

**Uniwersytet Jagielloński w Krakowie**  
**Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej**  
**Obserwatorium Astronomiczne**

**Magdalena Styczeń**

Nr albumu: 2011122990

**Zastosowanie promieniowania  
kosmicznego do kalibracji czasowej  
detektora J-PET**

Praca licencjacka  
na kierunku Astronomia

Praca wykonana pod kierunkiem  
Dr Eryk Czerwiński  
Zakład Doświadczalnej Fizyki Cząstek i jej Zastosowań

Kraków 2018

# Spis treści

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Abstrakt</b>                           | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Promieniowanie kosmiczne</b>           | <b>3</b>  |
| 2.1      | Pochodzenie . . . . .                     | 3         |
| 2.2      | Rozkład kątowy . . . . .                  | 4         |
| 2.3      | Możliwe zastosowanie . . . . .            | 4         |
| <b>3</b> | <b>Kalibracja czasowa detektora J-PET</b> | <b>5</b>  |
| 3.1      | Tomograf J-PET . . . . .                  | 5         |
| 3.2      | Idea kalibracji . . . . .                 | 5         |
| <b>4</b> | <b>Wyniki symulacji</b>                   | <b>7</b>  |
| 4.1      | Opis programu . . . . .                   | 7         |
| 4.2      | Otrzymane wyniki . . . . .                | 11        |
| 4.3      | Weryfikacja uzyskanych wyników . . . . .  | 14        |
| <b>5</b> | <b>Podsumowanie</b>                       | <b>17</b> |
| <b>6</b> | <b>Dodatek</b>                            | <b>17</b> |
| <b>7</b> | <b>Literatura</b>                         | <b>23</b> |

# 1 Abstrakt

Celem pracy było wykonanie symulacji przelotu promieniowania kosmicznego przez układ detekcyjny J-PET do wyznaczenia krotności zdarzeń z poszczególnymi scyntylatorami w zależności od ich orientacji.

Dla  $5 \cdot 10^6$  wygenerowanych zdarzeń uzyskano wyniki ukazujące największą liczbę krotności dwukrotnych i trzykrotnych. Wyższe krotności zdarzeń odnotowano w scyntylatorach bliskich położeniu horyzontalnemu. Przy założeniu stuprocentowego prawdopodobieństwa reakcji promieniowania kosmicznego ze scyntylatorem pokazano, że dla krotności większych od jeden, są scyntylatory, przez które przelelatuje do 0.61% rejestrowanego promieniowania kosmicznego.

Otrzymane rezultaty będą pomocne przy kalibracji czasowej detektora J-PET umożliwiając dokładniejsze oszacowanie prawdopodobieństwa zajścia danej koincydencji.

## Abstract

The aim of the study was to simulate the passage of cosmic radiation through the J-PET detection system in order to determine the multiplicity of events with individual scintillators depending on their orientation.

Results obtained for  $10^6$  generated events show double and triple multiplicity as most common ones. Higher multiples were noted in scintillators oriented more horizontally. Assuming a 100% probability of the reaction of the cosmic radiation with the scintillator, it has been shown that for multiples greater than one, there are scintillators through which up to 0.61% of the recorded cosmic radiation passes.

The obtained results will help in the time calibration of the J-PET detector, enabling a more accurate estimation of the probability of a given coincidence occurring.

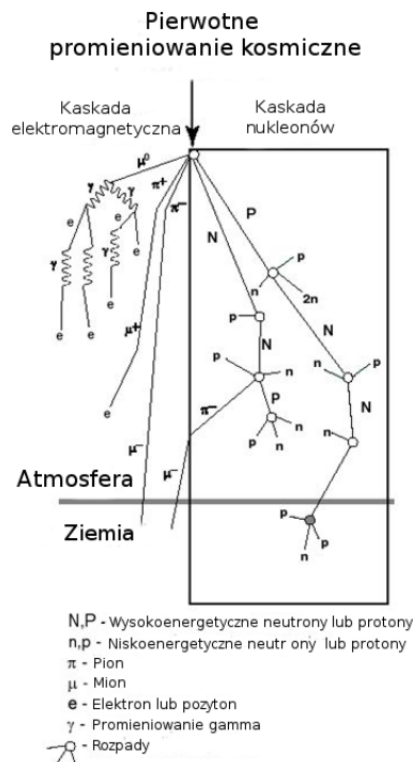
## 2 Promieniowanie kosmiczne

W rozdziale tym przedstawiono mechanizmy powstawania pierwotnego i wtórnego promieniowania kosmicznego w atmosferze ziemskiej, a także sposoby wykorzystywania tego zjawiska.

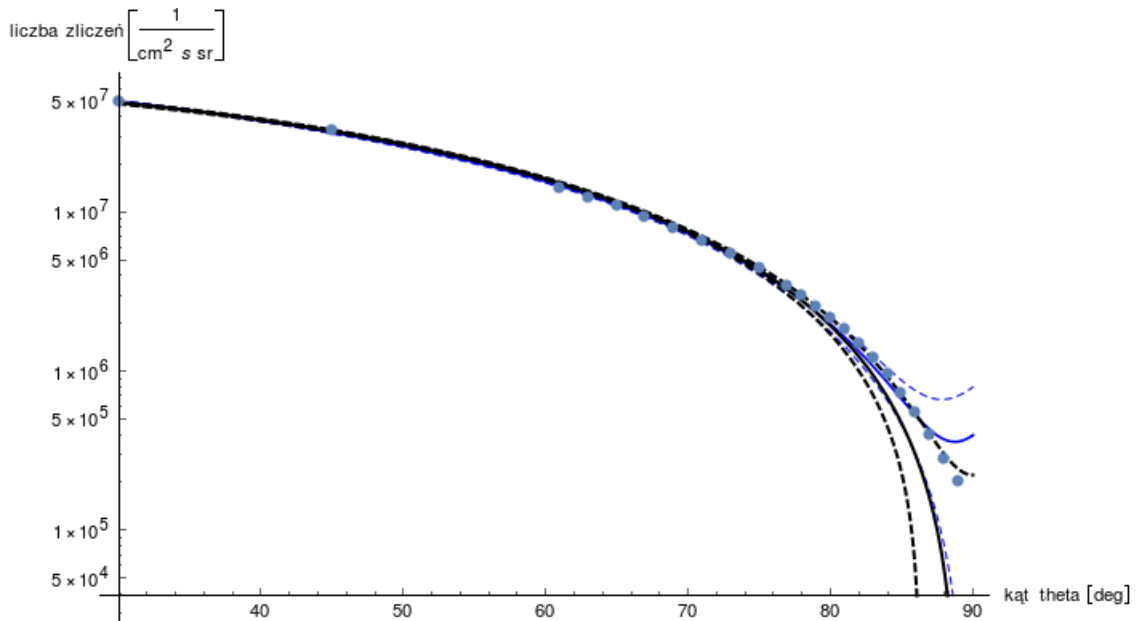
### 2.1 Pochodzenie

Promieniowaniem kosmicznym określane są cząstki pochodzące między innymi z wybuchu supernowych, aktywnych galaktyk oraz kwazarów. Pierwotne promieniowanie kosmiczne to strumień wysokoenergetycznych cząstek docierających do atmosfery i reagujących z jej atomami. Następstwem tego zjawiska jest powstanie strumienia cząstek wtórnych, tzw. kaskady (Rysunek 1).

Promieniowanie kosmiczne składa się głównie z mionów pochodzących z rozpadu wtórnego pionów i kaonów (Równania 1 i 2). Miony są najbardziej rozpowszechnionymi, naładowanymi cząstkami docierającymi do poziomu morza, a nawet niżej. Stanowią one około 71% cząstek docierających do powierzchni Ziemi. Na pozostałe 29% składają się elektrony oraz 1% nukleonów [1].



**Rysunek 1:** Rozpad promieniowania pierwotnego na wtórne. Grafikę zaadaptowano z pracy [6].



**Rysunek 2:** Punkty odpowiadają danym eksperymentalnym [2]. Czarna gruba linia przedstawia dopasowanie funkcji typu  $N(\theta) = A + B\cos^2\theta$ , natomiast cienka niebieska linia odpowiada użytemu w tej pracy przybliżeniu wielomianem 3 stopnia (Równania 8 i 7). Linie przerywane wyznaczają zakres niepewności każdego z dopasowań.

## 2.2 Rozkład kątowy

Do pomiaru mionów wykorzystuje się różne metody detekcji i pomiaru spektrum energetycznego i kąowego [2]. W kierunku wertykalnym dociera zdecydowanie więcej cząstek niż w kierunku horyzontalnym, co spowodowane jest znaczącą różnicą grubości atmosfery. Zależność liczby mionów docierających do Ziemi od kąta padania  $\theta$  można w przybliżeniu określić funkcją  $\cos^2\theta$ , co przedstawiono na Rysunku 2.

## 2.3 Możliwe zastosowanie

Promieniowanie kosmiczne jest wykorzystywane między innymi do kalibracji czasowej detektorów. Przykładem takiego zastosowania jest kalibracja detektora pikselowego w układzie detekcyjnym ATLAS w CERNie [3].

Elektrony pochodzące z promieniowania kosmicznego są wykorzystywane do kalibracji detektora Cherenkov Telescope Array (CTA), który jest teleskopem przeznaczonym do wykrywania i analizowania wysokoenergetycznego promieniowania gamma. Wyznaczana tutaj jest względna skala energii [4].

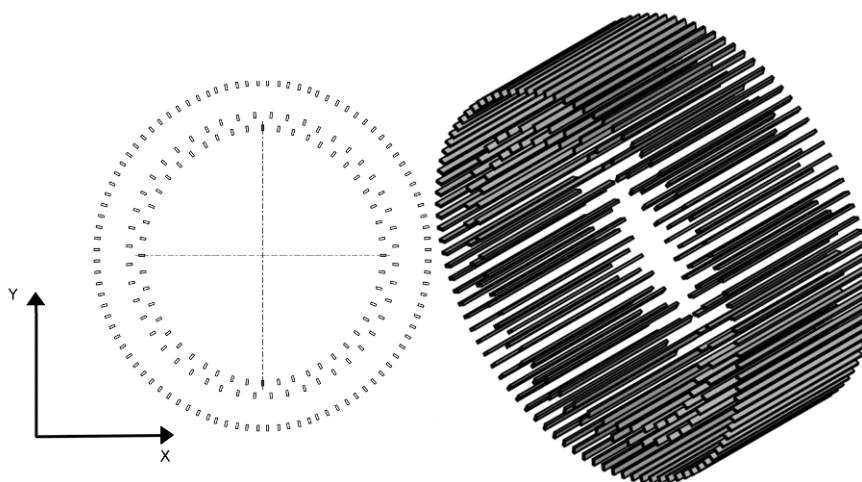
Możliwym zastosowaniem dla promieniowania kosmicznego jest również wykorzystanie go do ciągłego monitorowania i prób przewidywania niebezpiecznych sytuacji dla cywilizacji. Łącząc dane z satelit oraz promieniowania kosmicznego można otrzymać ciągłą informację o sytuacji elektromagnetycznej i intensywności promieniowania w przestrzeni międzyplanetarnej oraz w pobliżu Ziemi, dokładniej w jej magnetosferze. Otrzymywane dane służą do przewidywania burz geomagnetycznych, znacznych wzrostów promieniowania, możliwych zmian środowiska związanych z nagłymi i niezwykle energetycznymi rozbłyskami na Słońcu, a nawet dostarczaniu informacji o wybuchach supernowych [5].

### 3 Kalibracja czasowa detektora J-PET

Rozdział ten zawiera podstawowe informacje dotyczące budowy detektora J-PET oraz propozycję zastosowania promieniowania kosmicznego do jego kalibracji czasowej.

#### 3.1 Tomograf J-PET

Tomograf J-PET ma być wykorzystywany między innymi do obrazowania medycznego oraz, w dziedzinie badań podstawowych, do testowania symetrii dyskretnej. Składa się ze 192 scyntylatorów umieszczonych w 3 warstwach tak, jak zostało to przedstawione na Rysunku 3. Szczegółowe dane zawiera Tabela 1.



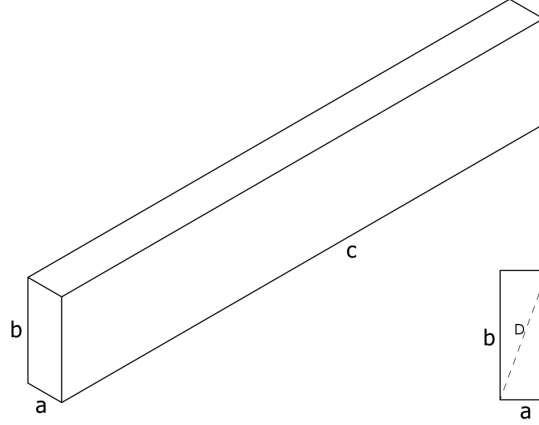
**Rysunek 3:** Rozmieszczenie scyntylatorów w detektorze. Wymiary scyntylatorów przedstawione są na Rysunku 4.

**Tabela 1:** Rozmieszczenie scyntylatorów w detektorze J-PET oznaczonych indeksem  $i$  gdzie  $i=0,1,2,\dots,n-1$ , a  $n$  jest liczbą scyntylatorów w danym segmencie [9].

| Warstwa | Liczba scyntylatorów | Odległość od centrum | Kąt przesunięcia             |
|---------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| I       | 48                   | 42.50 [cm]           | $7.5 \cdot i$ [deg]          |
| II      | 48                   | 45.75 [cm]           | $7.5 \cdot i + 3.75$ [deg]   |
| III     | 96                   | 57.50 [cm]           | $3.75 \cdot i + 1.875$ [deg] |

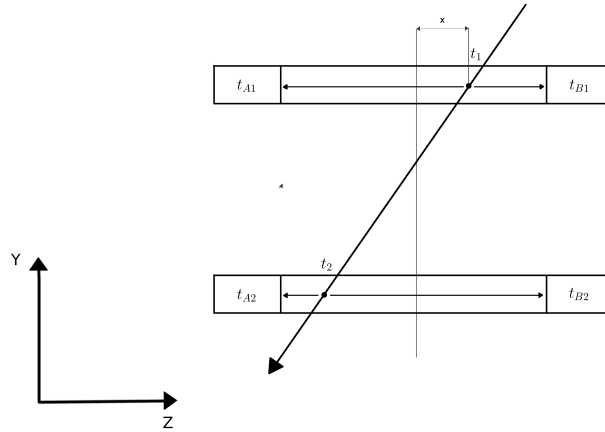
#### 3.2 Idea kalibracji

Idea kalibracji czasowej opiera się na porównaniu zmierzonego czasu przelotu mionu promieniowania kosmicznego między dwoma scyntylatorami z obliczonym czasem przelotu wyznaczonym na podstawie znanego położenia obu detektorów oraz średniej prędkości mionów (Rysunek 5). Scyntylatory są zakończone fotopowielaczami rejestrującymi zdarzenie, którym jest trafienie mionu. Fotopowielacze dostarczają informacji o czasie potrzebnym na dotarcie impulsu do końców



**Rysunek 4:** Wymiary pojedynczego scyntylatora:  $a = 0.7$  cm,  $b = 1.9$  cm,  $c = 50$  cm.

elementów. Informacja ta pozwala na dokładne określenie punktów trafienia w obu scyntylatorach i różnicy czasu pomiędzy tymi zdarzeniami (Równania 3 i 4). Dysponując informacją o odległości pomiędzy trafionymi elementami detektora oraz miejscu uderzenia wzór 3, a także średnią prędkością cząstek można obliczyć oczekiwany czas przelotu  $t^{sr}$ . Z drugiej strony dostępny jest również zmierzony czas przelotu  $t^{exp}$ . Porównanie obu wartości ( $\Delta t$ ) pozwala wyznaczyć ewentualne przesunięcia czasowe w detektorze [7] [8].



**Rysunek 5:** Przykład zarejestrowanego zdarzenia do wykorzystania w procesie kalibracji czasowej.

$$x_i = \frac{v}{2}(t_{Ai} - t_{Bi}) \quad (3)$$

$$\Delta t_i = \frac{(t_{Ai} + t_{Bi})}{2} - \frac{L}{2v} \quad (4)$$

$$t_{ij}^{exp} = t_j - t_i \quad (5)$$

$$\Delta t = t_{12}^{exp} - t_{12}^{sr} \quad (6)$$

## 4 Wyniki symulacji

Przedmiotem pracy jest wykonanie symulacji przelotu promieniowania kosmicznego przez detektor J-PET w celu wyznaczenia liczby spodziewanych koincydencji. Umożliwia to określenie, czy przedstawiona idea kalibracji może być wykorzystana w praktyce. Symulacja została przeprowadzona przy jednoczesnym spełnieniu obu poniższych założeń:

1. Każdy mion promieniowania kosmicznego przechodzący przez scyntylator jest rejestrowany przez detektor z prawdopodobieństwem 100%.
2. Liczba mionów promieniowania kosmicznego przechodząca przez pojedynczy scyntylator jest proporcjonalna jedynie do pola rzutu tego scyntylatora na płaszczyznę normalną do kierunku wertykalnego.

### 4.1 Opis programu

Wygenerowane zostały punkty z rozkładu jednorodnego oraz kierunki przelotu promieniowania kosmicznego zgodnie z rozkładem opisanym Równaniem 7. Sam rozkład został przybliżony wielomianem (Równanie 8), w celu łatwiejszej symulacji zdarzeń. Dopasowanie rozkładów 7 i 8 pokazane jest na Rysunku 2. W płaszczyźnie horyzontalnej jest on jednorodny, natomiast w kącie  $\theta$  jest on zgodny z rozkładem docierającego do powierzchni ziemi promieniowania.

$$Z(\theta) = -25380 + 64915684 \cos^2 \theta \frac{1}{cm^2 sr} \quad (7)$$

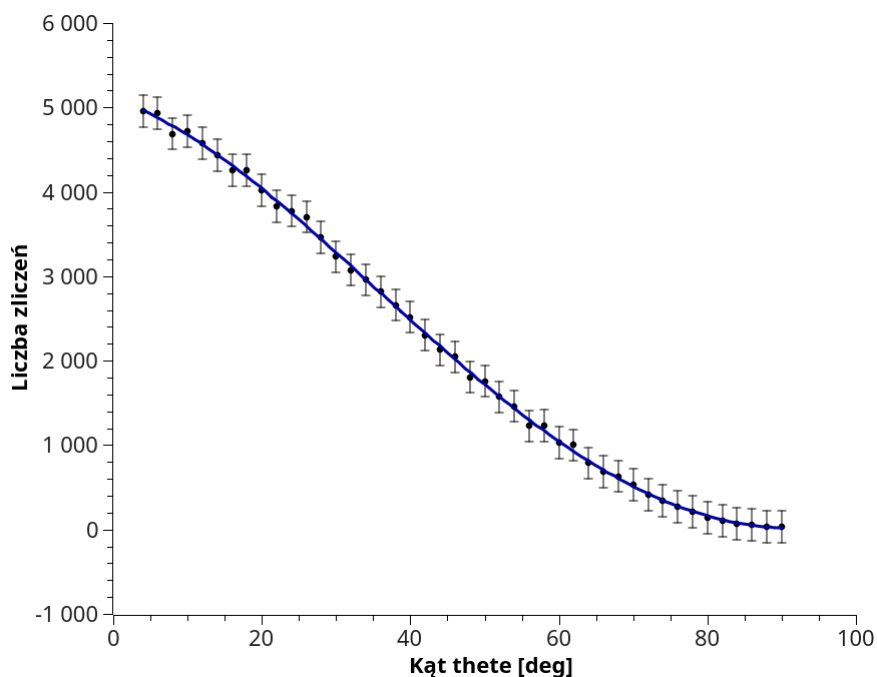
$$Y(\theta) = 78987483 - 630481 \theta - 15940 \theta^2 + 147.36 \theta^3 \frac{1}{cm^2 sr} \quad (8)$$

Symulowany jest rozkład dany równaniem 8. Przy wygenerowanych  $10^5$  punktów, prezentuje się on jak na Rysunku 6. W celu weryfikacji działania programu dopasowano wielomian do wygenerowanego rozkładu (Tabela 2).

**Tabela 2:** Współczynniki znormalizowanego wielomianu postaci  $Ax^3+Bx^2+Cx+D$ , wraz z błędami.

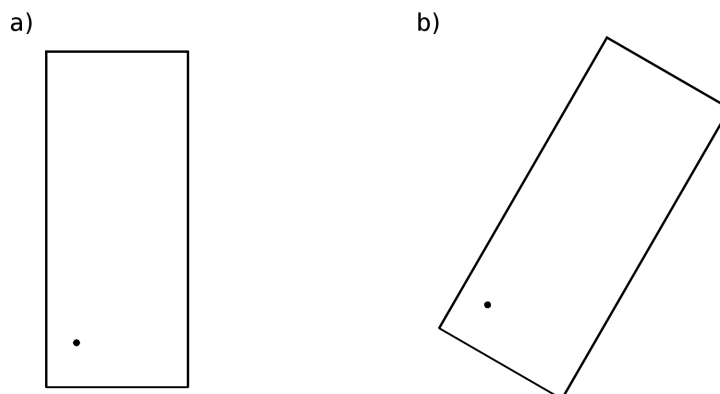
| Współczynnik           | Wielomian użyty do generowania | Wielomian dopasowany      |
|------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| $A \frac{1}{scm^2 sr}$ | $4.76 \cdot 10^{-8}$           | $5.070(73) \cdot 10^{-8}$ |
| $B \frac{1}{scm^2 sr}$ | $-5.14 \cdot 10^{-6}$          | $-5.50(38) \cdot 10^{-6}$ |
| $C \frac{1}{scm^2 sr}$ | $-2.04 \cdot 10^{-4}$          | $-1.96(13) \cdot 10^{-4}$ |
| $D \frac{1}{scm^2 sr}$ | $2.55 \cdot 10^{-2}$           | $2.55(13) \cdot 10^{-2}$  |



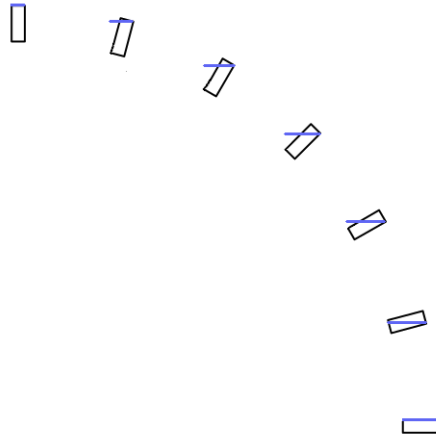


**Rysunek 6:** Widmo generowanego promieniowania (punkty) wraz z dopasowaniem wielomianu (linia).

Rozkład promieniowania kosmicznego dany jest na  $\text{cm}^2$  płaskiej powierzchni, czego uwzględnienie jest konieczne przy symulowaniu promieniowania. Generowanych jest sześć wartości: określające punkt (id scyntylatora oraz współrzędne X i Y), kierunek promieniowania kosmicznego ( $\theta$  zgodny z zadanym wielomianem - odległość zenitalna, kąt  $\phi$  - długość azymutalna) oraz losowa liczba z przedziału  $[0,1]$ . Początkowo generowane jest id rozpatrywanego scyntylatora, następnie generowany punkt  $(x,y)$  w obrębie pola powierzchni pojedynczego elementu umieszczonego tymczasowo w początku układu współrzędnych. Każdemu id scyntylatora przypisany jest promień oraz kąt obrotu, więc możliwe jest przesunięcie i obrót wygenerowanego punktu (Rysunek 7).



**Rysunek 7:** Podpunkt a) przedstawia wygenerowany punkt w detektorze dla danego promienia, b) obrazuje obrócony detektor o odpowiedni kąt w zależności od wcześniej wygenerowanego id.



**Rysunek 8:** Powierzchnia scyntylatorów w rzucie od góry oznaczona niebieskim kolorem.

Ze względu na generowanie punktów z rozkładu jednorodnego, chcąc uwzględnić efekt ilości promieniowania na powierzchnię, wybierane są punkty w scyntylatorach z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do ich powierzchni w rzucie z góry (Rysunek 8). Ponieważ efektywna długość scyntylatora jest stała, pole rzutu jest proporcjonalne do efektywnej szerokości.

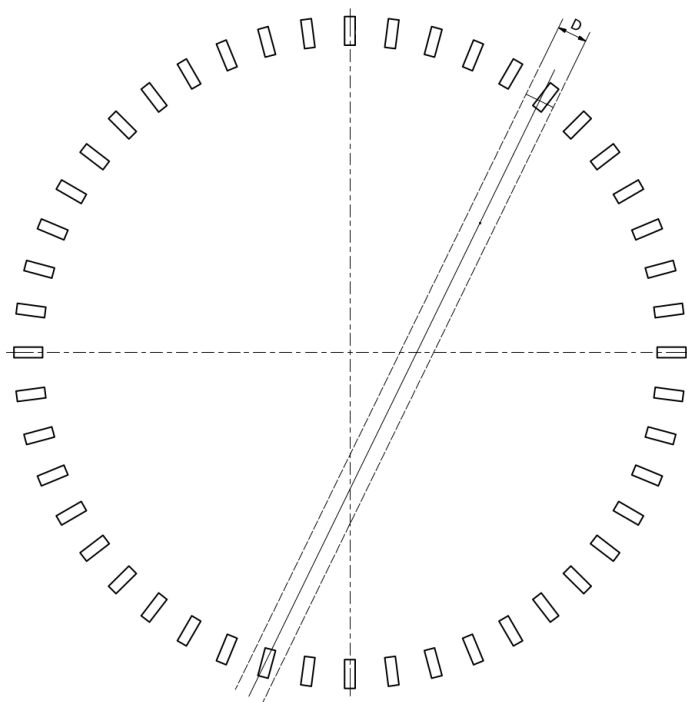
Wykorzystując wygenerowane współrzędne  $(x, y)$  oraz kąt  $\theta$  możliwe jest wyznaczenie prostej odpowiadającej trajektorii przelotu cząstki. W celu przyspieszenia symulacji, wyszukiwanie trafionych scyntylatorów odbywa się jedynie w zakresie umożliwiającym mionowi trafienie w element detektora w płaszczyźnie XY. Zakresem tym jest przekątna jednego scyntylatora (Rysunek 4 i 9). Wyznaczenie potencjalnego zakresu trafienia optymalizuje pracę programu, ponieważ nie jest konieczne porównywanie trajektorii mionu z położeniem każdego elementu detektora. Ponieważ tor cząstki przechodzącej w obszarze scyntylatorów w płaszczyźnie XY nie musi przecinać scyntylatora w płaszczyźnie YZ, niezbędne jest wykonanie testu w obu płaszczyznach.

Etapy sprawdzenia czy mion o danej trajektorii trafia w scyntylator:

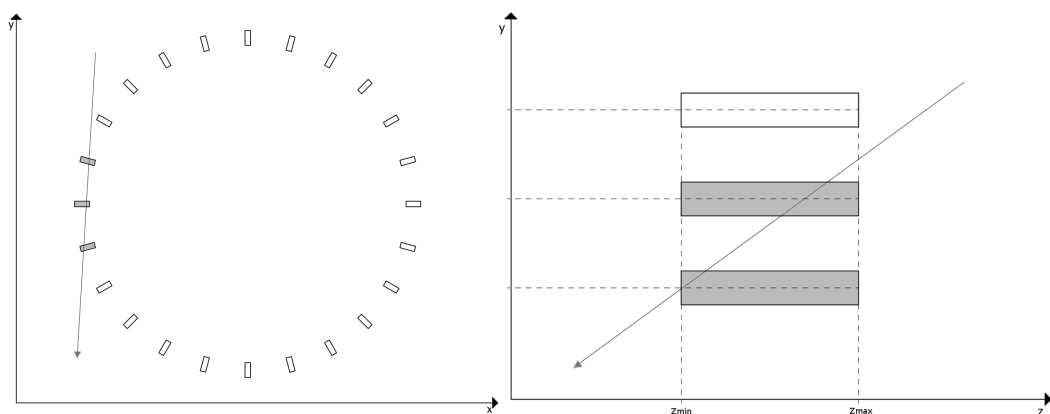
- potencjalny obszar trafienia (Rysunek 9);
- test w płaszczyźnie XY (Rysunek 10);
- test w płaszczyźnie ZY (Rysunek 10).

Rejestrowana jest liczba trafień cząstek promieniowania kosmicznego w danych scyntylatorach.

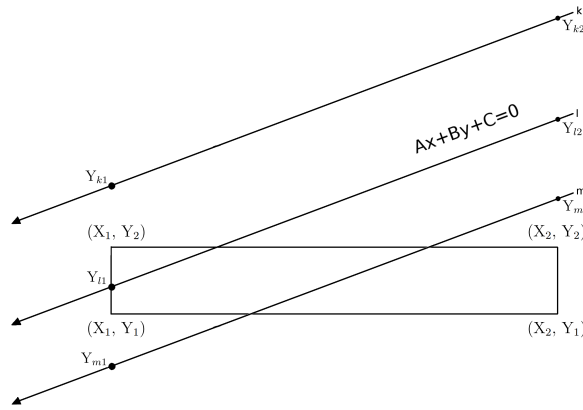
Trafienie w scyntylator (w płaszczyźnie XY lub YZ) oznacza przecięcie trajektorii mionu z prostokątem (scyntylatorem) w przestrzeni dwuwymiarowej (Rysunek 11). Test polega na podstawieniu współrzędnych początku i końca scyntylatora  $(X_1, X_2)$  wierzchołków do równania prostej, a następnie weryfikacji, czy istnieje co najmniej jedna mniejsza i większa wartości  $Y$  obliczona z równania prostej od wartości  $Y_i$  każdego z czterech wierzchołków.



**Rysunek 9:** Przekrój detektora wraz z wstępnym zakresem akceptacji zdarzenia.



**Rysunek 10:** Po lewej stronie: test w płaszczyźnie XY. Po prawej: test w płaszczyźnie YZ. Trafione scyntylatory zaznaczono na szaro.

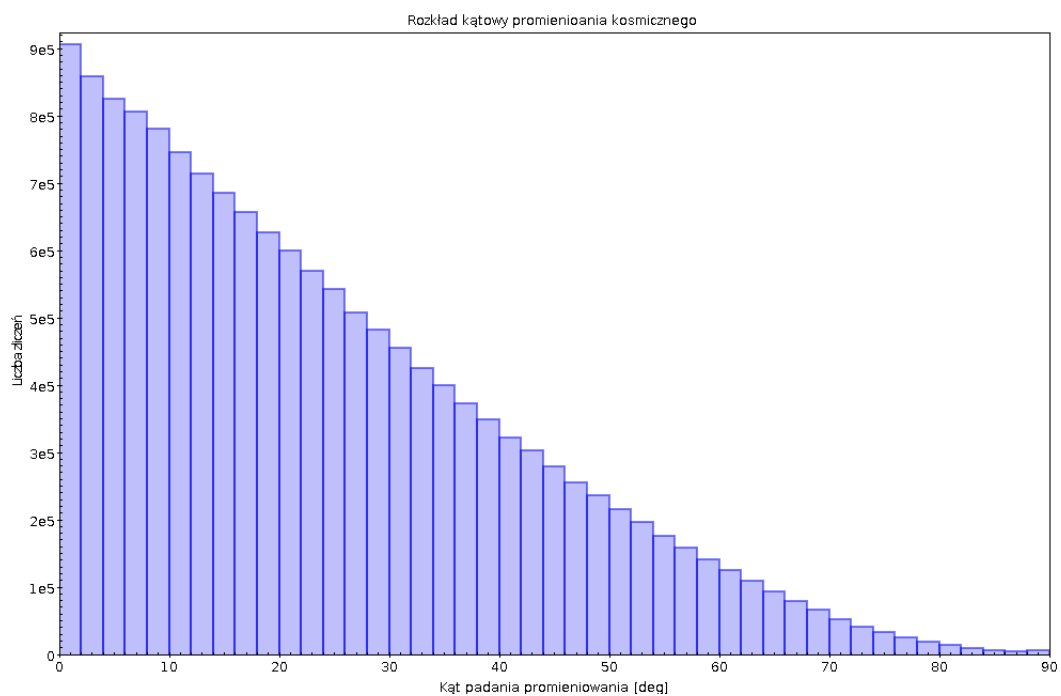


**Rysunek 11:** Promienie l oraz m przecinają scyntylator ponieważ odpowiednio  $( Y_{l1} < Y_2 \wedge Y_{l2} > Y_2 )$  oraz  $( Y_{m1} < Y_1 \wedge Y_{m2} > Y_1 )$ .

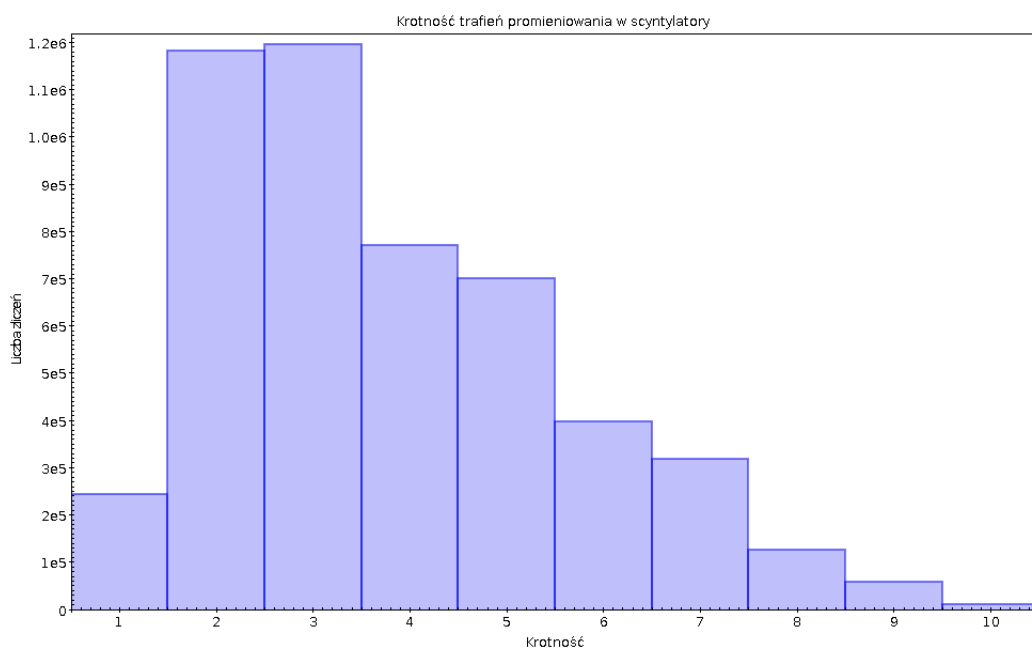
## 4.2 Otrzymane wyniki

Zgodnie ze schematem przedstawionym w poprzednim podrozdziale wygenerowano  $5 \cdot 10^6$  promieni kosmicznych przechodzących przez detektor J-PET.

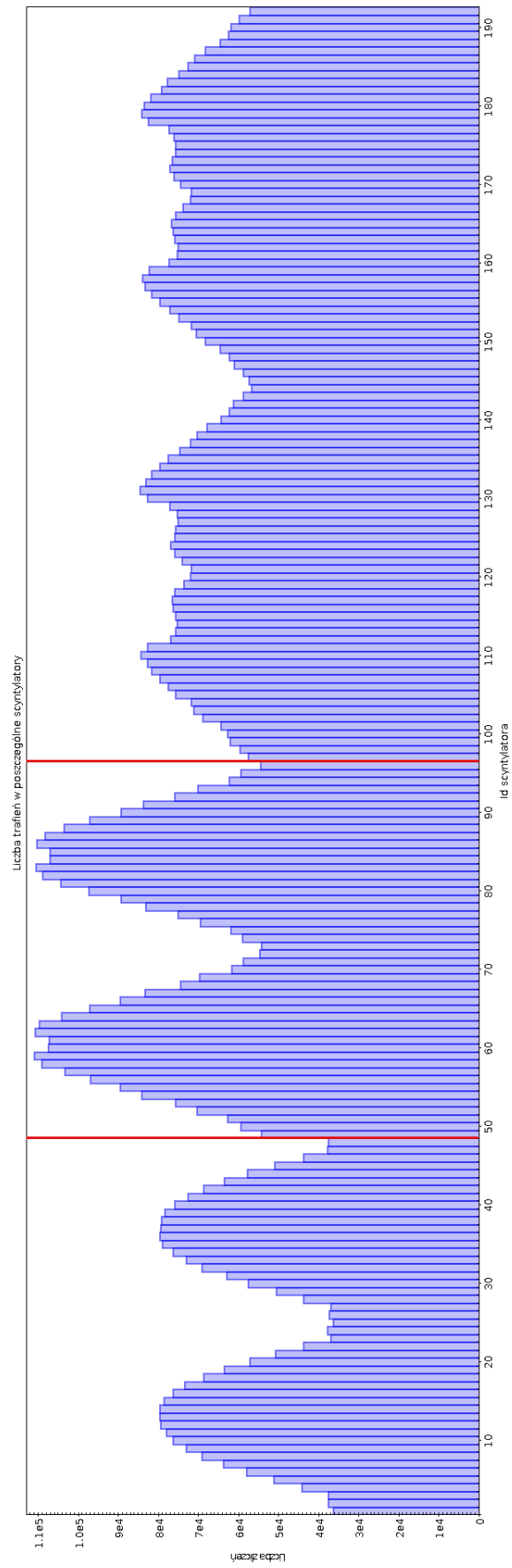
Wygenerowany rozkład kątowy promieniowania kosmicznego jest przedstawiony na Rysunku 12. Następnie wyznaczono krotności scyntylatorów trafionych przez wygenerowane promieniowanie (Rysunek 13). Biorąc pod uwagę stosunkowo duże pokrycie scyntylatorów w płaszczyźnie XZ (Rysunek 3) istnieje małe prawdopodobieństwo przelotu promieniowania tylko przez jeden z detektorów, co jest widoczne dla krotności 1 na Rysunku 13. Zdarzenia, dla których krotności trafień scyntylatorów są większe niż 9, stanowią jedynie 0.18 % wygenerowanych zdarzeń. Rysunek 15 przedstawia rozkład liczby wygenerowanych punktów w poszczególnych scyntylatorach. Rozkład liczby trafionych scyntylatorów przedstawiony został na Rysunku 14. Widoczny jest spadek liczby trafień dla scyntylatorów ustawionych wertykalnie w płaszczyźnie XY. Ponieważ potencjalna kalibracja czasowa detektora w oparciu o promieniowanie kosmiczne zależy od koincydencji sygnałów od dwóch lub więcej scyntylatorów, rozkłady liczby zliczeń dla poszczególnych krotności zostały przedstawione w Dodatku (Rysunki 21-25). Na podstawie uzyskanych wyników oszacowano, że scyntylator z najmniejszą liczbą zliczeń dla krotności większych niż 1 rejestruje 0.61 % całego promieniowania przechodzącego przez elementy detektora J-PET. Jest to zatem maksymalny odsetek promieniowania kosmicznego rejestrowanego przez ten detektor, który może być wykorzystany do kalibracji czasowej.



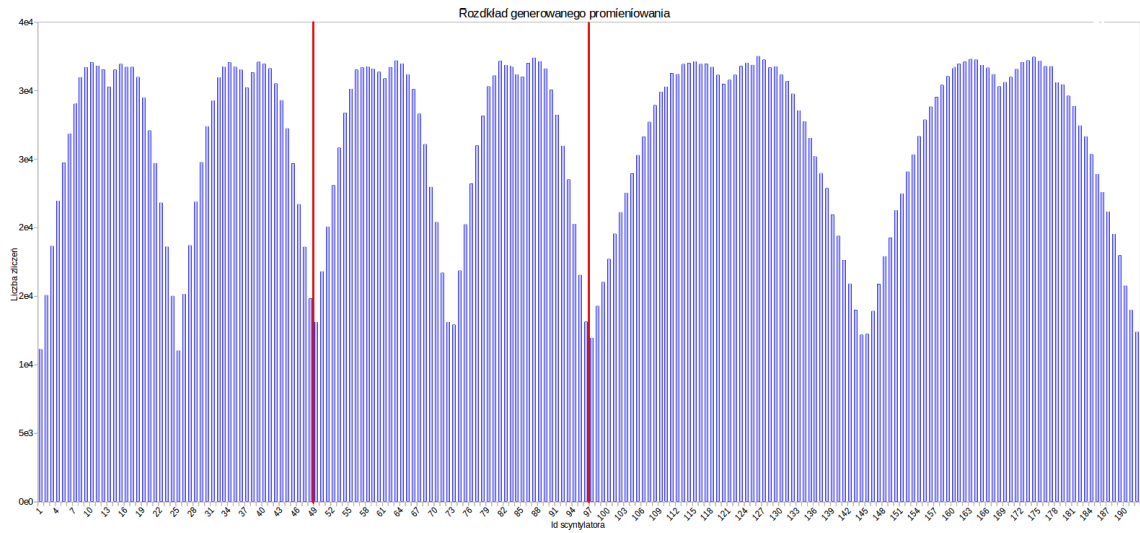
Rysunek 12: Rozkład kąta theta padającego promieniowania kosmicznego.



Rysunek 13: Krotność trafień wygenerowanego promieniowania.



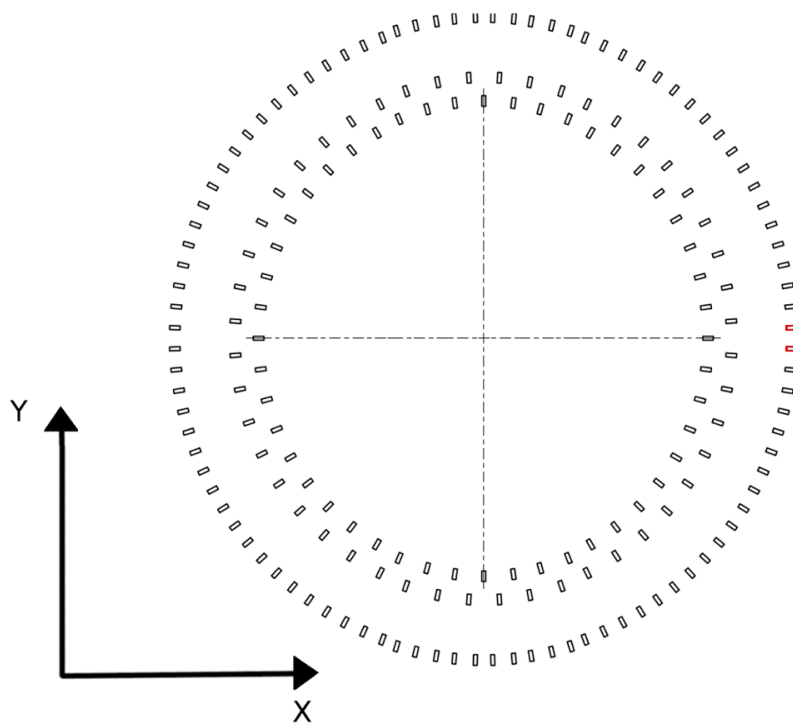
Rysunek 14: Liczba trafień w poszczególne scyntylatory.



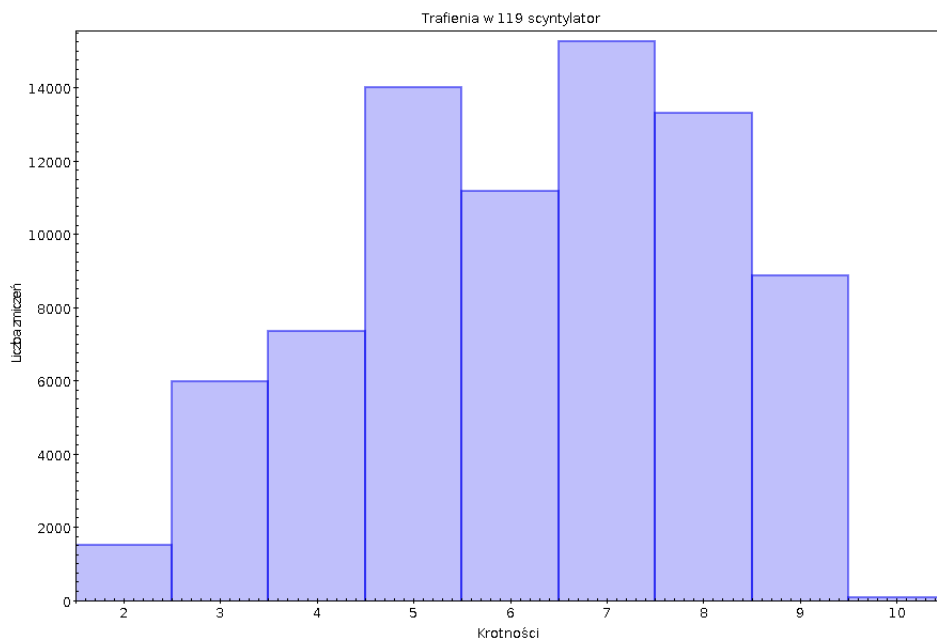
**Rysunek 15:** Rozkład punktów wygenerowanych w scyntylatorach. Pionowe czerwone linie oddzielają scyntylatory z kolejnych warstw detektora.

### 4.3 Weryfikacja uzyskanych wyników

Charakterystyczna jest liczba koincydencji dla detektorów skrajnych, ułożonych horyzontalnie (Rysunek 16). Przykładowo, dla dwóch scyntylatorów w ostatniej warstwie: 119 i 120. Nie odnotowano pojedynczych trafień, lecz nieliczną grupę zdarzeń dla 2 i 10 trafień. Maksimum koincydencji przypada na nieparzyste, pięciokrotne i siedmiokrotne zdarzenia. W przypadku obu detektorów ostateczne wyniki są bardzo podobne. Zauważalną rolę odgrywa symetria układu, ponieważ oba detektory są położone w sposób identyczny względem osi X. Analogicznie wygląda wykres dla zdarzeń mających miejsce w jednym lub drugim elemencie (Rysunek 19), natomiast odmienny jest już efekt przy warunku przelotu jednocześnie przez oba scyntylatory (Rysunek 20).

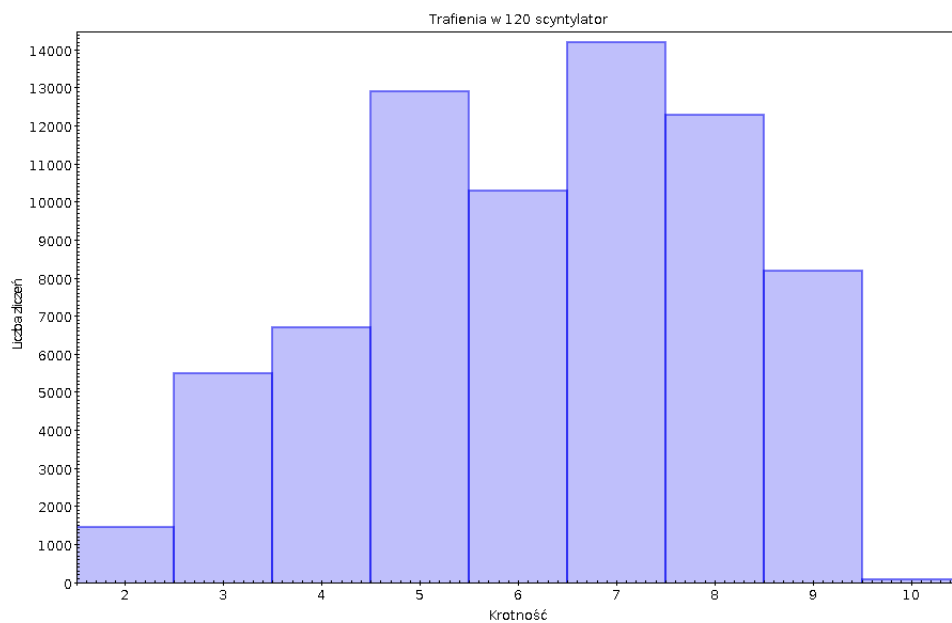


**Rysunek 16:** Przekrój detektora z zaznaczonymi na czerwono skrajnymi scyntylatorami o id równym 119 i 120.

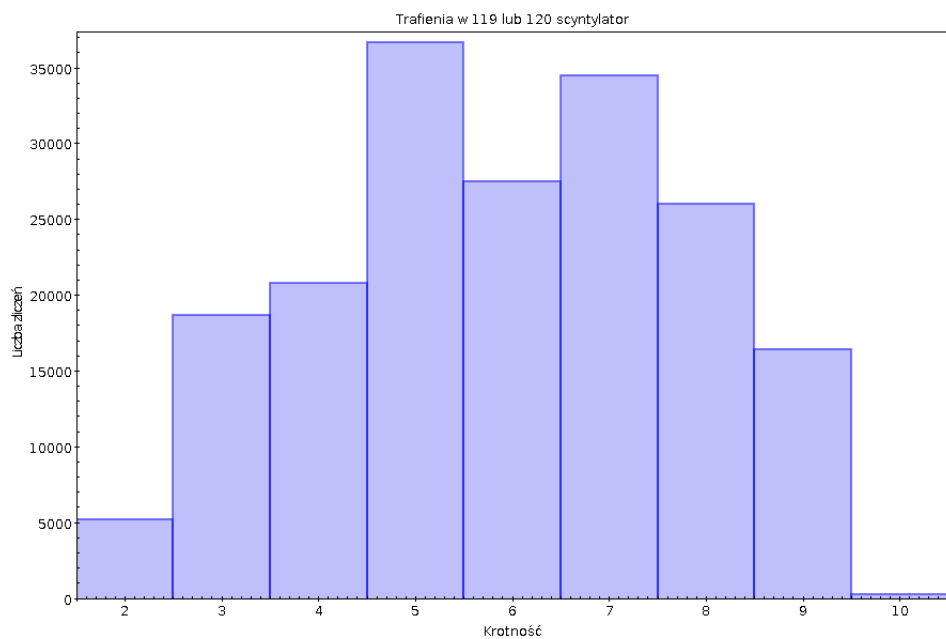


**Rysunek 17:** Krotność trafień wygenerowanego promieniowania w 119 scyntylatorze.

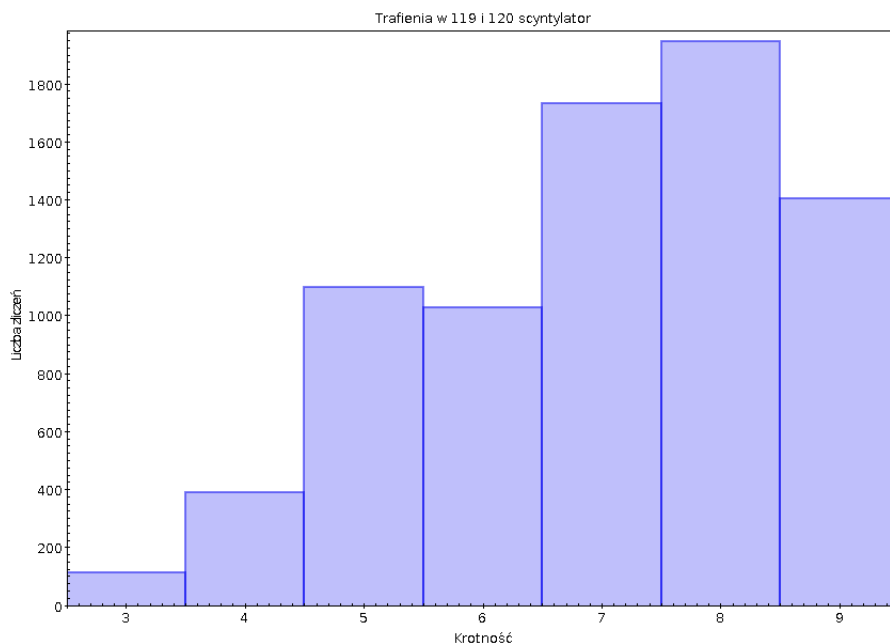




**Rysunek 18:** Krotność trafień wygenerowanego promieniowania w 120 scyntylatorze.



**Rysunek 19:** Krotność trafień dla 119 lub 120 scyntylatora.

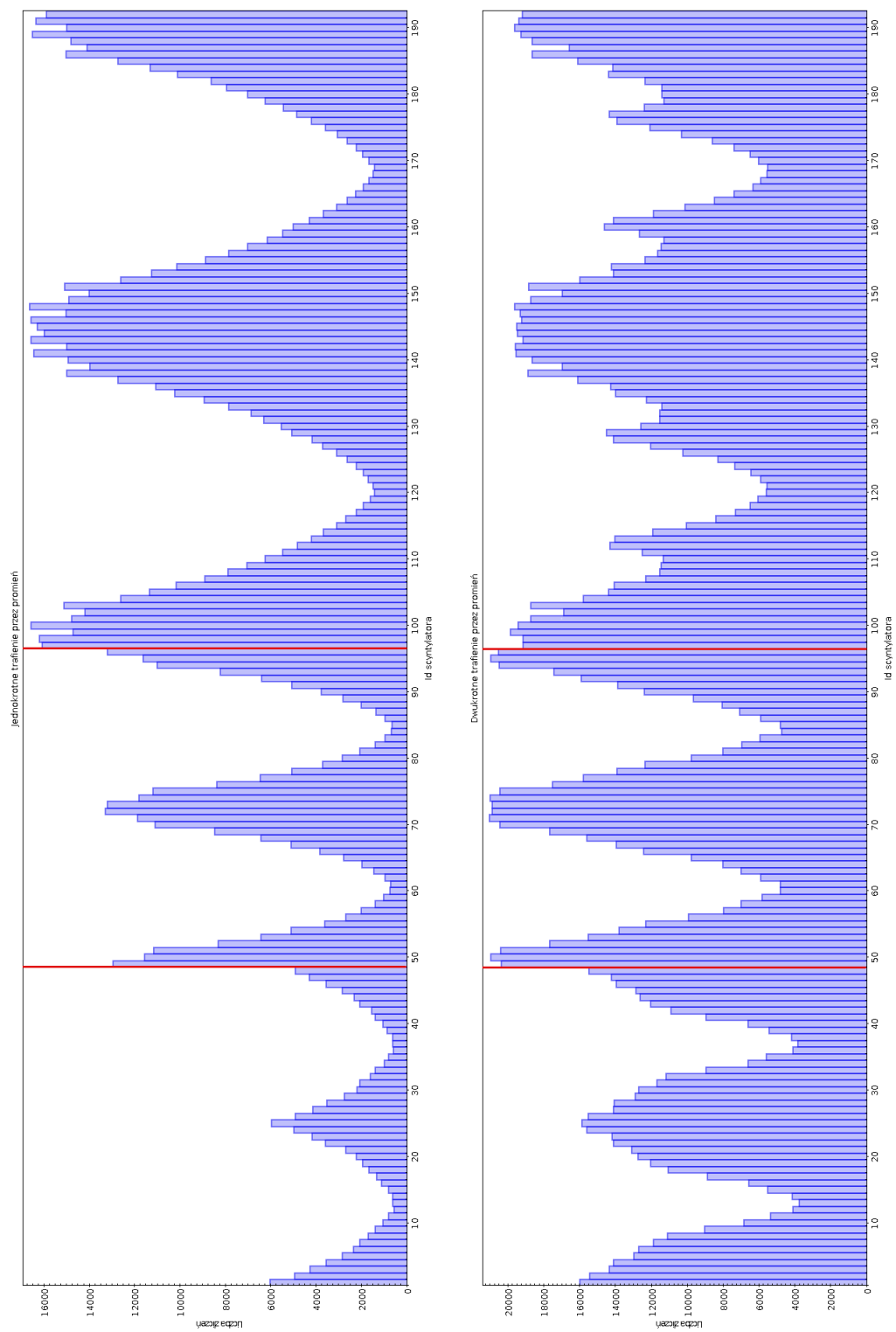


**Rysunek 20:** Krotność trafień dla 119 i 120 scyntylatorze.

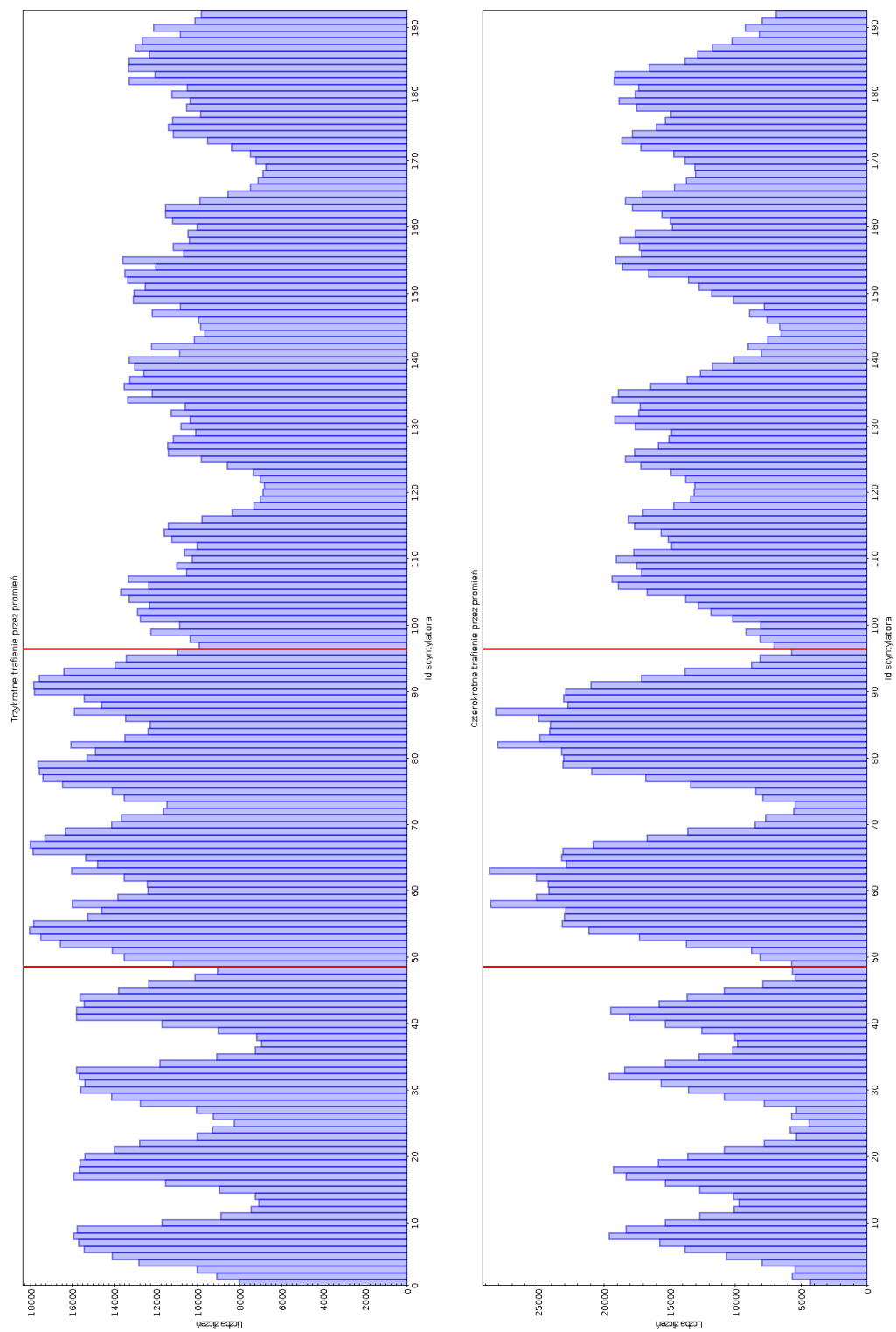
## 5 Podsumowanie

Uzyskane wyniki symulacji pokazują oczekiwane rozkłady promieniowania kosmicznego rejestrowanego przez detektor J-PET. Przy przyjętych założeniach oszacowano, że 0.61% zarejestrowanego promieniowania może służyć do kalibracji czasowej detektora. Zgodnie z oczekiwaniami, ze względu na ułożenie pasków scyntylacyjnych największa liczba rejestrowanych cząstek występuje po obu stronach detektora, natomiast najmniejsza - w obszarze centralnym. Ewentualne polepszenie wyników można byłoby uzyskać poprzez uwzględnienie w symulacjach prawdopodobieństwa reakcji mionów z detektorem w zależności od efektywnej długości drogi przelotu przez materiał detektora.

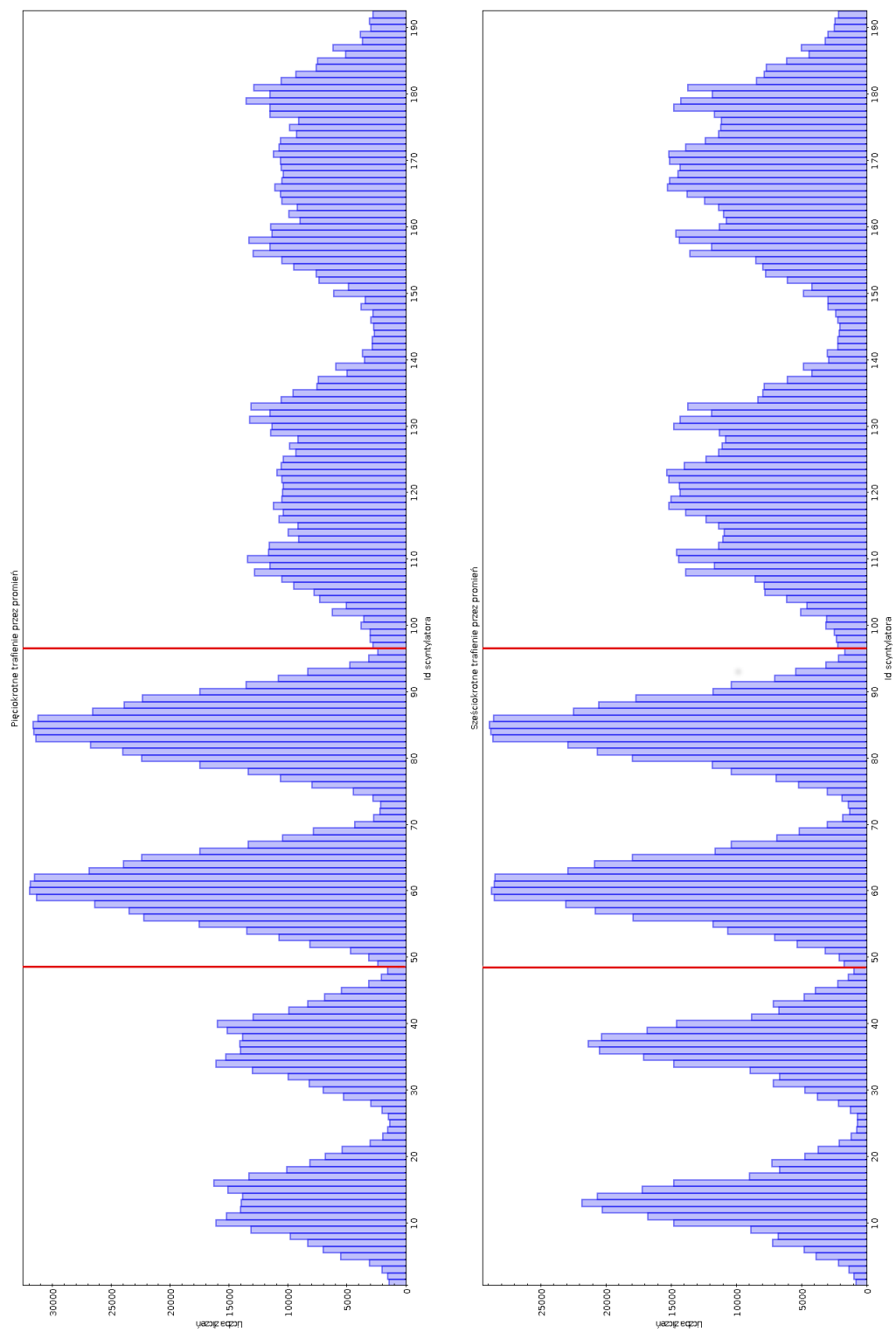
## 6 Dodatek



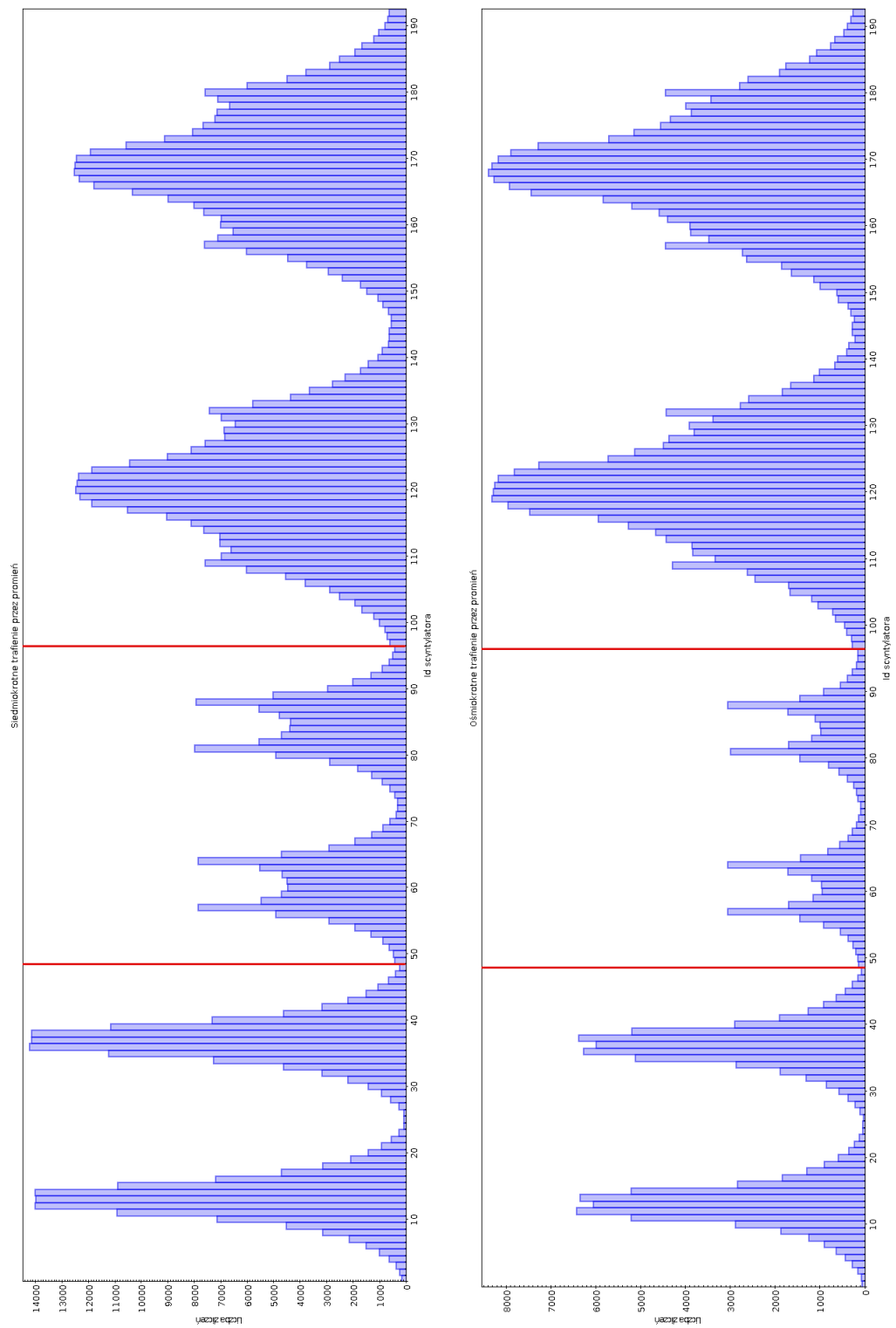
Rysunek 21: Pojedyncze i podwójne trafienia w scyntylatory.



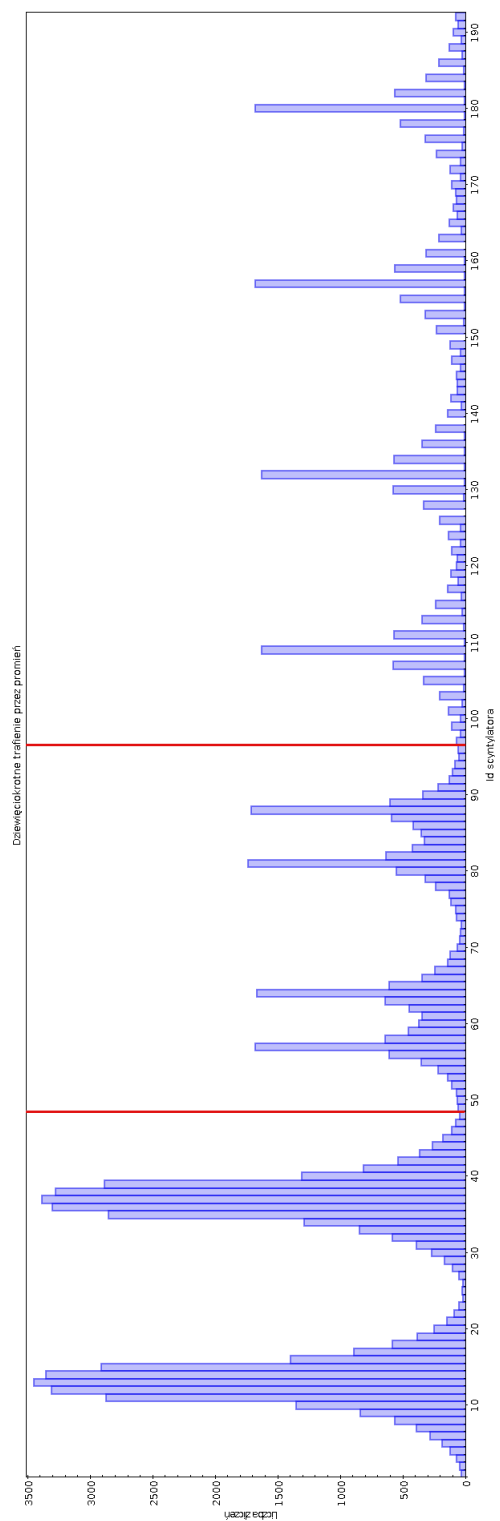
Rysunek 22: Trzykrotne i czterokrotne trafienia przez pojedynczy promień.



**Rysunek 23:** Pięciodrotne i sześciokrotne trafienia przez pojedynczy promień.



**Rysunek 24:** Siedmiokrotne i ośmiokrotne trafienia przez pojedynczy promień.



Rysunek 25: Dziewięciokrotne trafienia przez pojedynczy promień.

## 7 Literatura

- [1] D. H. Perkins (2012). Wstęp do fizyki wysokich energii. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN
- [2] A. N. Dmitrieva, R. P. Kokoulin, Kompaniets : Measurements of integral muon intensity at large zenith angles, Phys. Atom. Nucl., 69, 865, doi:10.1134/S1063778806050097, (2006).
- [3] A. Ibragimov, PoS(VERTEX 2010)048 "Timing behavior of the ATLAS Pixel Detector in calibration, cosmic-ray and collision data"
- [4] R.D. Parsons, J.A. Hinton, H. Schoorlemmer arXiv:1608.04249
- [5] Astrophysics and Space Science, Volume 208, Issue 1, pp.55-68
- [6] M. Zreda , D. Lal, J. Clem ,D. Desilets : "Development of energy-dependent scaling for cosmic-ray neutron intensities and for in- situ cosmogenic nuclide production rates Marek Zreda - Arizona Devendra"
- [7] D. Kamińska, A. Gajos, E. Czerwiński, et al. Eur. Phys. J. C (2016) 76: 445.
- [8] E. Czerwiński, P. Moskal, M. Silarski, Patent: A method for calibration of TOF-PET detectors using cosmic radiation. P 405183, PCT/EP2014/068369
- [9] M. Silarski, E. Czerwiński, T. Bednarski et al. Bio-Algorithms and Med-Systems 10(1), 19-25 (2014)