

# Wyznaczenie rozkładu kąta między płaszczyznami rozpraszania - badanie względnej polaryzacji kwantów gamma

Ksymena Poradzisz

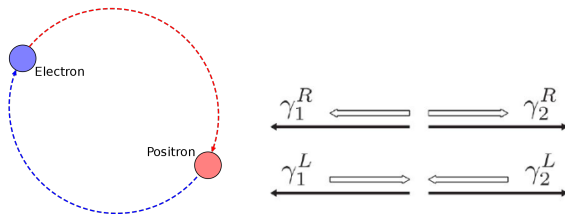
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego

30.07.2021r.

# Część I

## Teoria

**Splątanie kwantowe** - zjawisko fizyczne, gdzie stany kwantowe dwóch lub większej ilości cząstek są ze sobą powiązane i nie mogą być opisywane niezależnie od siebie



**Obraz:** Po lewej stronie jest stan układu przed anihilacją - pozytronium. Po prawej stronie znajduje się stan układu po anihilacji - Dwa kwanty gamma. Czarne strzałki symbolizują kierunek lotu fotonów, a białe strzałki ich spin.

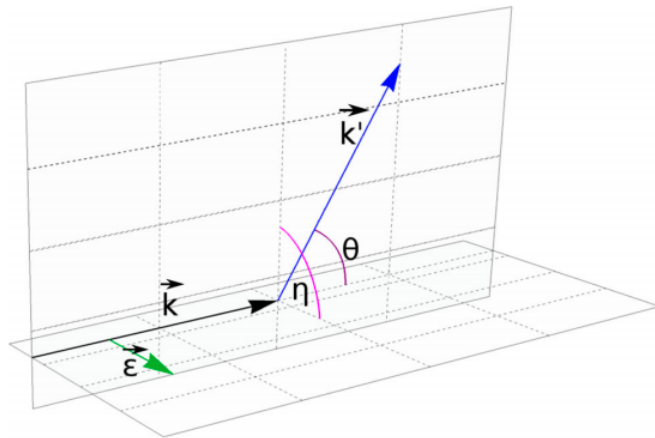
Całkowity spin para-pozytronium  $S = 0$ , dlatego kwanty powstałe w wyniku anihilacji również muszą mieć sumaryczny spin  $S = 0$ .

Dzięki **rozproszeniu Comptonowskiemu** możemy analizować kąty między płaszczyznami rozproszenia kwantów gamma, a w związku z tym  $\Rightarrow$  **kąty między płaszczyznami polaryzacji**  
Rozkład kąta rozproszenia fotonu na elektronie jest zadany przez wzór Kleina-Nishiny:

$$\frac{d\sigma(E, \theta, \eta)}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left( \frac{E'}{E} \right)^2 \left( \frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \eta \right), \quad (1)$$

$$E'(E, \theta) = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}, \quad (2)$$

gdzie:  
 $\sigma$  - przekrój czynny,  
 $d\Omega$  - infityzymalnie mały kawałek przestrzeni,  
 $r_0$  - klasyczny promień elektronu,  
 $E$  - Energia pierwotnego fotonu,  
 $E'$  - Energia rozproszonego fotonu,  
 $\theta$  - Kąt rozproszenia Comptonowskiego,  
 $\eta$  - Kąt między płaszczyznami rozpraszania oraz między płaszczyznami polaryzacji

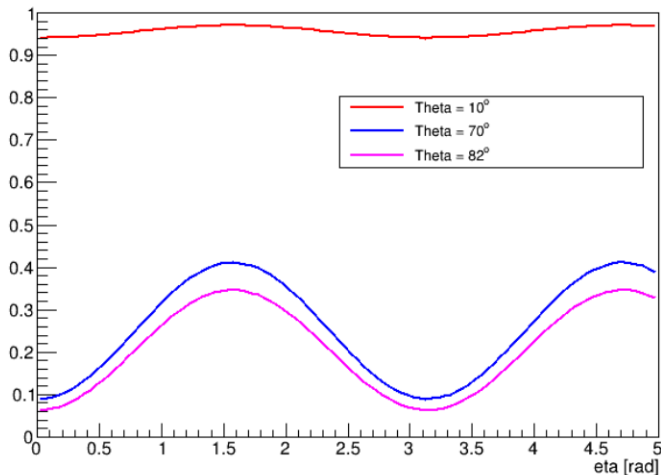


**Obraz:** Schematyczny rysunek rozproszenia Comptonowskiego.

$\vec{k}$  to wektor falowy pierwotnego kwantu gamma,  $\vec{\epsilon}$  to wektor polaryzacji kwantu. Te dwa wektory wyznaczają płaszczyznę polaryzacji.

Wektor  $\vec{k}'$  to wektor falowy rozproszonego kwantu gamma. Wektory  $\vec{k}$  i  $\vec{k}'$  wyznaczają płaszczyznę rozproszenia.

Dla kwantów o energii 511 keV to dla kąta  $\theta = 81.66^\circ$  uzyskujemy najlepszą widoczność zmiany kąta  $\eta$ .



Obraz: Rozkład Kleina-Nishiny dany wzorem (1) dla różnych kątów rozproszenia.

## Część II

### Analiza Danych - Monte Carlo

Wszystkie oznaczenia z końcówką *\_mc* są dostępne jedynie w symulacji Monte Carlo.

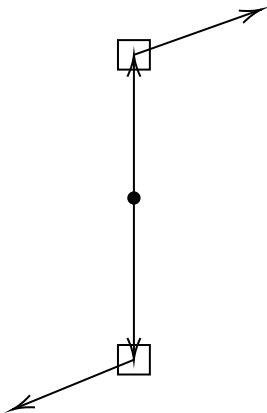
- ❶ `vtx_id_mc` - Dzięki temu można zobaczyć czy jakaś grupa hitów pochodzi z jednego zdarzenia (np. rozpadu  $p$ -Ps na 2 kwanty gamma). Jeżeli dwa zdarzenia pochodzą z tego samego zdarzenia to ich `vtx_id_mc` będzie taki sam.
- ❷ `hit_type_mc` - pokazuje typ zdarzenia, z którego pochodziły dane hity:
  - ❶ 1 - kwant deekscytacyjny
  - ❷ 2 - rozpad na dwa kwanty gamma
  - ❸ 3 - rozpad na 3 kwanty gamma
  - ❹ +100 - rozproszenie

np. `hit_type_mc = 102` odpowiada hitowi kwantu rozproszonemu z kwantu powstałego w rozpadzie na dwa kwanty gamma.

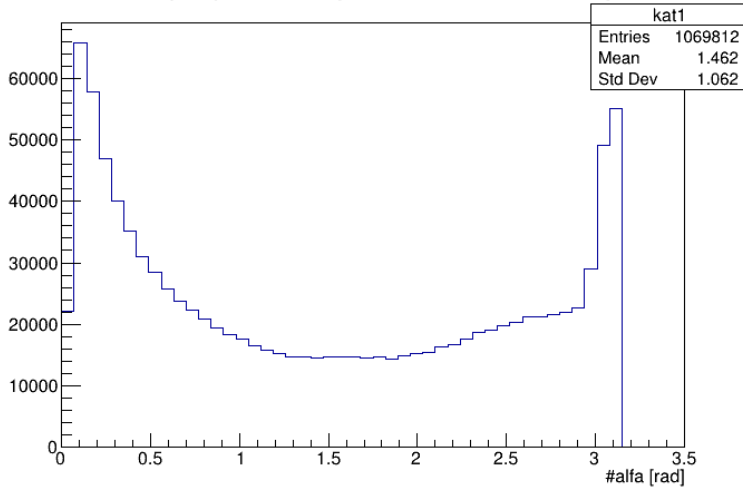


Na samym początku analiza polegała na analizowaniu danych jedynie pochodzących z symulacji.

**CEL:** Znalezienie zdarzeń z rozpadem na 2 kwanty gamma, z których każdy rozprasza się jedynie raz.

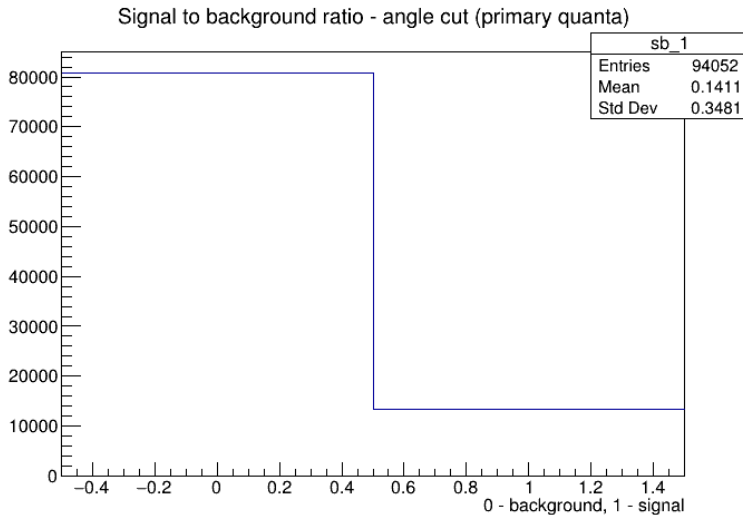


### Kat pod jakim zostały zaobserwowane dwa hity



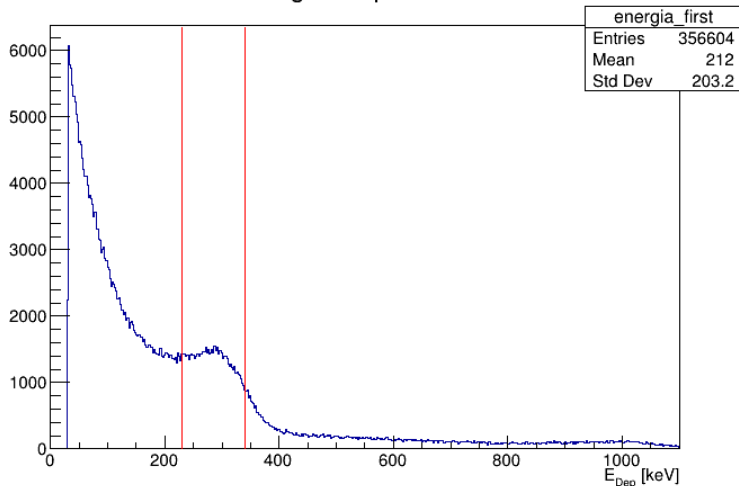
**Obraz:** Rozkład kąta dla dwóch hitów.

Pierwsze cięcie: kąt między dwoma hitami musi być większy od 3.03 radiana.

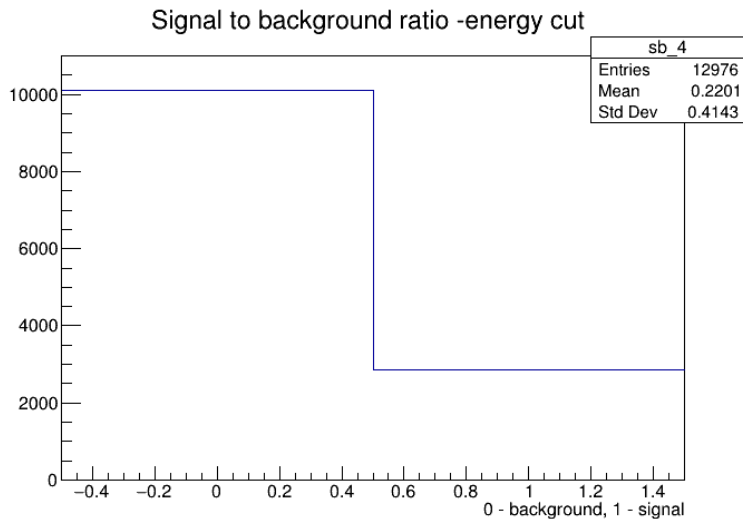


Obraz: Ilość zdarzeń sygnału oraz zdarzeń tła po cięciu na kącie.  
 Stosunek sygnału do tła wynosi:  $\frac{s}{b} = 16.43\%$

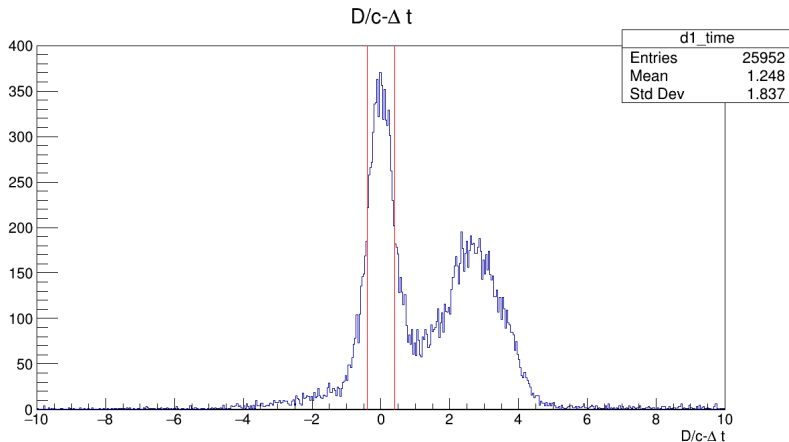
Energia zdeponowana



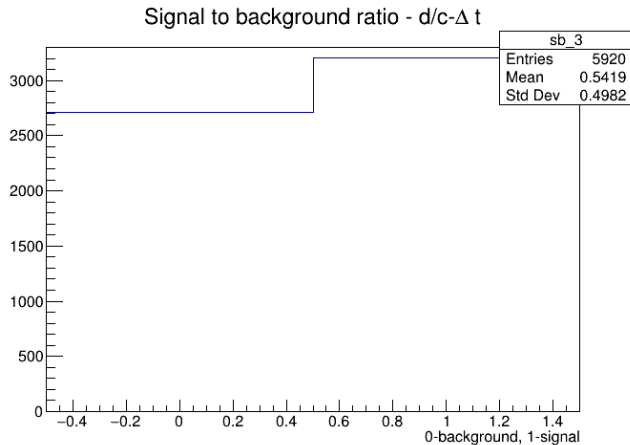
Obraz: Energia zdeponowana wszystkich kwantów zaobserwowanych przez detektor. Drugie cięcie:  $E_{DEP} \in (230, 340)$  keV



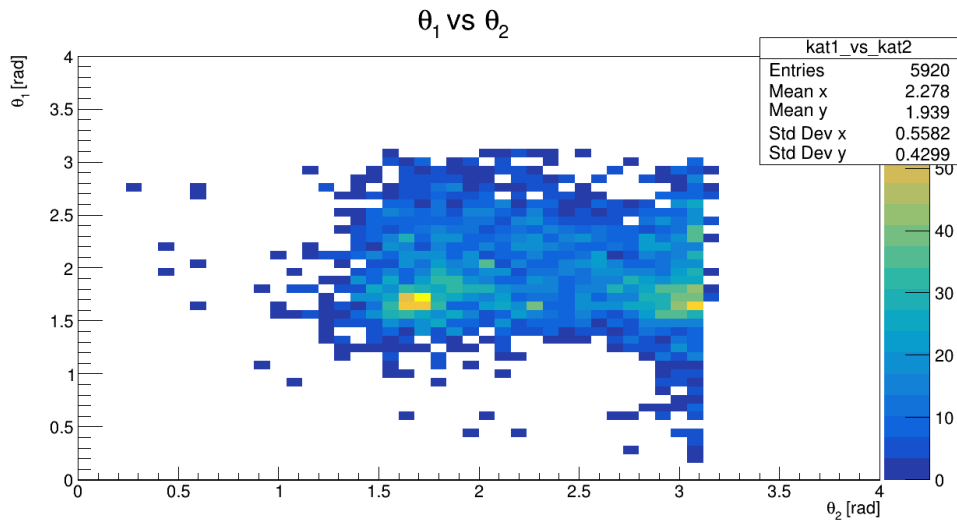
Obraz: Ilość zdarzeń sygnału oraz zdarzeń tła po cięciu na energii.  
Stosunek sygnału do tła wynosi:  $\frac{s}{b} = 28.22\%$



**Obraz:** Histogram  $D/c - \Delta t$ , gdzie  $D$  - odległość między dwoma hitami,  $c$  - prędkość światła,  $\Delta t$  - różnica czasów między dwoma hitami. Dla dwóch hitów sygnału to wyrażenie powinno być równe 0. Przez niepewności doświadczalne obserwujemy rozmycie wokół zera. Przez to cięcie zostało wybrane w zakresie Histogram  $D/c - \Delta t$ , gdzie  $D$  - odległość między dwoma hitami,  $c$  - prędkość światła,  $\Delta t$  - różnica czasów między dwoma hitami. Dla dwóch hitów sygnału to wyrażenie powinno być równe 0. Przez niepewności doświadczalne obserwujemy rozmycie wokół zera. (-0.4, 0.4).



**Obraz:** Ilość zdarzeń sygnału oraz zdarzeń tła po cięciu na wyrażeniu  $D/c - \Delta t$ . Stosunek sygnału do tła wynosi:  
 $\frac{s}{b} = 118.29\%$



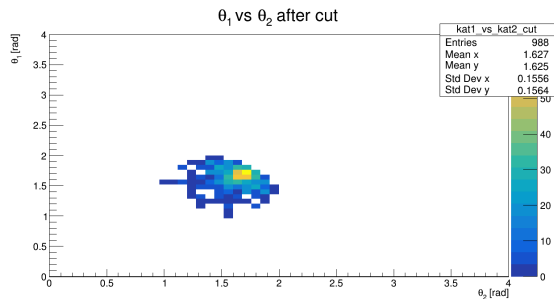
Obraz: Histogram przedstawiający rozkład kąta rozpraszania jednego kwantu względem drugiego.



# Monte Carlo

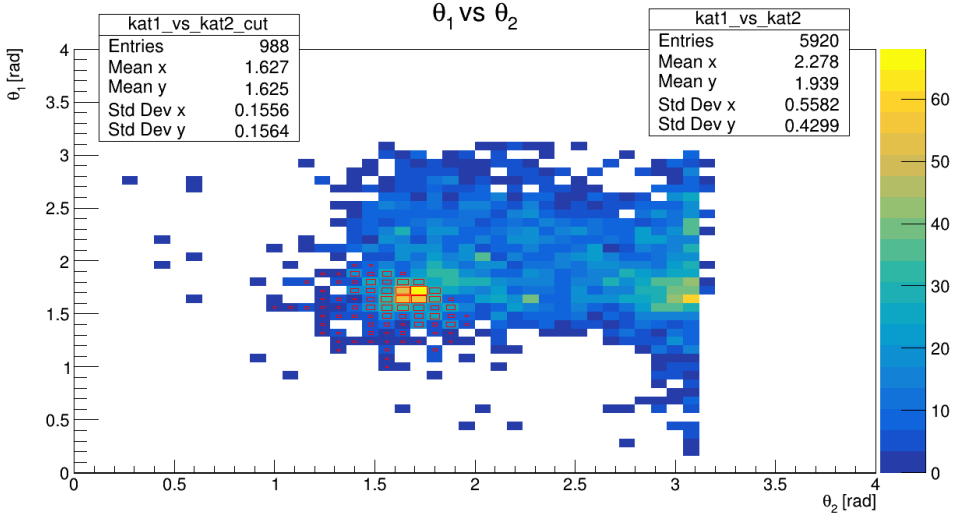
Największa szansa, że wektor polaryzacji będzie prostopadły do płaszczyzny rozproszenia jest wtedy, gdy kąt rozproszenia jest  $81.66^\circ$ . Z tego powodu dodatkowo ograniczamy zdarzenia tak, aby kąty rozproszenia zarówno jednego i drugiego kwantu gamma były właśnie w okolicy  $81.66^\circ$ .

Najłatwiej jest zatem wyciąć kółko o stosunkowo małym promieniu na poprzednim wykresie zależności kątów rozproszenia od siebie.

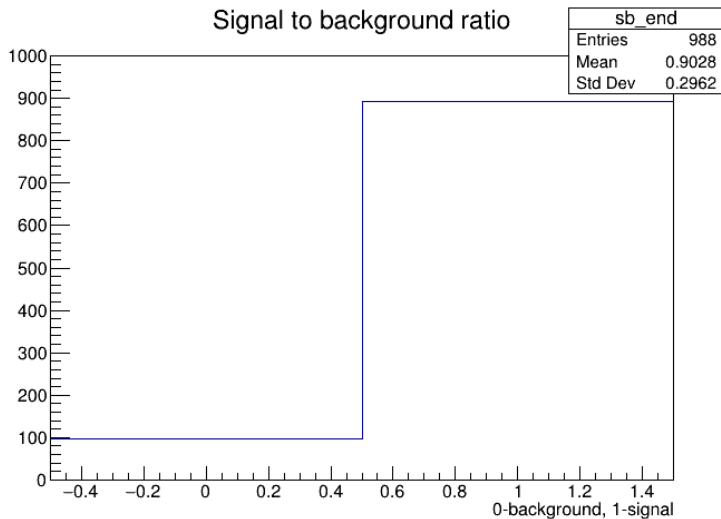


**Obraz:** Jedynie wycięty fragment kątów. Środek wyciętego okręgu jest w  $81.22^\circ$ , a jego promień to ok. 0.5 radiana.

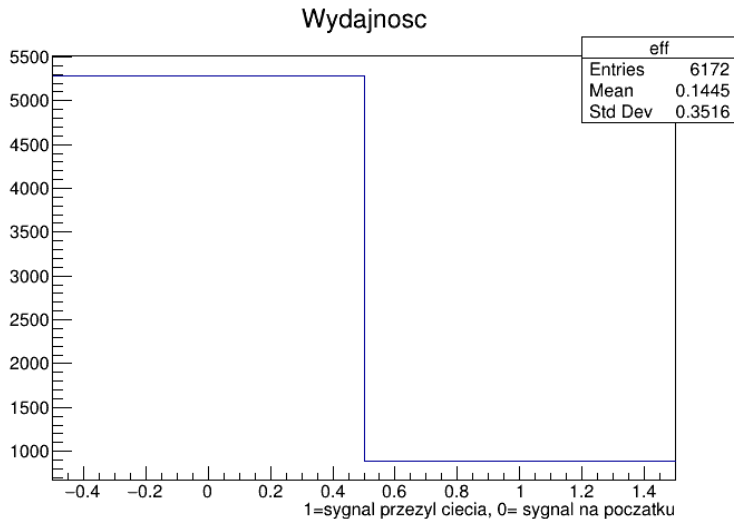
# Monte Carlo



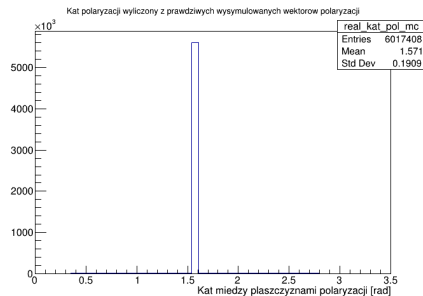
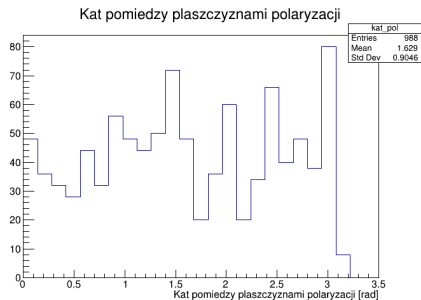
Obraz: Rozkład kątów rozproszenia. Czerwone prostokąty wyznaczają fragment wycięty, a kolorowe prostokąty – wszystkie zdarzenia.



**Obraz:** Ilość zdarzeń sygnału oraz zdarzeń tła po cięciu na kątach rozproszenia. Stosunek sygnału do tła wynosi:  
 $\frac{s}{b} = 929.17\%$



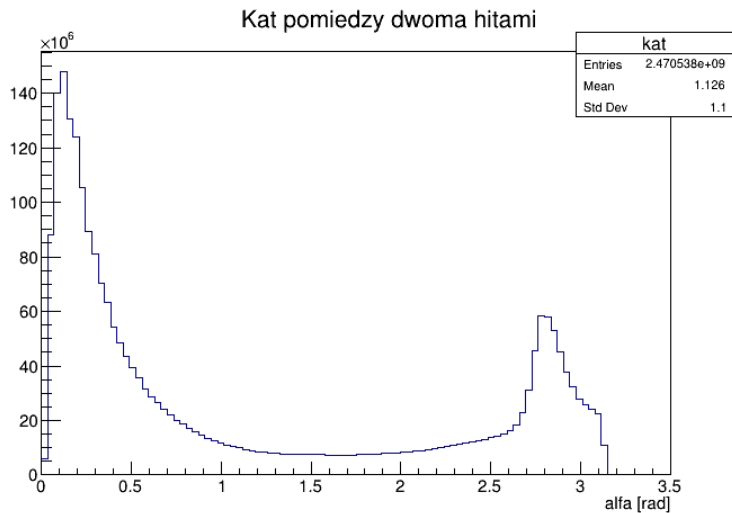
**Obraz:** Ilość zdarzeń sygnału, które przeżyły ciecia i zdarzenia sygnału, które były na początku. Wydajność wynosi: 16.89%



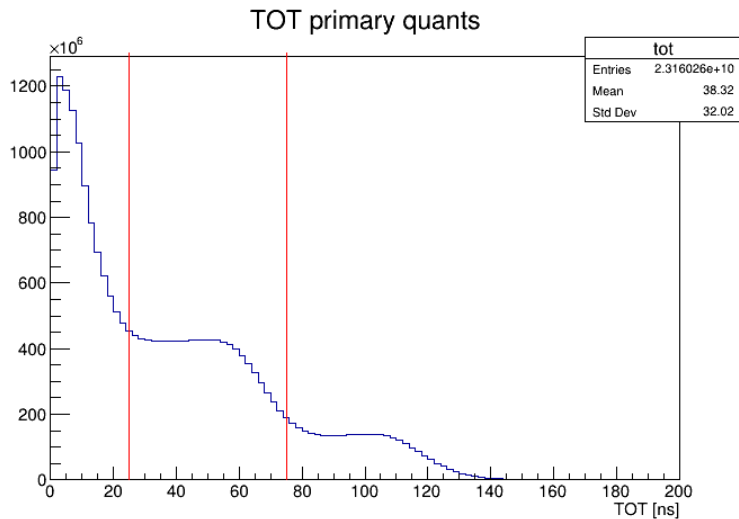
**Obraz:** Kat między płaszczyznami polaryzacji uzyskany z symulacji (po lewej). Kąt między płaszczyznami polaryzacji z prawdziwych wysymulowanych danych (po prawej).

## Część III

### Analiza Danych - Dane pomiarowe

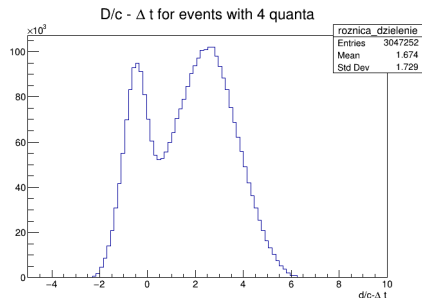
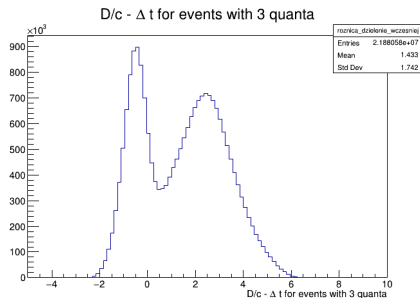


Obraz: Rozkład kąta między dwoma hitami w rzeczywistym pomiarze.

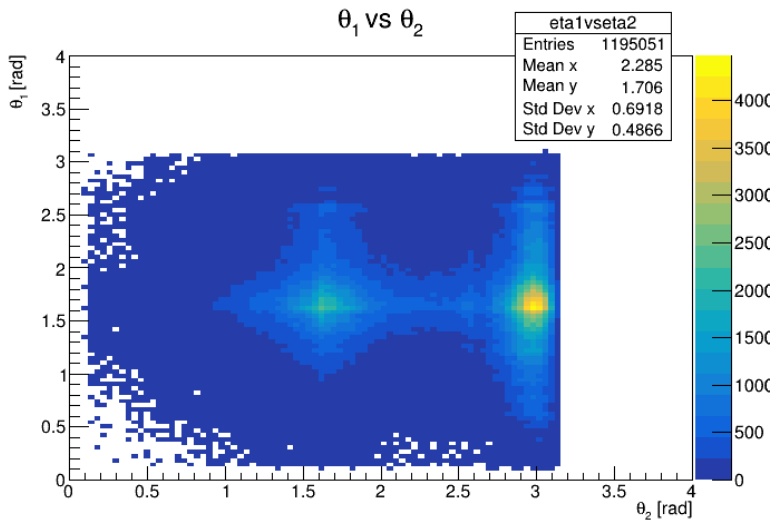


Obraz: TOT pierwotnych hitów z cięciem w wartościach 25 ns i 75 ns.

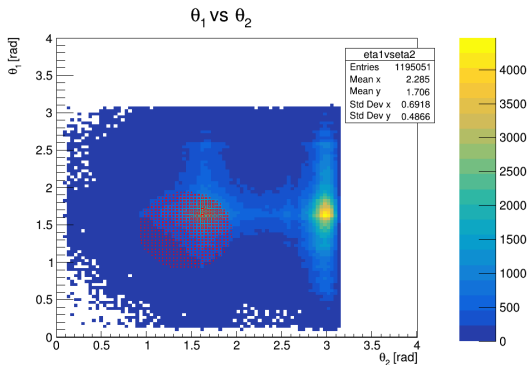
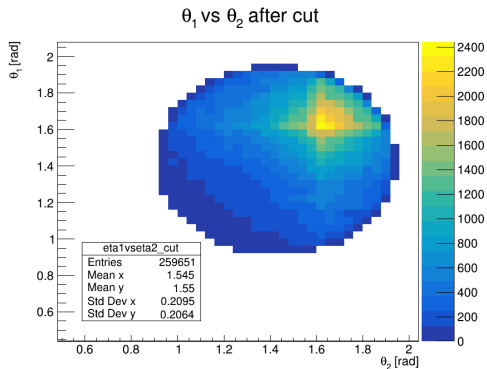




**Obraz:** Po lewej stronie znajduje się histogram wyrażenie  $D/c - \Delta t$ , gdy wymagamy, aby w zdarzeniu były jedynie 3 (lub więcej) hitów. Po prawej wymagamy już 4 (lub więcej) hitów. Cięcie było wykonane z wymaganiem co najmniej 4 hitów i brałam jedynie zdarzenia dla których to wyrażenie było mniejsze niż 0.5.

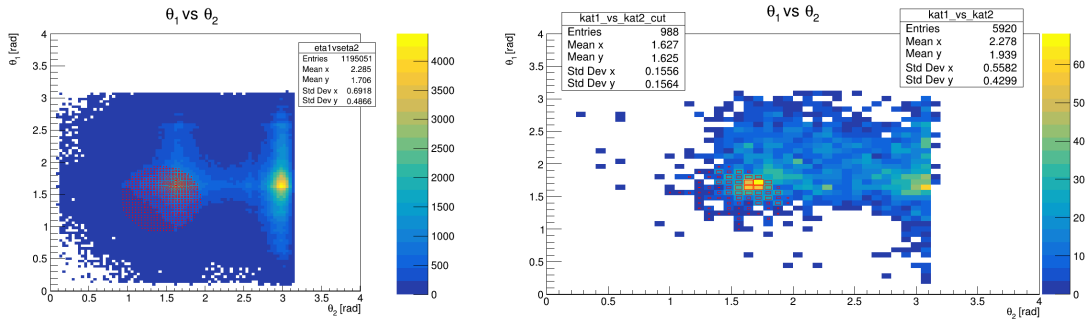


Obraz: Rozkład kątów rozpraszania z danych pomiarowych.



**Obraz:** Jedynie wycięty fragment kątów. Środek wyciętego okręgu jest w  $81.22^\circ$ , a jego promień to ok. 0.5 radiana.

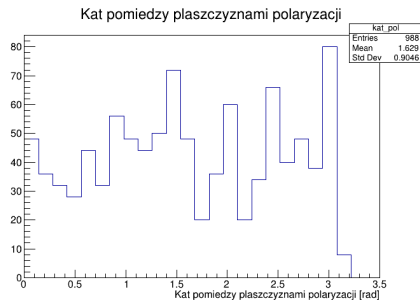
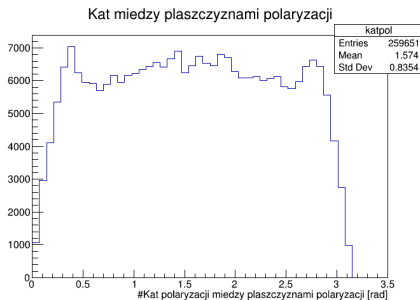
# Dane pomiarowe vs Monte Carlo - Rozkład kątów rozpraszania



Obraz: Porównanie danych pomiarowych (prawy histogram) z symulacją (lewy histogram).

# Podsumowanie

Gdyby kąty między płaszczyznami polaryzacji byłyby niezależne, wtedy rozkład byłby jednorodny. Widać jednak, że taki nie jest, zatem możliwe jest, że rzeczywiście kwanty gamma powstałe w wyniku rozpadu p-Ps na dwa kwanty gamma, są ze sobą splątane kwantowo.



**Obraz:** Porównanie danych pomiarowych (prawy histogram) z symulacją (lewy histogram).

KONIEC