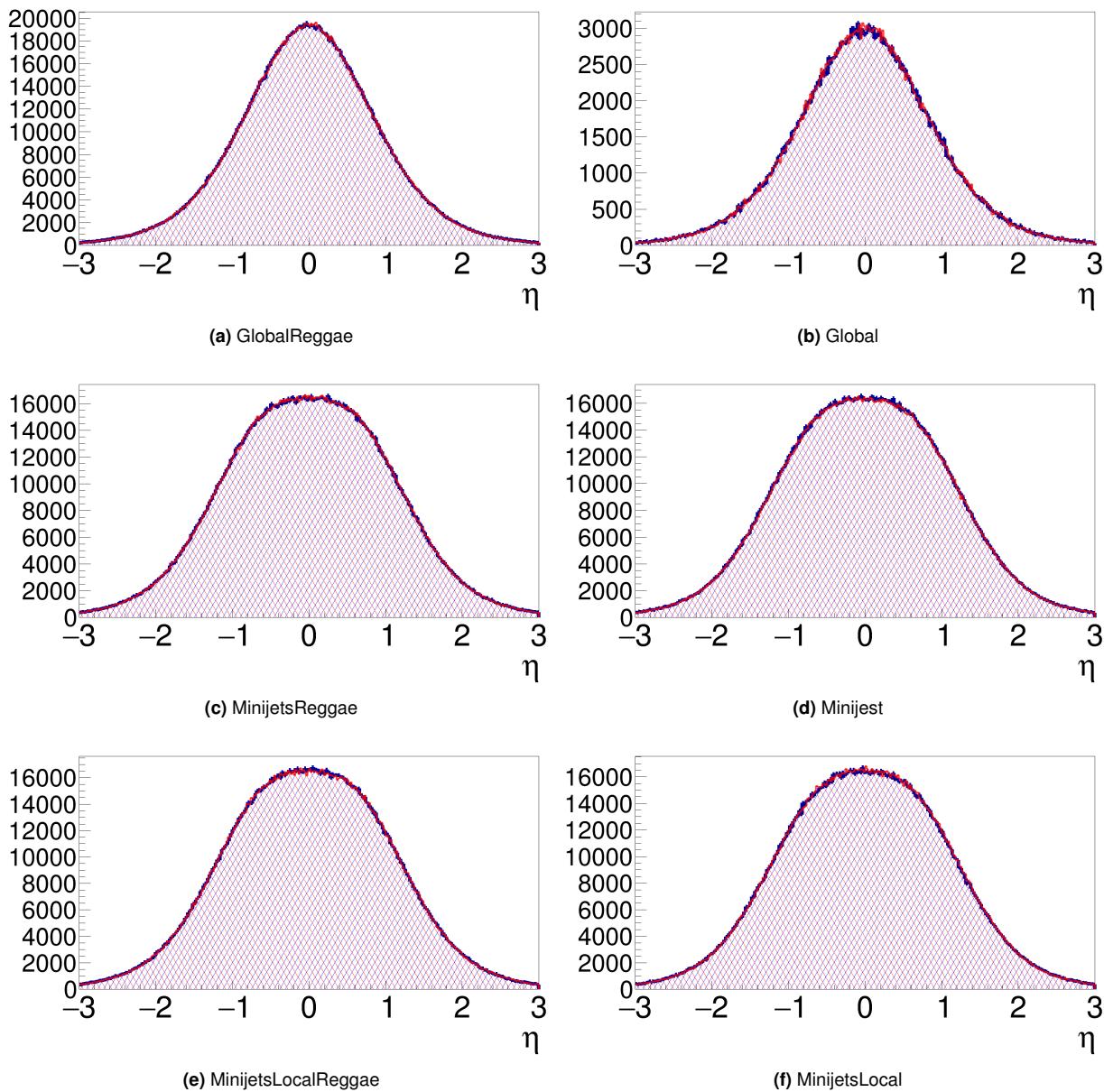
6.3 Rozkłady pseudopośpieszności η



Rysunek 6-26: Rozkłady pseudopośpieszności kaonów.

Na rysunku 6-26 można zobaczyć porównanie rozkładów pseudopośpieszności kaonów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych sprzed modyfikacji (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.3 Rozkłady pseudopośpieszności η

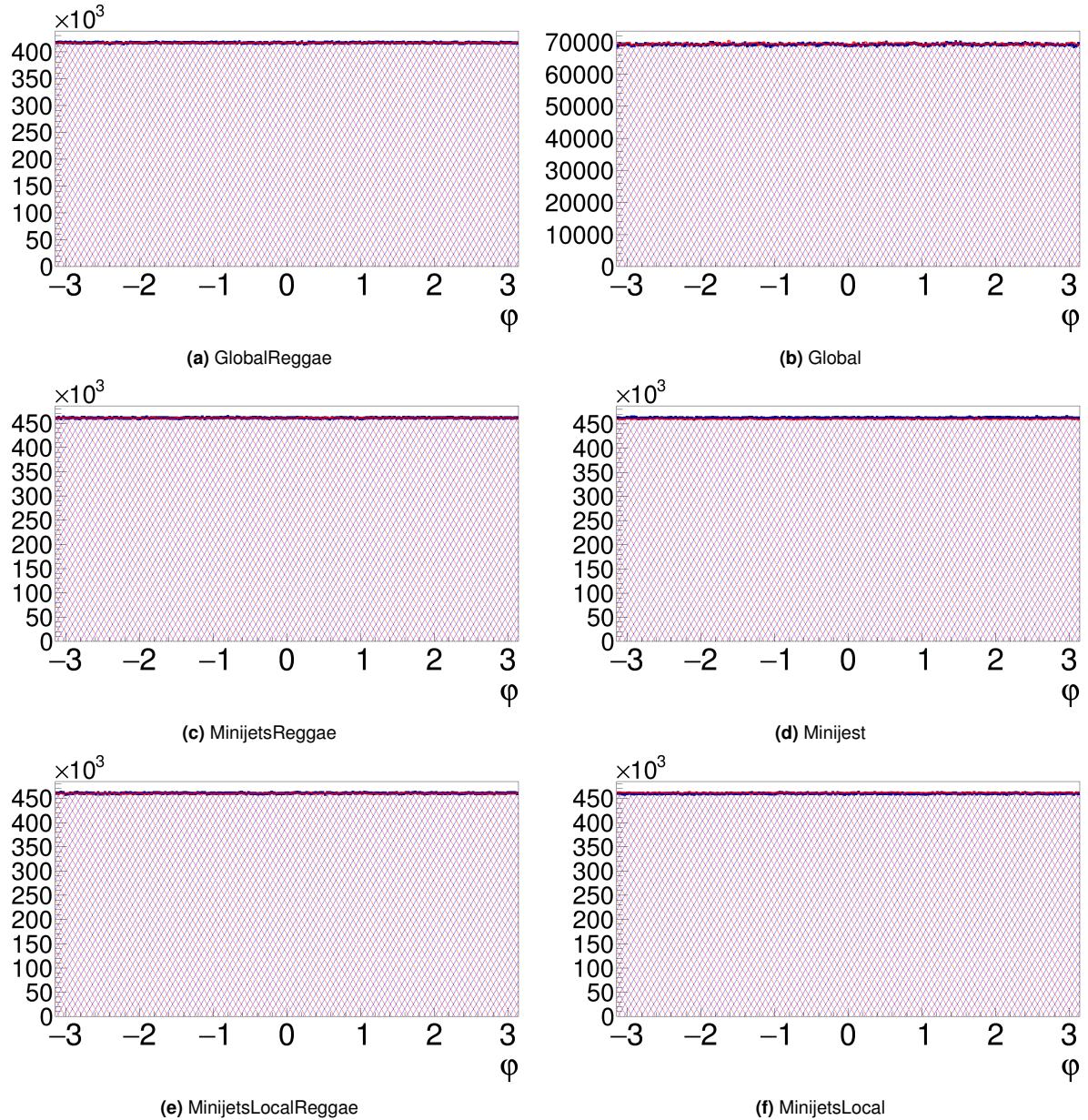


Rysunek 6-27: Rozkłady pseudopośpieszności protonów.

Na rysunku 6-27 można zobaczyć porównanie rozkładów pseudopośpieszności protonów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych przed modyfikacją (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.4 Rozkłady kąta azymutalnego ϕ

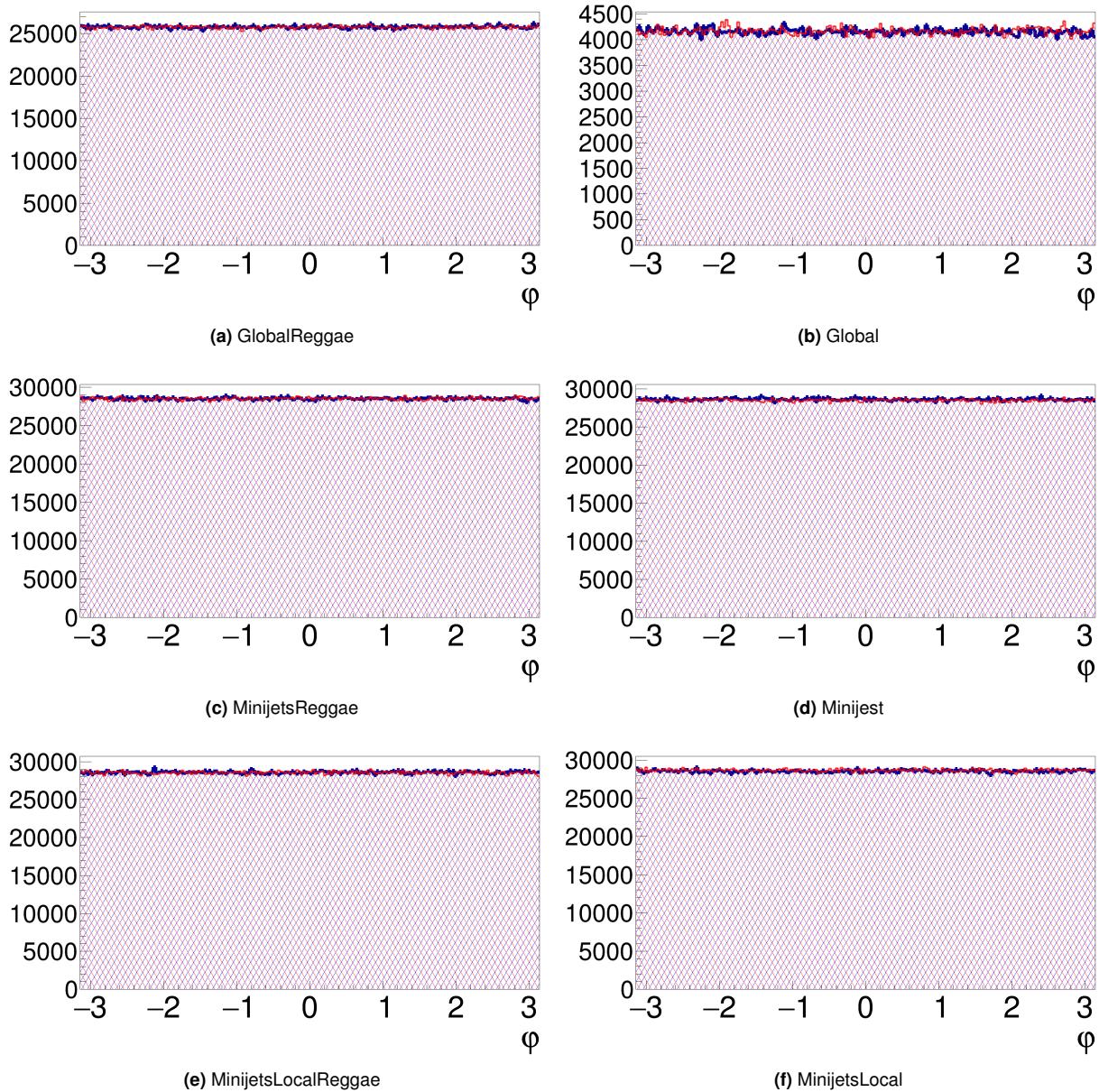
6.4 Rozkłady kąta azymutalnego ϕ



Rysunek 6-28: Rozkłady kąta azymutalnego pionów.

Na rysunku 6-28 można zobaczyć porównanie rozkładów kąta azymutalnego pionów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych przed modyfikacją (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

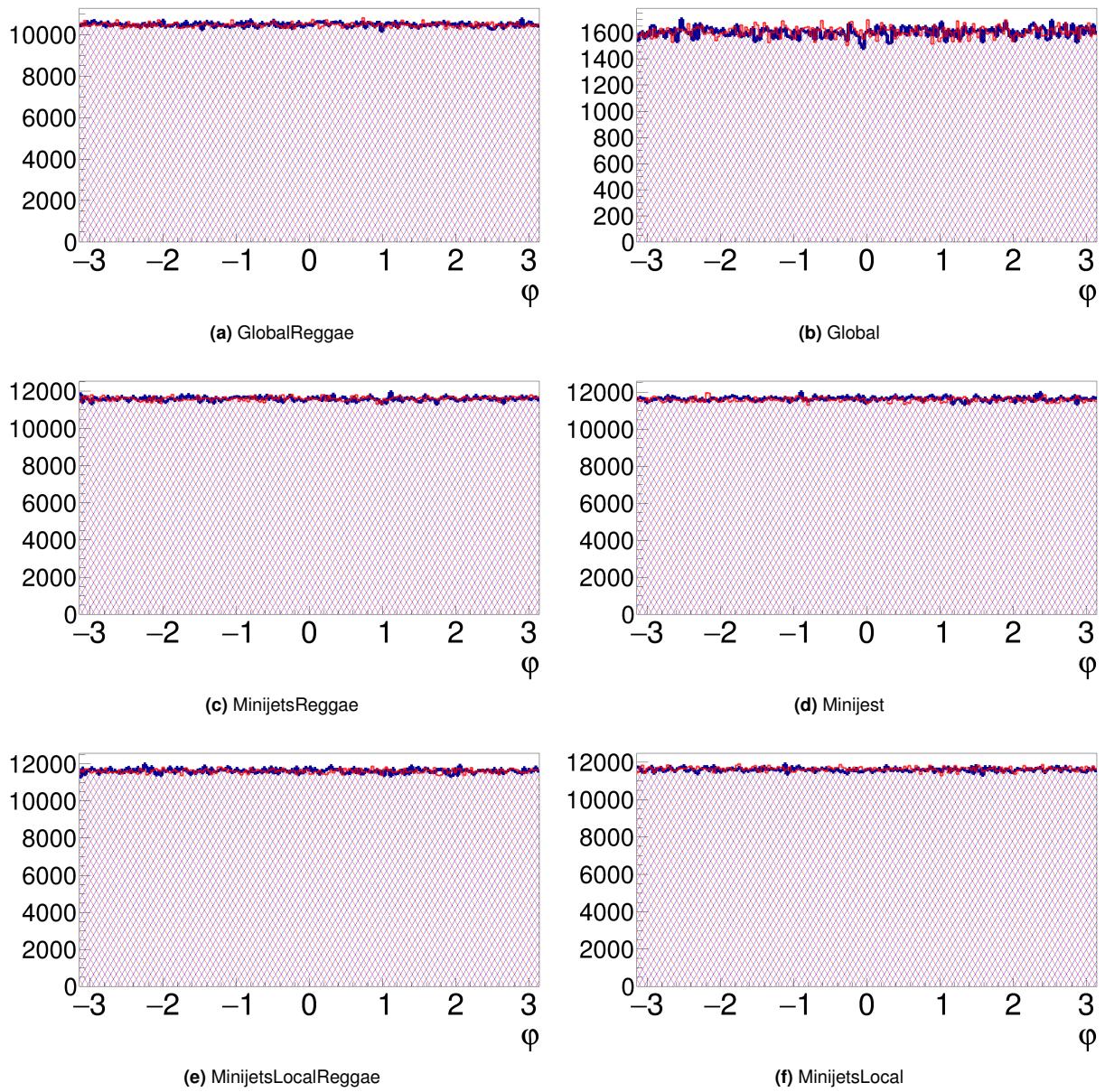
6.4 Rozkłady kąta azymutalnego ϕ



Rysunek 6-29: Rozkłady kąta azymutalnego kaonów.

Na rysunku 6-29 można zobaczyć porównanie rozkładów kąta azymutalnego kaonów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych przed modyfikacją (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.4 Rozkłady kąta azymutalnego ϕ



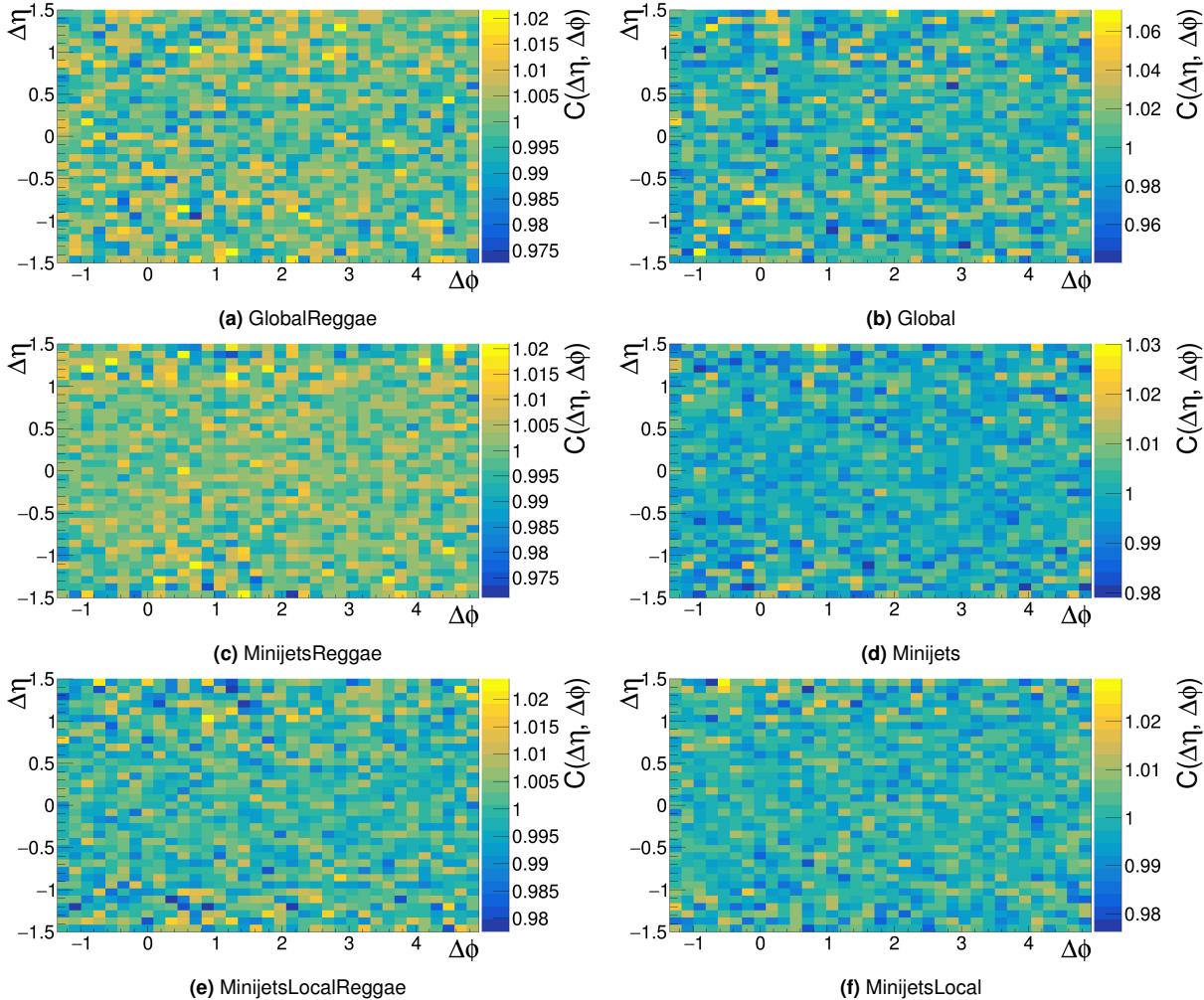
Rysunek 6-30: Rozkłady kąta azymutalnego protonów.

Na rysunku 6-30 można zobaczyć porównanie rozkładów kąta azymutalnego protonów po modyfikacjach (kolor czerwony:) do tych przed modyfikacją (kolor niebieski:) dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia naniesione rozkłady po modyfikacjach na histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.5 Korelacje kątowe

6.5 Korelacje kątowe

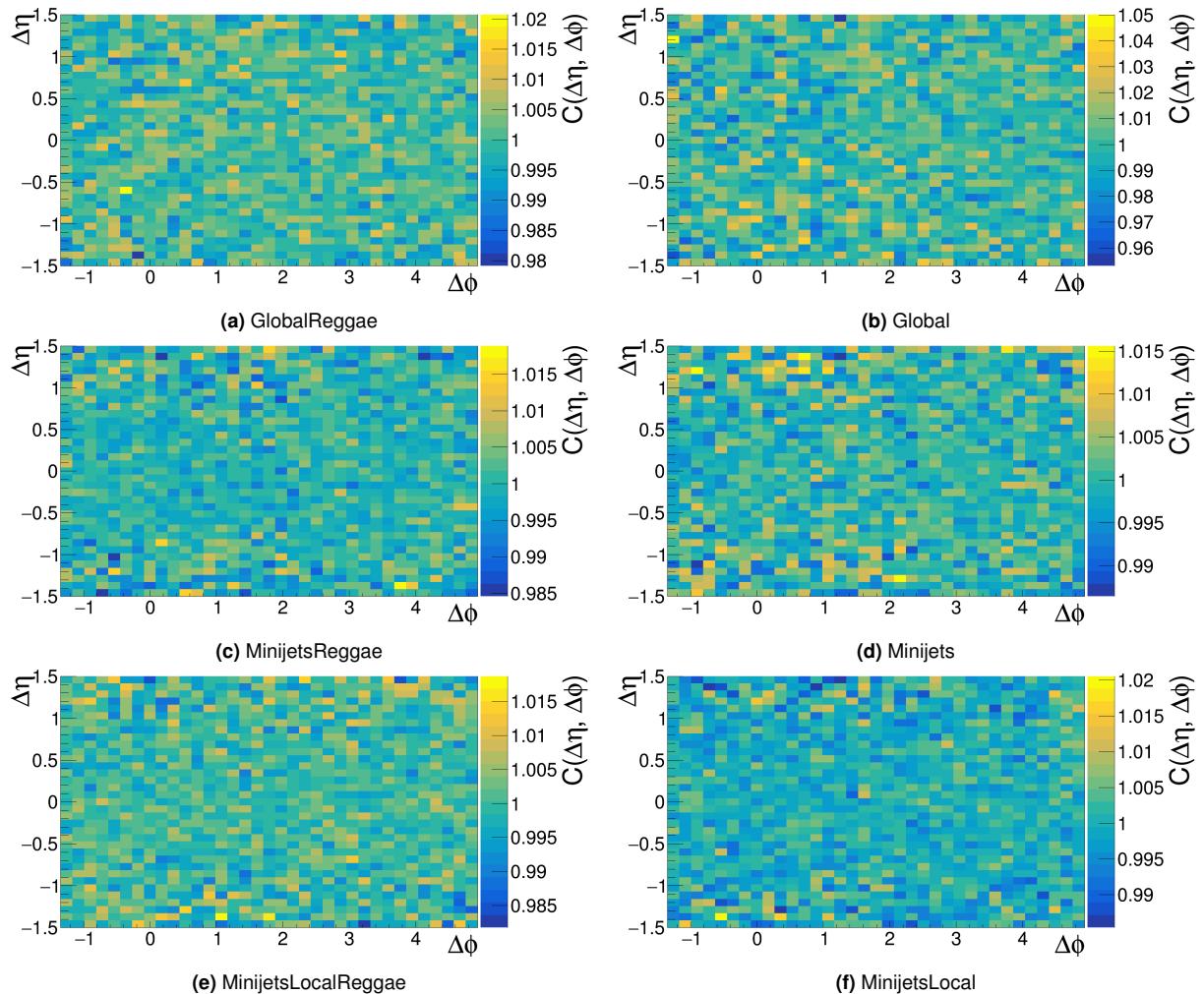
W tej sekcji przedstawiono wykresy różnic w korelacjach kątowych między różnymi cząstками.



Rysunek 6-31: Różnica w korelacjach $\pi^+\pi^+$.

Na rysunku 6-31 można zobaczyć porównanie rozkładów funkcji korelacyjnych $\pi^+\pi^+$ w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia wynik podzielenia histogramów uzyskanych z danych po modyfikacjach przez histogramy z pierwotnej wersji generatora.

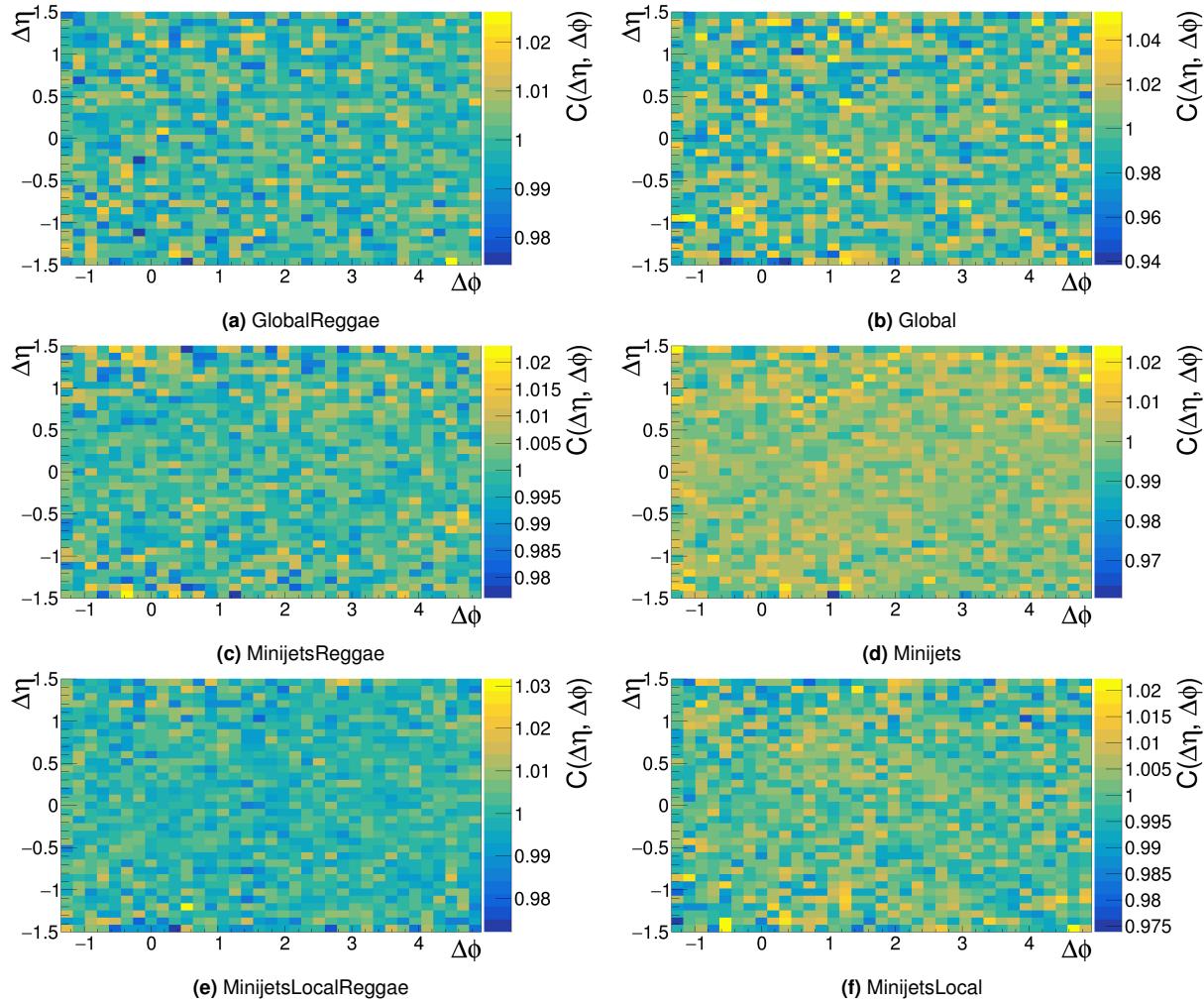
6.5 Korelacje kątowe



Rysunek 6-32: Różnica w korelacjiach $\pi^+ \pi^-$.

Na rysunku 6-32 można zobaczyć porównanie rozkładów funkcji korelacyjnych $\pi^+\pi^-$ w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia wynik podzielenia histogramów uzyskanych z danych po modyfikacjach przez histogramy z pierwotnej wersji generatora.

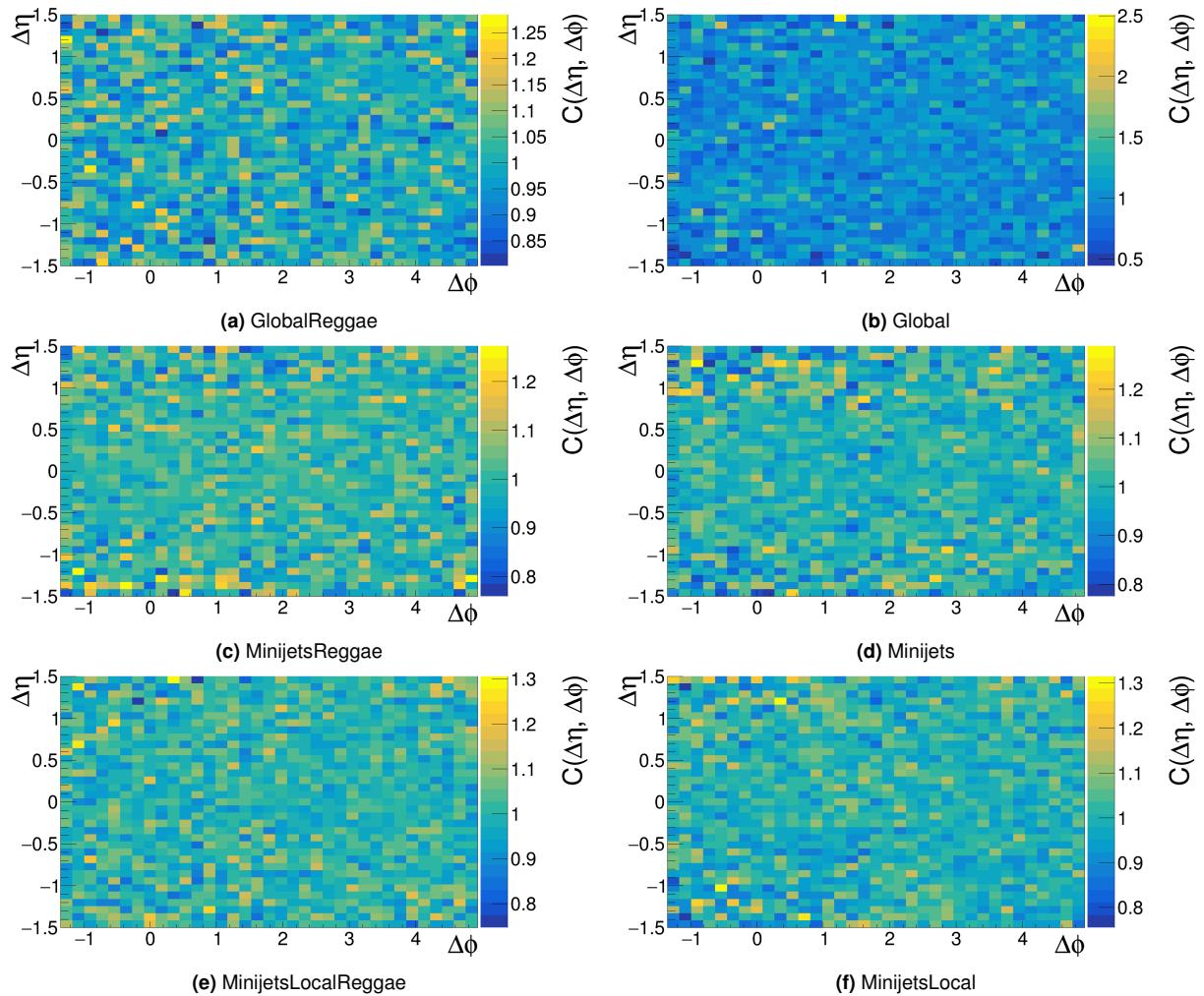
6.5 Korelacje kątowe



Rysunek 6-33: Różnica w korelacjach $\pi^0\pi^0$.

Na rysunku 6-33 można zobaczyć porównanie rozkładów funkcji korelacyjnych $\pi^0\pi^0$ w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia wynik podzielenia histogramów uzyskanych z danych po modyfikacjach przez histogramy z pierwotnej wersji generatora.

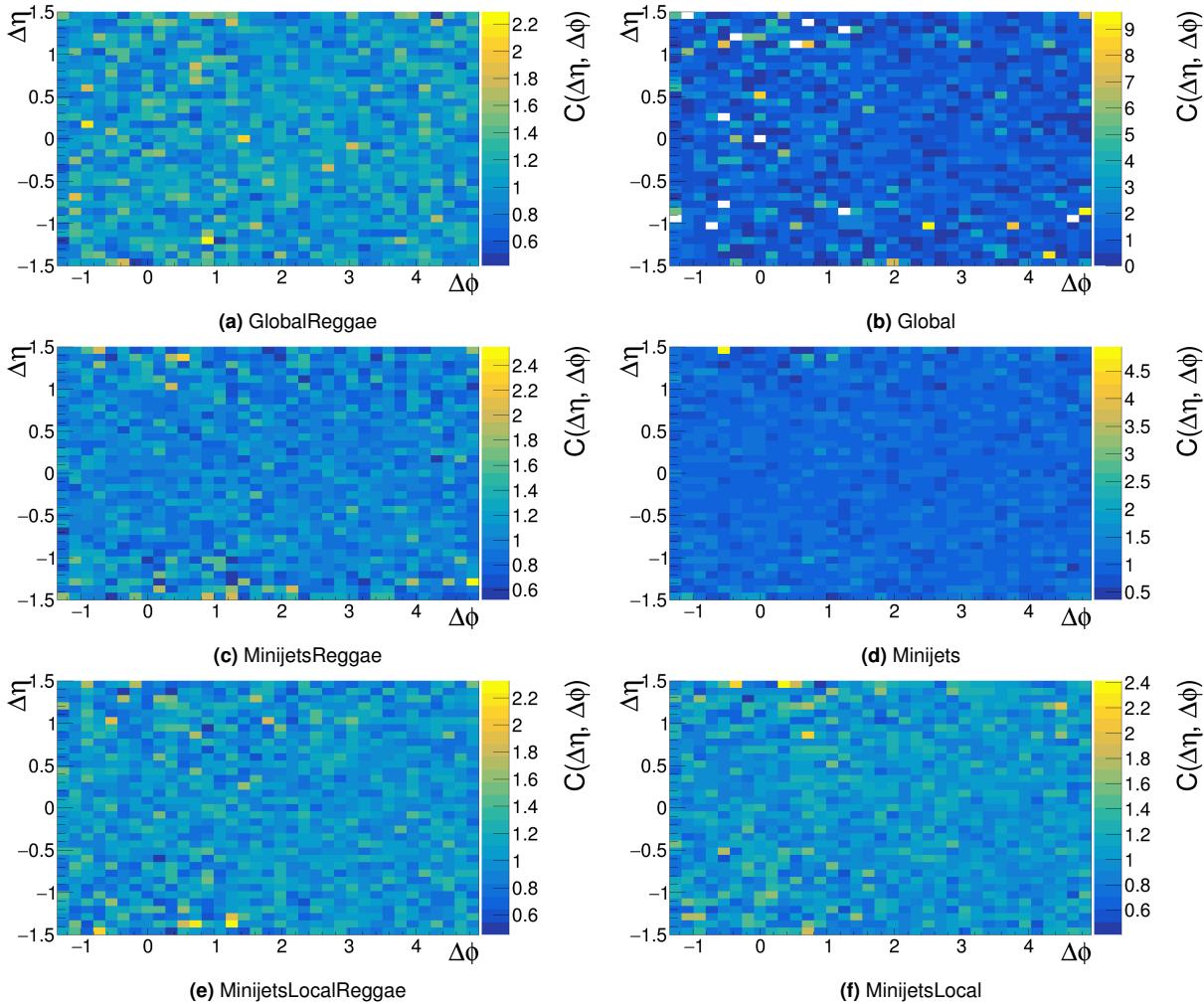
6.5 Korelacje kątowe



Rysunek 6-34: Różnica w korelacjach K^+K^+ .

Na rysunku 6-34 można zobaczyć porównanie rozkładów funkcji korelacyjnych K^+K^+ w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia wynik podzielenia histogramów uzyskanych z danych po modyfikacjach przez histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.5 Korelacje kątowe



Rysunek 6-35: Różnica w korelacjach pp .

Na rysunku 6-35 można zobaczyć porównanie rozkładów funkcji korelacyjnych pp w przestrzeni $\Delta\phi\Delta\eta$ dla różnych opcji generatora. Porównanie przedstawia wynik podzielenia histogramów uzyskanych z danych po modyfikacjach przez histogramy z pierwotnej wersji generatora.

6.5 Korelacje kątowe

Testy nowej wersji generatora CALM zakończyły się sukcesem. Wykresy na rysunkach w sekcjach 6.2, 6.3 i 6.4 pokazują, że pęd poprzeczny, pseudopośpieszność oraz kąt azymutalny rozkładają się statystycznie identycznie jak w pierwotnej wersji generatora dla każdego rodzaju częstek oraz wszystkich opcji generatora. Również na rysunku 6-20 wykresy krotności zderzenia po modyfikacjach nakładają się na te przed modyfikacjami.

Wykresy podzielonych histogramów dwuwymiarowych na rysunku 6-20 oraz na rysunkach w sekcji 6.5 nie przedstawiają żadnej charakterystycznej struktury mogącej sugerować błędy w modyfikacjach. Pewne odstępstwa w niektórych binach histogramu spowodowane są statystycznym charakterem symulacji.

7. Pomoce do programu

Aby ułatwić pracę z CALM napisano instrukcję obsługi (sekcja 7.1) oraz dokumentację techniczną kodu (sekcja 7.2).

7.1 Instrukcja obsługi

Instrukcja obsługi (załącznik A) została napisana w języku angielskim. Zawiera ona podstawowe informacje o programie, jego wymagania, opis instalacji oraz wytłumaczenie jak z niego korzystać używając domyślnej konfiguracji i tej zaawansowanej.

7.2 Dokumentacja kodu

Dokumentacja kodu (załącznik B) została napisana w języku angielskim przy użyciu narzędzia doxygen [18] – popularnego narzędzia do szybkiego tworzenia dokumentacji. Do plików CALM dodano opisy elementów kodu w formacie czytanym przez doxygen. Rysunek 7-36 przedstawia zrzut ekranu strony domowej dokumentacji wygenerowanej w HTML.

The screenshot shows the 'ConservAtion Laws Model' documentation. At the top, there's a navigation bar with 'Main Page', 'Classes ▾', 'Files ▾', and a search bar. Below the navigation bar, the title 'Class Hierarchy' is displayed. A note says: 'This inheritance list is sorted roughly, but not completely, alphabetically.' There's a link '[detail level 1 2]'. The class hierarchy table lists the following classes:

Class	Description
CALM	Representation of the program, handles all aspects of simulation
ConfigurationHolder	Holds values of parameters specified in configuration file. CALM sets values once, on the beginning, and they are being read many times during simulation
Configurator	Class contains parameters for TERMINATOR 2 that are stored in the <i>ini</i> type files
Crc32	Class for generating a 32-bit CRC (Cyclic Redundancy Check) checksum
Event	Runs CALM which generates number of particles
EventGenerator	Generates number of Event and saves them to ROOT type or text files
Parameter	PARAMETER structure
Parser	A parser for the particle database files
ParticleCoor	Class with particle coordinates
Particle	Class containing particle of ParticleType space-time and energy-momentum coordinates
ParticleDB	Contains a database of particle types. The database can be accessed by giving an index number of desired particle or its name
ParticleReg	Class for defining particles
ParticleType	Contains information on particle properties like: mass, spin, quark content, quantum numbers etc
StructEvent	Structure of the entry to the events TTree
tensor3	Two-dimensional array of size 3x3
tensor4	Two-dimensional array of size 4x4
vector3	One-dimensional array of size 3
vector4	One-dimensional array of size 4

At the bottom right, it says 'Generated by doxygen 1.9.0'.

Rysunek 7-36: Zrzut ekranu strony domowej dokumentacji CALM.

8. Podsumowanie

Generator CALM powstał, ponieważ, w odróżnieniu od popularnych symulatorów, pozwala łatwiej badać wpływ pojedynczych mechanizmów fizycznych na wyniki zderzeń hadronów. W pierwotnej postaci model ten nie był jednak prawie w żaden sposób opisany oraz jego kod źródłowy nie wychodził zbytnio poza surową postać, to w zasadzie uniemożliwiało jego szersze zastosowanie niż przez grono autorów.

Praca ta polegała na przystosowaniu generatora CALM do powszechnego użytkowania. W sekcji 3 zawarto podstawowe informacje o modelu oraz opisano dokładnie jego działanie. W sekcji 4 pokazano jakich wyników można oczekiwac od generatora oraz czym się różnią poszczególne jego opcje.

Przeprowadzono również modyfikacje w samym kodzie CALM. Zmodularyzowano metodę odpowiadającą za tworzenie wyników każdego zderzenia (sekcja 5.1), dzięki czemu można łatwiej odróżnić, który fragment odpowiada za dany aspekt symulacji. Wprowadzono również dodatkowy plik konfiguracyjny (sekcja 5.2) pozwalający zmieniać wartości parametrów używanych w tej metodzie bez wchodzenia w kod. Przetestowano działanie nowej wersji (sekcja 6) aby potwierdzić, że wprowadzone modyfikacje nie naruszyły poprawnego działania programu. Nową wersję generatora opublikowano w serwisie GitHub (załącznik C).

Na koniec napisano instrukcję instalacji i obsługi programu oraz dokumentację techniczną kodu (sekcja 7), obie w języku angielskim, z myślą o międzynarodowym użytkowniku.

Literatura

- [1] The ALICE Collaboration, “The ALICE Experiment at the CERN LHC,” *Journal of Instrumentation*, vol. 3, no. S08002, 2008.
- [2] “ALICE event display of a Pb-Pb collision at 2.76A TeV.” <https://cds.cern.ch/record/2032743>. dostęp: 22/08/2020.
- [3] C. N. Yang and R. L. Mills, “Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance,” *Phys. Rev.*, vol. 96, pp. 191–195, 1954.
- [4] A. Barabasz, “Czastki elementarne modelu standardowego.” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Czastki_elementarne_modelu_standardowego.svg. dostęp: 22/08/2020.
- [5] P. W. Higgs, “Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 13, pp. 508–509, 1964.
- [6] The ATLAS and CMS collaborations, “Birth of a higgs boson,” *CERN Courier*, 2013.
- [7] W. Florkowski, “Phenomenology of Ultra-Relativistic Heavy-Ion Collision”. Kraków, Polska: *World Scientific*, 2010.
- [8] The ALICE Collaboration, “Insight into particle production mechanisms via angular correlations of identified particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$,” *Eur. Phys. J. C77* (2017) 569.
- [9] A. Zaborowska, “Pair angular correlations for pions, kaons and protons in proton-proton collisions in ALICE,” Master’s thesis, 2014.
- [10] M. A. Janik, “Two-particle correlations as a function of relative azimuthal angle and pseudorapidity in proton-proton collisions registered by the ALICE experiment”. PhD thesis, Warsaw U. of Tech., 2014.
- [11] A. Zaborowska, “Calm version 0.8.” <https://github.com/CALMmodel/CALM>. dostęp: 22/08/2020.
- [12] P. Modzelewski, “Badanie zasad zachowania w korelacjach kątowych pionów, kaonów oraz protonów w zderzeniach hadronów przy energiach LHC,” Praca Magisterska, 2016.
- [13] “CERN root - data analysis framework.” <https://root.cern>. dostęp: 22/08/2020.
- [14] M. Chojnacki, A. Kisiel, W. Florkowski, and W. Broniowski, “THERMINATOR 2: THERMal heavy IoN generATOR 2,” *Comput.Phys.Commun.* 183 (2012) 746-773.
- [15] F. James, “Monte-Carlo phase space,” *CERN-68-15*, 1968.

LITERATURA

- [16] M. Meres, I. Melo, B. Tomaszik, V. Balek, and V. Cerny, “Generating heavy particles with energy and momentum conservation,” *Comput. Phys. Commun.*, vol. 182, pp. 2561–2566, 2011.
- [17] P. Modzelewski, “Tpi.” https://github.com/majanik/tpi_CALM. dostęp: 22/08/2020.
- [18] D. van Heesch, “Doxygen.” <https://www.doxygen.nl/index.html>. dostęp: 22/08/2020.

Spis rysunków

1-1	Obraz zderzenia jonów ołowiu o energii 2.76A TeV uzyskany z detektora ALICE. Źródło: [2].	13
2-2	Cząstki elementarne, z których zbudowana jest znana materia. Źródło: [4].	14
2-3	Definicja θ i $\Delta\theta$ w geometrii detektora ALICE. Źródło: [9].	16
2-4	Definicja $\Delta\phi$ w geometrii detektora ALICE. Źródło: [9].	17
2-5	Przykład tworzenia wykresu funkcji korelacyjnej.	19
2-6	Udział poszczególnych czynników w kształcie funkcji korelacyjnych w zderzeniach proton-proton o energii $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$. Źródło: [10].	19
2-7	Schemat tworzenia minidżetów. Źródło: [9].	20
3-8	Algorytm generujący cząstki dla jednego zderzenia w CALM. Źródło: [12].	22
3-9	Rozkład występowania krotności danej cząstki dla opcji Global REGGAE.	25
3-10	Rozkład występowania krotności zderzenia dla opcji Global REGGAE.	25
3-11	Rozkład pędu π^+	26
3-12	Rozkład pseudopośpieszności dla π^+	26
3-13	Rozkład kąta azymutalnego dla π^+	27
4-14	Wykresy korelacji kątowych $\pi^+\pi^+$	28
4-15	Wykresy korelacji kątowych $\pi^+\pi^-$	29
4-16	Wykresy korelacji kątowych $\pi^0\pi^0$	30
4-17	Wykresy korelacji kątowych K^+K^+	31
4-18	Wykresy korelacji kątowych pp	32
5-19	Fragment wprowadzonego pliku konfiguracyjnego.	35
6-20	Różnica rozkładów występowania krotności danej cząstki wśród wszystkich zderzeń.	37
6-21	Rozkład krotności cząstek w zderzeniu.	38
6-22	Rozkłady pędu poprzecznego pionów.	39
6-23	Rozkłady pędu poprzecznego kaonów.	40
6-24	Rozkłady pędu poprzecznego protonów.	41
6-25	Rozkłady pseudopośpieszności pionów.	42
6-26	Rozkłady pseudopośipeszności kaonów.	43
6-27	Rozkłady pseudopośipeszności protonów.	44
6-28	Rozkłady kąta azymutalnego pionów.	45
6-29	Rozkłady kąta azymutalnego kaonów.	46
6-30	Rozkłady kąta azymutalnego protonów.	47
6-31	Różnica w korelacjach $\pi^+\pi^+$	48
6-32	Różnica w korelacjach $\pi^+\pi^-$	49
6-33	Różnica w korelacjach $\pi^0\pi^0$	50
6-34	Różnica w korelacjach K^+K^+	51

SPIS TABLIC

6-35 Różnica w korelacjach <i>pp.</i>	52
7-36 Zrzut ekranu strony domowej dokumentacji CALM.	54

Spis tabelic

1 Przestrzeganie zasad zachowania przez badane rodzaje częstek.	20
---	----

Załączniki

A. Instrukcja obsługi CALM

Instrukcja obsługi została przedstawiona na kolejnych dziesięciu stronach.

B. Dokumentacja CALM

Dokumentacja CALM dostępna jest w folderze “Documentation” na repozytorium CALM (załącznik C).

C. Kod źródłowy CALM

Kod źródłowy CALM opublikowano w serwisie GitHub pod adresem <https://github.com/skorafilip/CALM>.

CALM - user manual

Filip Skóra

September 16, 2020

Contents

1	Introduction	3
2	Installation	4
2.1	Requirements	4
2.2	CALM archive	4
2.3	Compilation	4
2.4	How to launch CALM	4
3	CALM - working scheme	5
4	Configuration files	6
4.1	events.ini	6
4.2	config.ini	7
5	CALM options	8
6	The script	9
References		10

1 Introduction

This instruction will provide the basic information about how to use “ConservAtion Laws Model”, called CALM, as a non programmer user. For more specific information please take a look to the “CALM - documentation” file, where you can find how to modify CALM source code to make simulation more suitable for your experiment. This user guide was written by Filip Skóra as an attachment for his engineering thesis conducted by Dr Engineer Małgorzata Janik.

CALM was developed by Anna Zaborowska, Małgorzata Janik and Filip Skóra based on the TERMINATOR [1] event generator.

2 Installation

The installation will be carried out on Linux system.

2.1 Requirements

- CALM source archive – <https://github.com/skorafilip/CALM.git>
- Cmake – <https://cmake.org>
- C++ compiler (for example gcc)
- CERN Root Framework – <https://root.cern/install/>

Cmake, compiler and Root have to be installed on the machine and CALM source archive extracted to the installation directory.

2.2 CALM archive

The archive contains:

- Source code of CALM – "include" and "src" directories
- Particle database that are used by CALM in its runtime – "Shared/particles.data"
- Configuration files – event.ini, config.ini
- Script that helps to launch CALM – "run_CALM.sh"

Details and utility of configuration files and script will be described later inside this manual.

2.3 Compilation

Type inside installation directory:

```
mkdir build  
cd build  
cmake ..  
make
```

2.4 How to launch CALM

To launch CALM with default configuration just run "calm" file inside build directory.

3 CALM - working scheme

1. INITIALIZATION: Reading configuration from .ini files
2. Creating event
3. Generating multiplicity for event
4. Generating types for particles; event must obey conservation laws.
5. Generating direction of movement for each particle
6. Generating total energy of collision
7. Dividing total energy between all particles
8. Generating event; filtering the most unlikely events
9. Saving event to the file
10. POST ACTION: After doing steps 2-9 10000 times, CALM closes the file.

4 Configuration files

Configuration files gives access to some elements inside CALM.

4.1 events.ini

This file provides data which are used before the simulation starts.

Parameters:

- NumberOfEvents – number of events to generate
- EventFileType – event output file format (available: root, root&text or text)
- MultiplicityDistribution – distribution of primordial particles multiplicity (available: Poisson)
- IntegrateSamples – number of samples used in determination of primordial multiplicity and maximum integrand value
- Randomize – start each event with a new random seed taken from current time (1) or do a constant seed (0)
- ShareDir – directory with SHARE input files
- MacroDir – directory with ROOT macro files *.C
- EventDir – directory to write the events
- LogFile – log file
- MultiplicityMin – multiplicity range, minimum
- MultiplicityMax – multiplicity range, maximum
- GenbodEnergy – event energy
- EventType – what is to be generated (section 5: CALM options)

4.2 config.ini

This file provides data which CALM uses to simulate elements of each event.

Parameters:

- Nmean – average charged particle multiplicity per rapidity unit from 900 GeV
- RapidityInterval – rapidity interval
- XYZ – standard deviation of three dimensional gaussian distribution
- divideEn – coefficients for division of energy
- \${particleType}MultDistr – custom distribution function for \${particleType}
- \${particleType}_xMin – custom distribution function minimum range for \${particleType}
- \${particleType}_xMax – custom distribution function maximum range for \${particleType}
- pythiaMult – determines if custom distribution for particles will be used
- EtotMax – maximum energy of event

*\${particleType} – pions, kaons, nucleons or lambdas

5 CALM options

CALM has six options of simulation. We can distinguish them into two types:

1. GENBOD – program uses CERN Root library Genbod which is used to make similar simulations
2. REGGAE [2] – REscatterig-after-Genbod GenerAtor of Events, more effective type of simulation, easier but much faster

Each of them has three types of influence on outgoing particles:

- Global – simple proton-proton collision (no influence)
- MinijetsGlobal – split particles into two jets and boosts them in opposite directions
- MinijetsLocal – same as above but here CALM will check conservation laws for each jet separately

6 The script

Script "run_CALM.sh" helps to launch CALM faster and more efficiently. It modifies events.ini file with values passed as arguments and launches CALM in 4 background processes, which means that simulation will be running in 4 parallel threads. Events from each thread will be saved into separate directory inside "EventDir" directory passed in events.ini file.

Script takes two arguments:

1. \$EventType – value from following: 0, 1, 2 ,3, 4, 5
2. \$NumberOfEvents – each thread simulates that number of events divided by 4

For example:

```
./run_CALM.sh 3 40000
```

runs 4 CALMs each generating 10000 events for GlobalReggae option.

Tip: You can modify NumberOfCores variable, on the beginning of the script, to define how many background simulations will be run.

References

- [1] Mikołaj Chojnacki, Adam Kisiel, Wojciech Florkowski, and Wojciech Broniowski, *Thermal heavy ion generator v.2*, <https://arxiv.org/abs/1102.0273>.
- [2] Michal Meres, Ivan Melo, Boris Tomasik, Vladimir Balek, and Vladimir Cerny, *Generating heavy particles with energy and momentum conservation*, Comput. Phys. Commun. **182** (2011), 2561–2566.