

Badanie emisji cząstek naładowanych w przemianie β ^{11}Be

Natalia Sokołowska

Warszawa, 25.01.2024



ZAKŁAD FIZYKI JĄDROWEJ
UNIwersytet Warszawski

WYDZIAŁ
FIZYKI

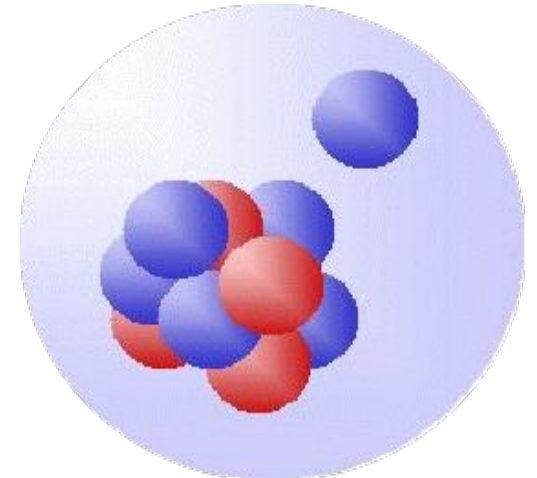


UNIwersytet
Warszawski

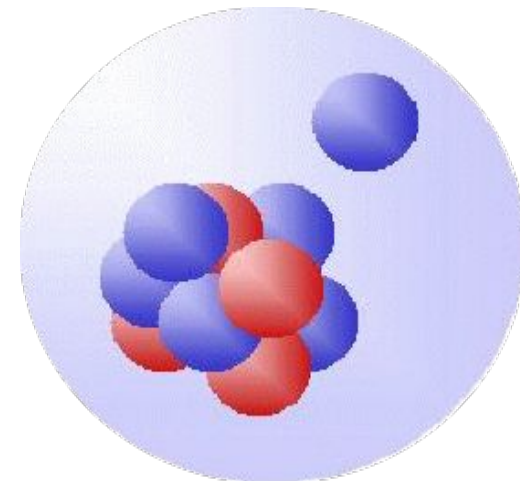
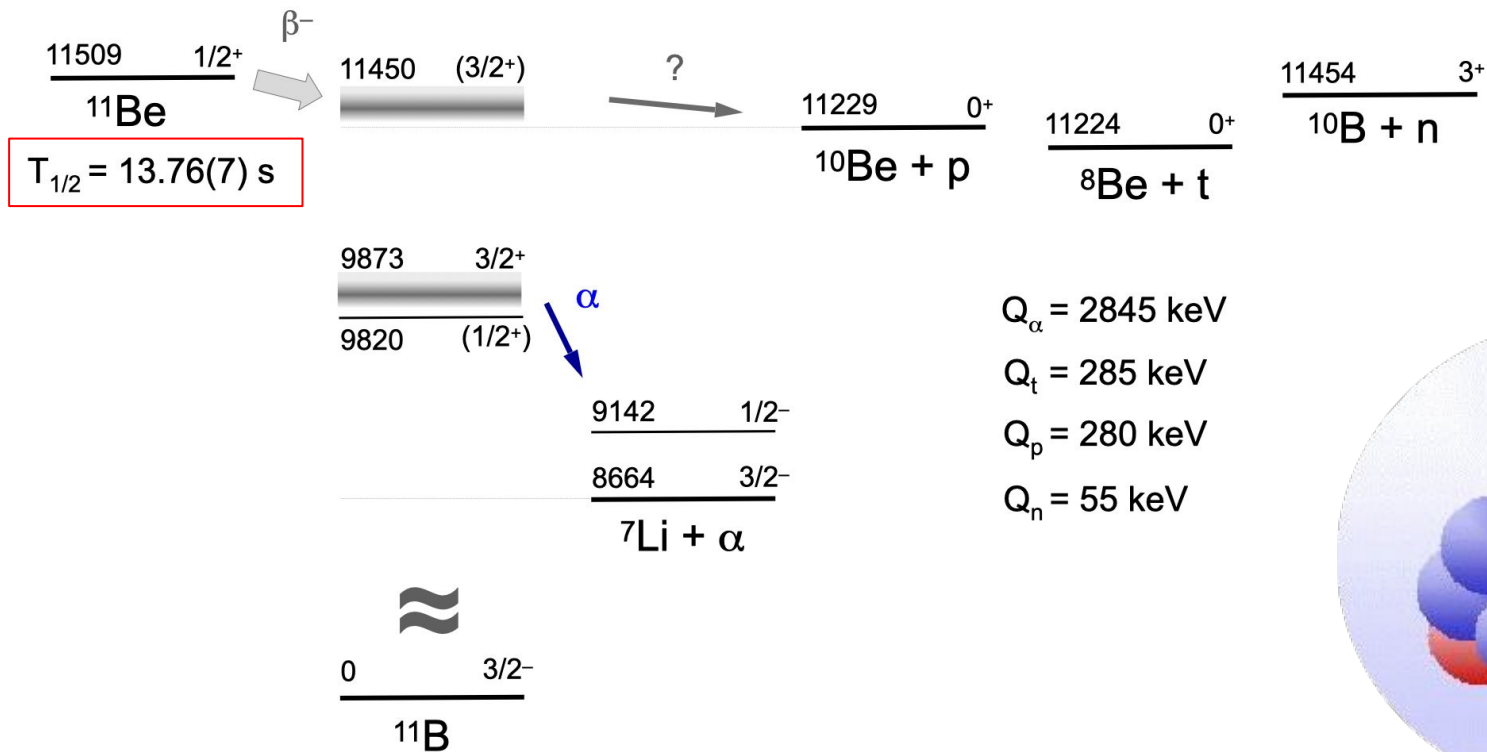
O ^{11}Be słów kilka

			^{11}O 198 ys	^{12}O 8.9 zs	^{13}O 8.58 ms	^{14}O 70.621 s	^{15}O 122.266 s	^{16}O	^{17}O
			^{10}N 143 ys	^{11}N 585 ys	^{12}N 11 ms	^{13}N 9.965 m	^{14}N	^{15}N	^{16}N 7.13 s
		^8C 3.5 zs	^9C 126.5 ms	^{10}C 19.3011 s	^{11}C 20.3402 m	^{12}C	^{13}C	^{14}C 5.7 ky	^{15}C 2.449 s
	^6B	^7B 570 ys	^8B 771.9 ms	^9B 800 zs	^{10}B	^{11}B	^{12}B 20.2 ms	^{13}B 17.16 ms	^{14}B 12.36 ms
	^5Be	^6Be	^7Be 53.22 d	^8Be 81.9 as	^9Be	^{10}Be 1.387 My	^{11}Be 13.76 s	^{12}Be 21.46 ms	^{13}Be 1000 ys
^3Li	^4Li	^5Li 370 ys	^6Li	^7Li	^8Li 838.7 ms	^9Li 178.2 ms	^{10}Li 2 zs	^{11}Li 8.75 ms	^{12}Li
	^3He	^4He	^5He 602 ys	^6He 806.92 ms	^7He 2.51 zs	^8He 119.5 ms	^9He 2.5 zs	^{10}He 260 ys	
^1H	^2H	^3H 12.32 y	^4H 139 ys	^5H 86 ys	^6H 294 ys	^7H 652 ys			

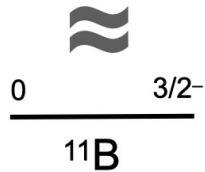
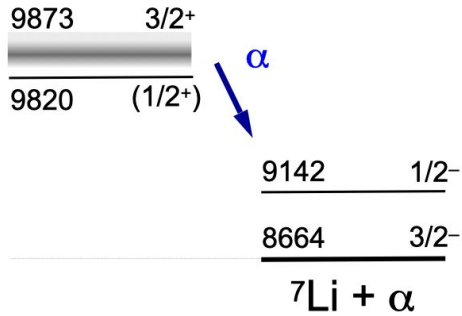
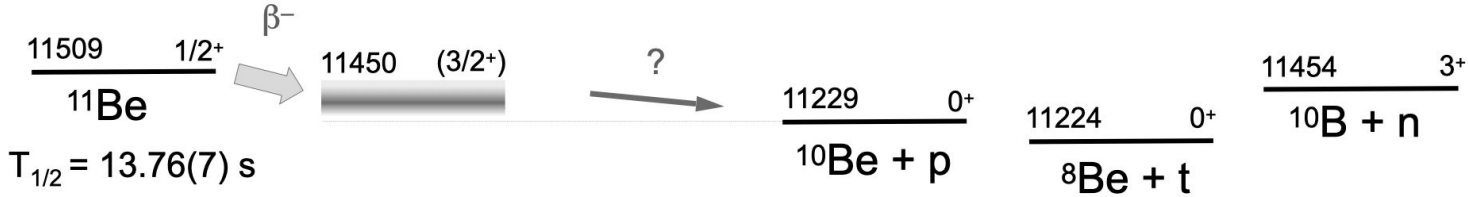
- Jądro neutrono-nadmiarowe
- Efekt halo
- Przemiana β^-



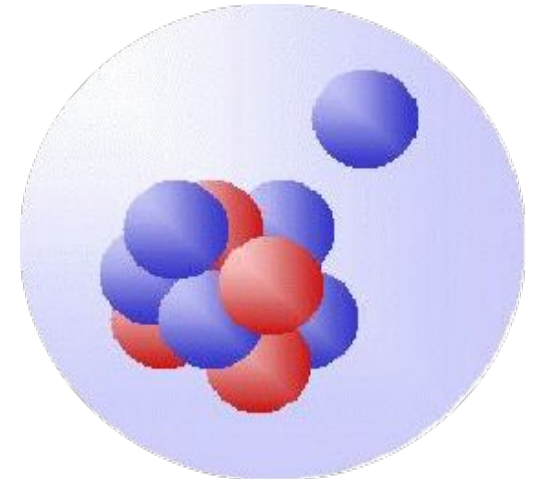
^{11}Be - schemat rozpadu



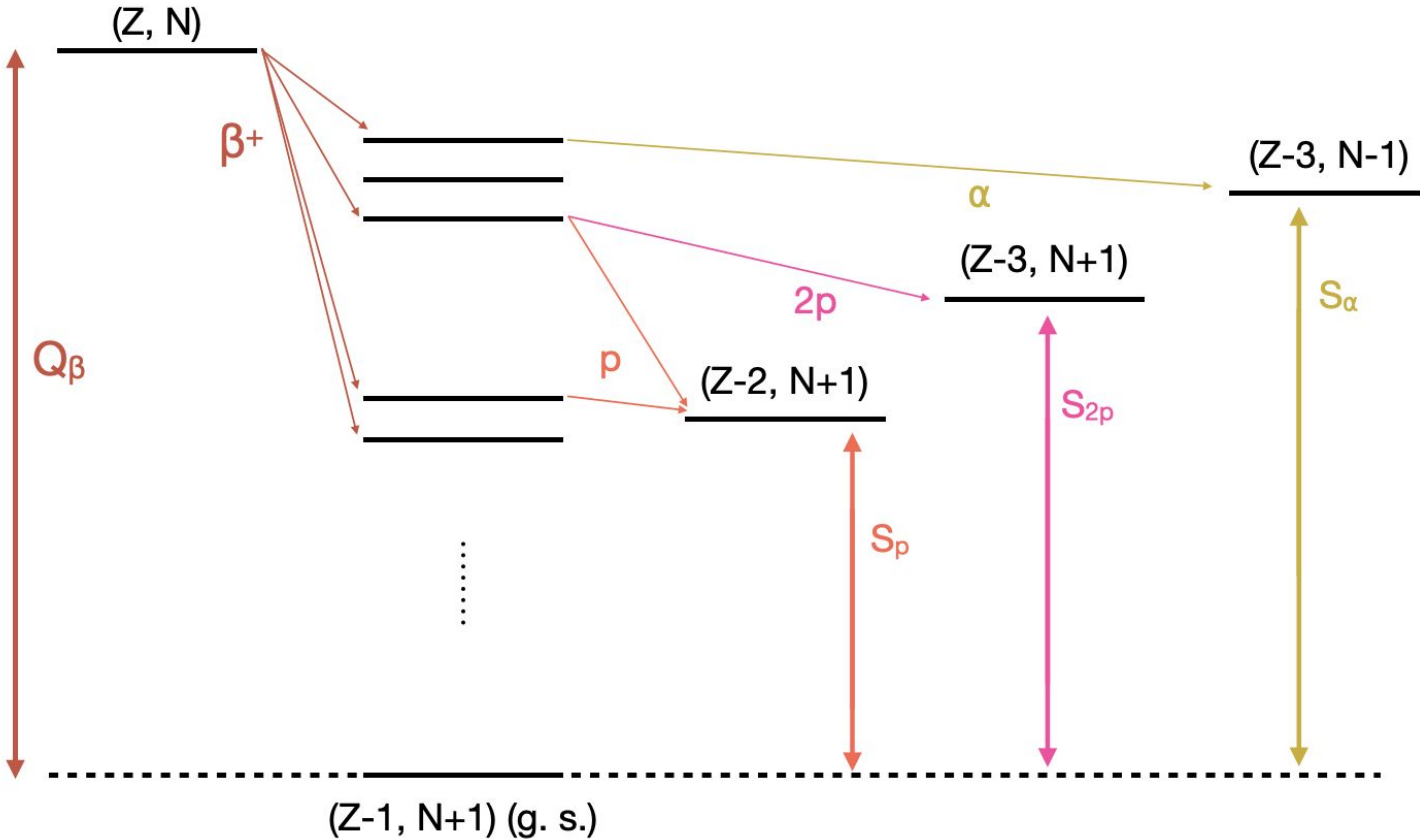
^{11}Be - schemat rozpadu



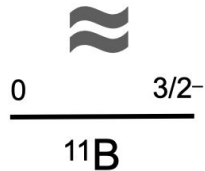
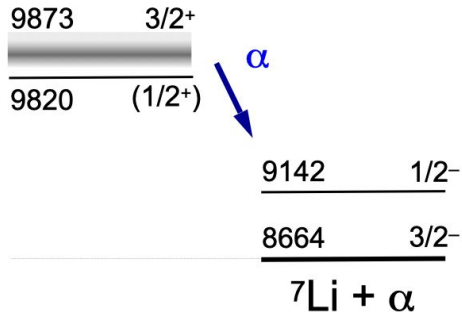
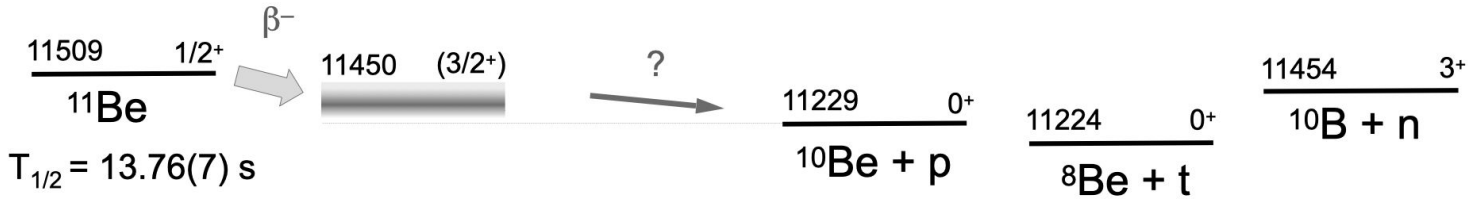
- $Q_\alpha = 2845 \text{ keV}$
- $Q_t = 285 \text{ keV}$
- $Q_p = 280 \text{ keV}$
- $Q_n = 55 \text{ keV}$



Opóźniona emisja cząstek



^{11}Be - schemat rozpadu

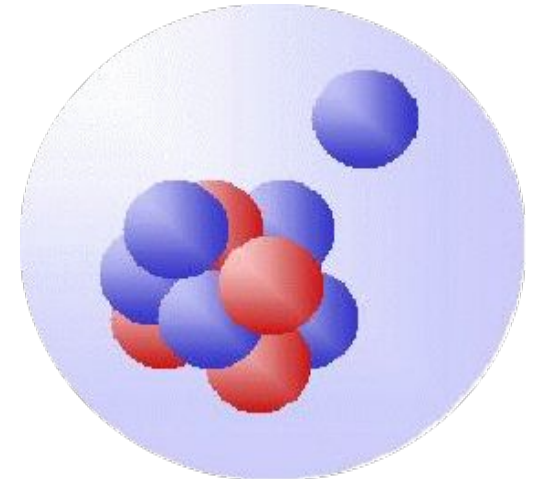


$Q_{\alpha} = 2845 \text{ keV}$

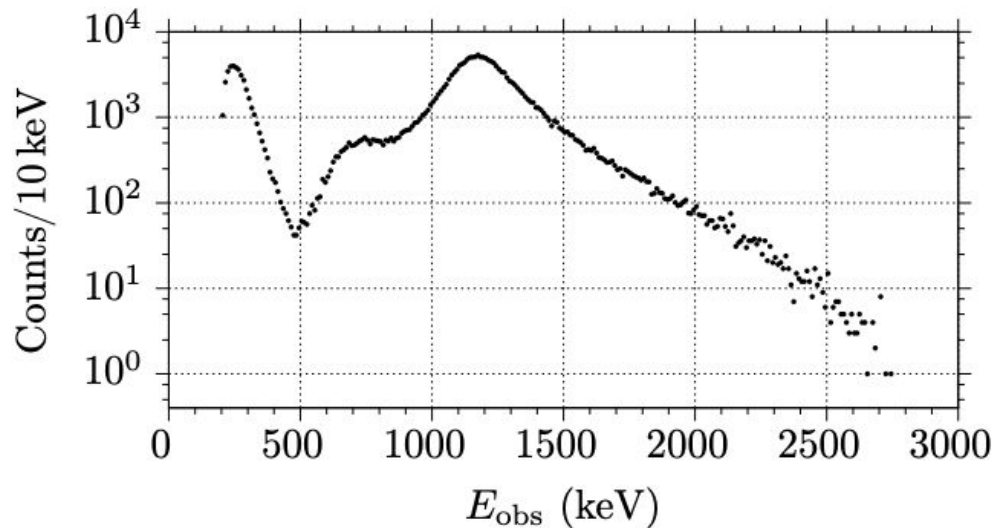
$Q_t = 285 \text{ keV}$

$Q_p = 280 \text{ keV}$

$Q_n = 55 \text{ keV}$

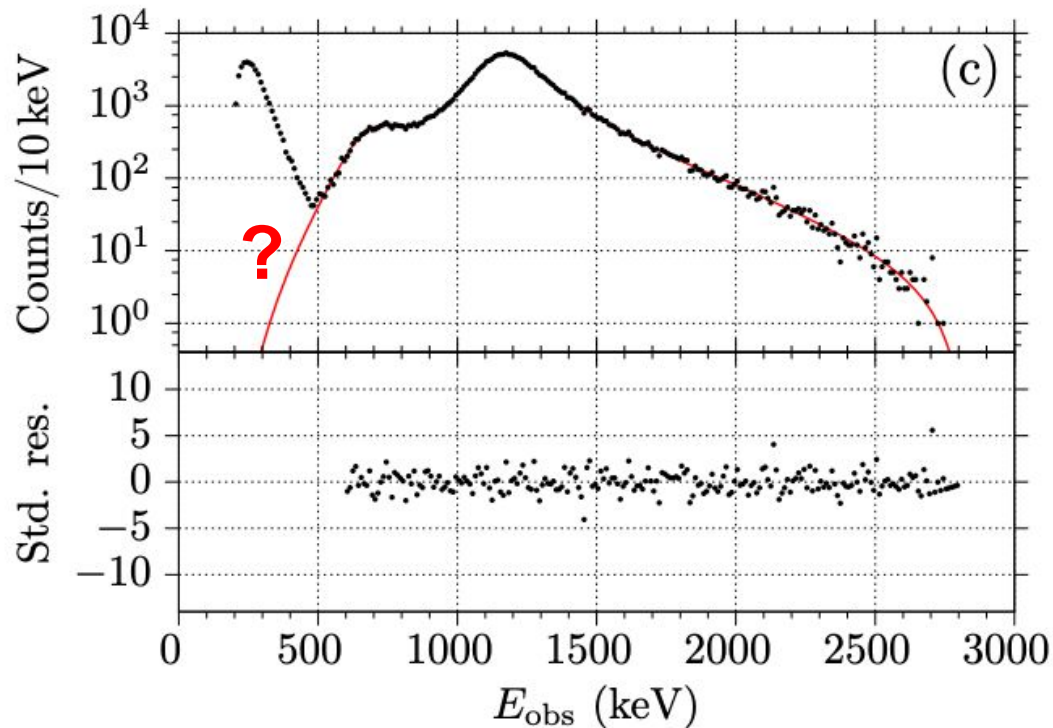


Badania opóźnionej emisji cząstek α z ^{11}Be



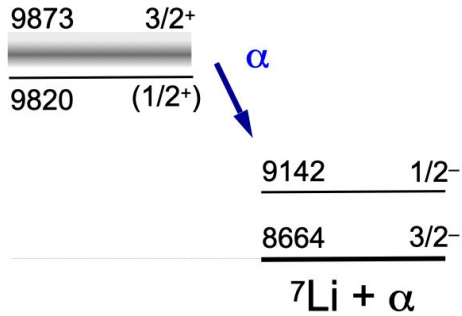
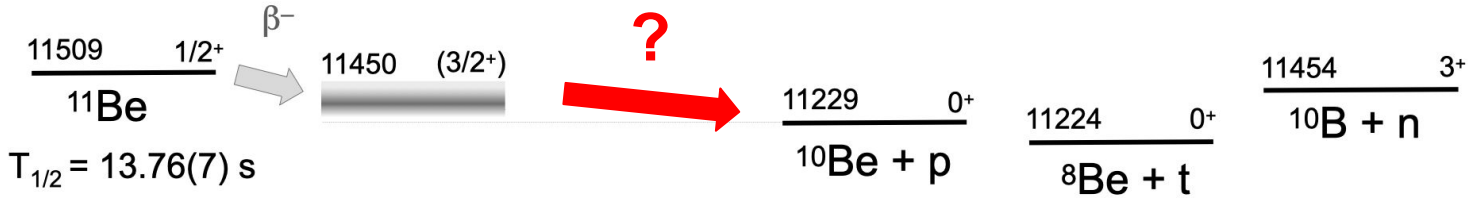
- Detektor krzemowy (DSSSD)
- Około 180k sygnałów powyżej 600 keV
- Brak możliwości obserwacji niskoenergetycznej części widma

Badania opóźnionej emisji cząstek α z ^{11}Be



- Analiza w formalizmie macierzy R
- $\text{BR}(\beta\alpha) = 3.3(1)\%$
- Dwa stany $3/2^+$ w ^{11}B o energiach ~ 9.8 i ~ 11.5 MeV

^{11}Be - schemat rozpadu

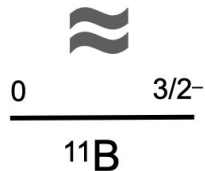


$$Q_{\alpha} = 2845 \text{ keV}$$

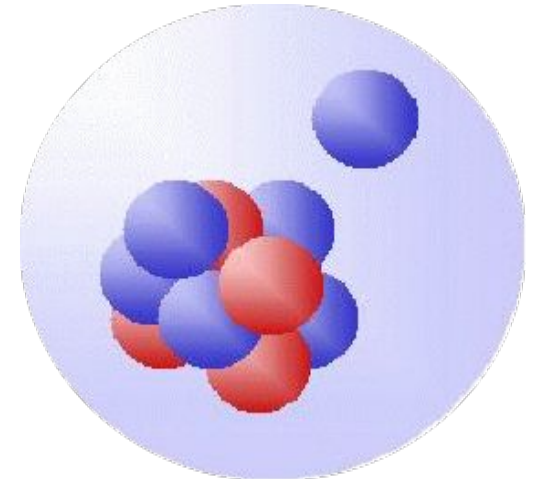
$$Q_t = 285 \text{ keV}$$

$$Q_p = 280 \text{ keV}$$

$$Q_n = 55 \text{ keV}$$

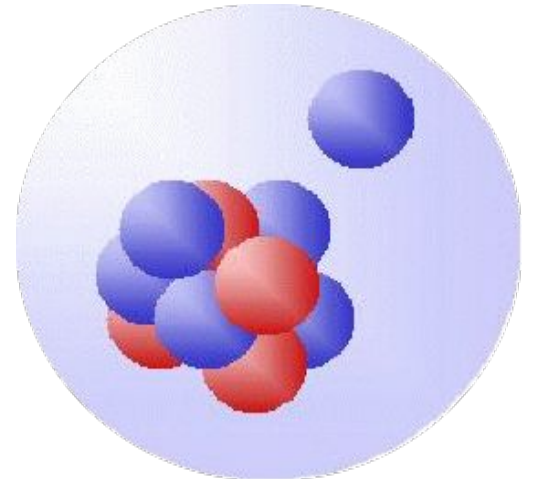


Przewidywania teoretyczne
na $BR(\beta p) \sim 10^{-8} - 10^{-6}$



Poszukiwania opóźnionej emisji protonów z ^{11}Be - motywacje

- Struktura halo \rightarrow jeden neutron słabo związany
- Rozpad quasi-swobodnego neutronu
- Dostęp do funkcji falowej halo



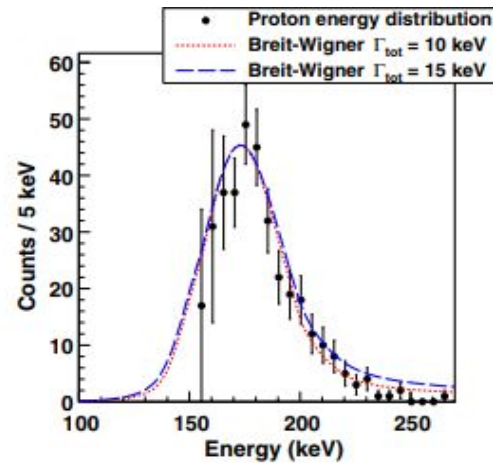
Poszukiwania opóźnionej emisji protonów z ^{11}Be

- Pierwszy wynik (AMS 2014) $\rightarrow \text{BR}(\beta p) = 8.3(9) \times 10^{-6}$
K. Riisager et al., Phys. Lett. B 732, 305 (2014)

Poszukiwania opóźnionej emisji protonów z ^{11}Be

$$E = 11\,425(20) \text{ keV}$$
$$\Gamma = 12(5) \text{ keV}$$

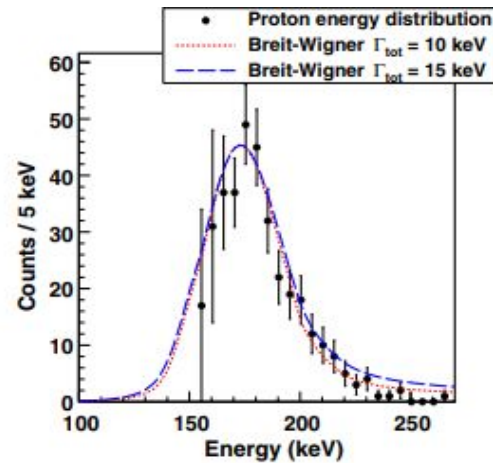
- Pierwszy wynik (AMS 2014) $\rightarrow \text{BR}(\beta p) = 8.3(9) \times 10^{-6}$
K. Riisager et al., Phys. Lett. B 732, 305 (2014)
- Bezpośrednia obserwacja (2019) $\rightarrow \text{BR}(\beta p) = 1.3(3) \times 10^{-5}$
Y. Ayyad et al. Phys. Rev. Lett. **123**, 082501 (2019)



Poszukiwania opóźnionej emisji protonów z ^{11}Be

$$E = 11\,425(20) \text{ keV}$$
$$\Gamma = 12(5) \text{ keV}$$

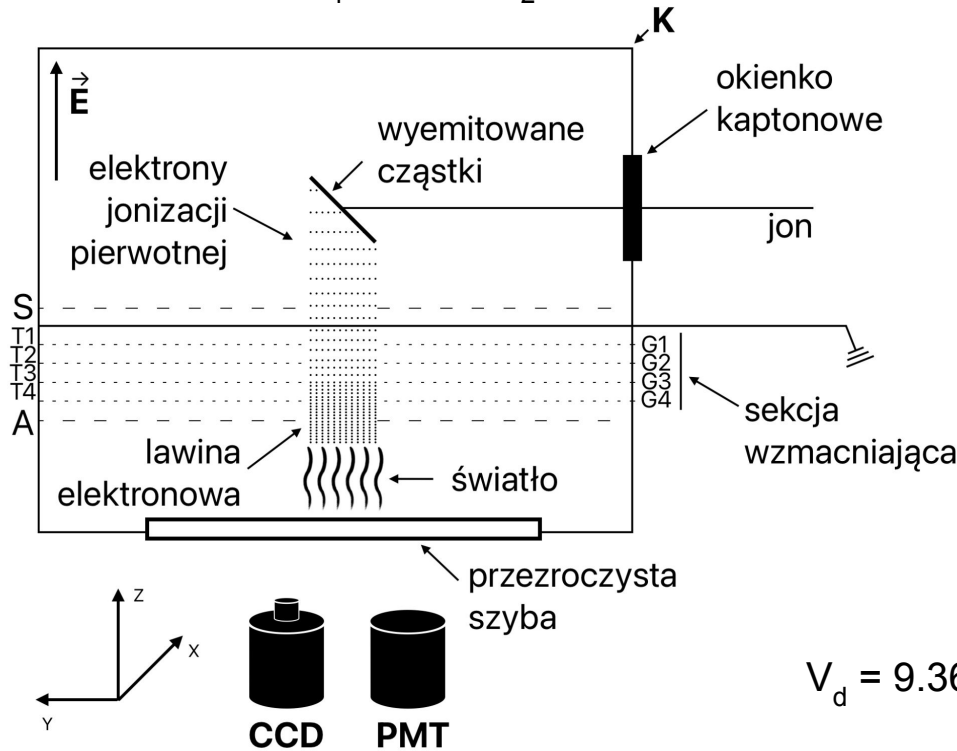
- Pierwszy wynik (AMS 2014) $\rightarrow \text{BR}(\beta p) = 8.3(9) \times 10^{-6}$
K. Riisager et al., Phys. Lett. B 732, 305 (2014)
- Bezpośrednia obserwacja (2019) $\rightarrow \text{BR}(\beta p) = 1.3(3) \times 10^{-5}$
Y. Ayyad et al. Phys. Rev. Lett. **123**, 082501 (2019)
- Powtórzony eksperyment AMS (2020) $\rightarrow \text{BR}(\beta p) < 2.2 \times 10^{-6}$
K. Riisager et al. EPJ A 56, article 100 (2020)



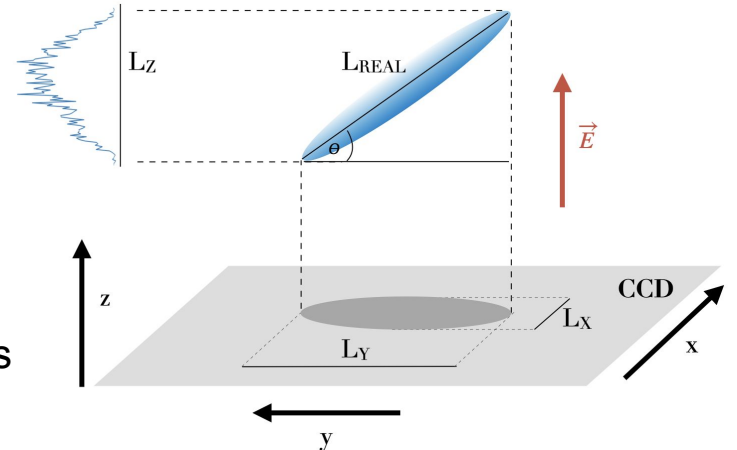
OTPC - Optical Time Projection Chamber

Mieszanka gazowa:

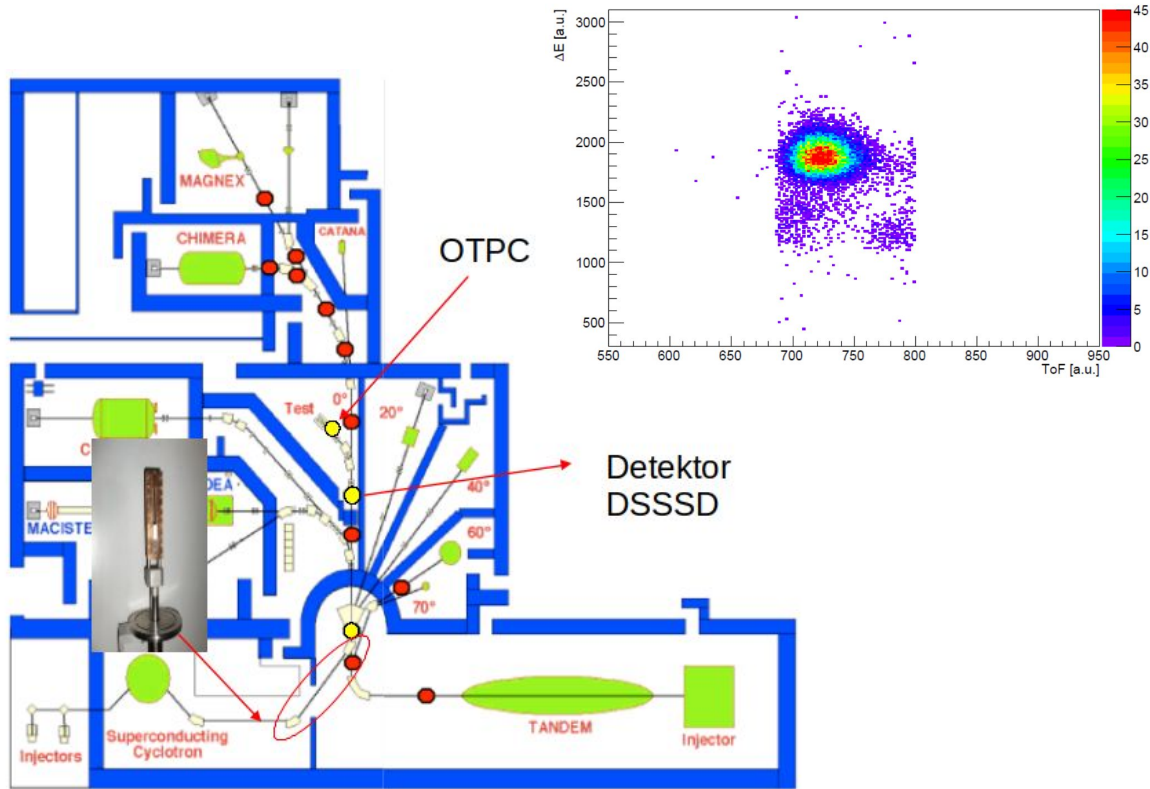
97% He + 1.6% CF₄ + 1.4% N₂



- Odczyt optyczny (CCD + PMT)
- Niewrażliwy na cząstki β
- Możliwość obserwacji pełnego śladu w szerokim zakresie energii emitowanych cząstek

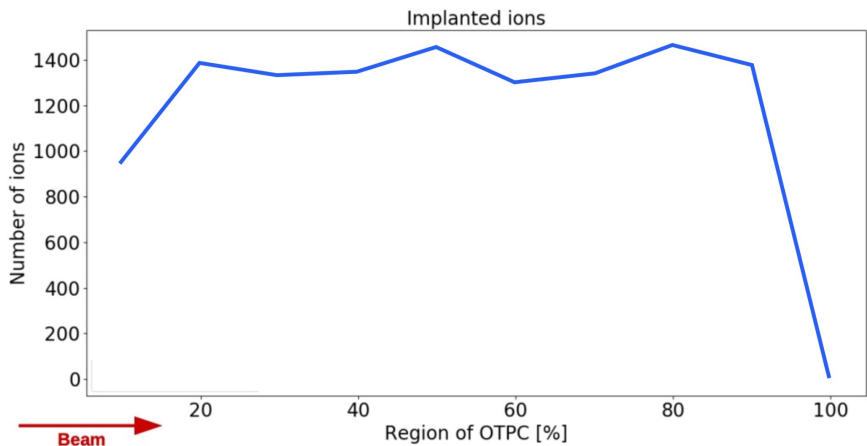
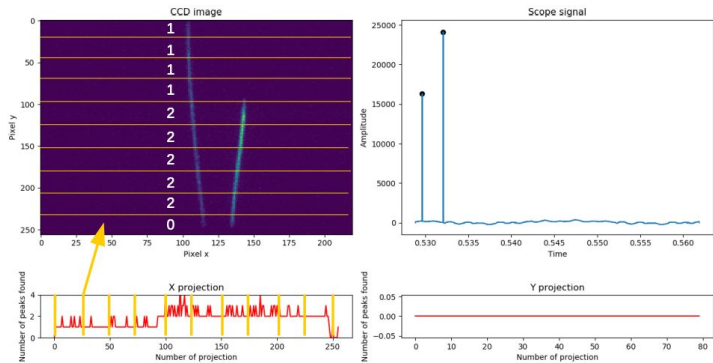


Eksperyment w LNS w Katanii

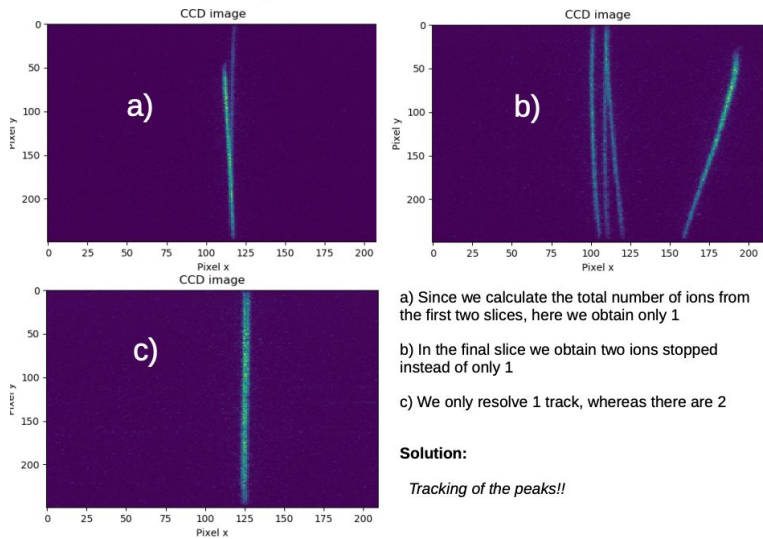


- Niezależne wyznaczenie $BR(\beta\alpha)$
- Metoda fragmentacji
- 93% ^{11}Be w wiązce
- Wiązka ciągła - jony liczymy detektorem krzemowym
- Osobne pomiary profilu implantacji jonów w komorze

Eksperyment w LNS w Katanii - analiza danych



Examples of difficult frames:



- a) Since we calculate the total number of ions from the first two slices, here we obtain only 1
- b) In the final slice we obtain two ions stopped instead of only 1
- c) We only resolve 1 track, whereas there are 2

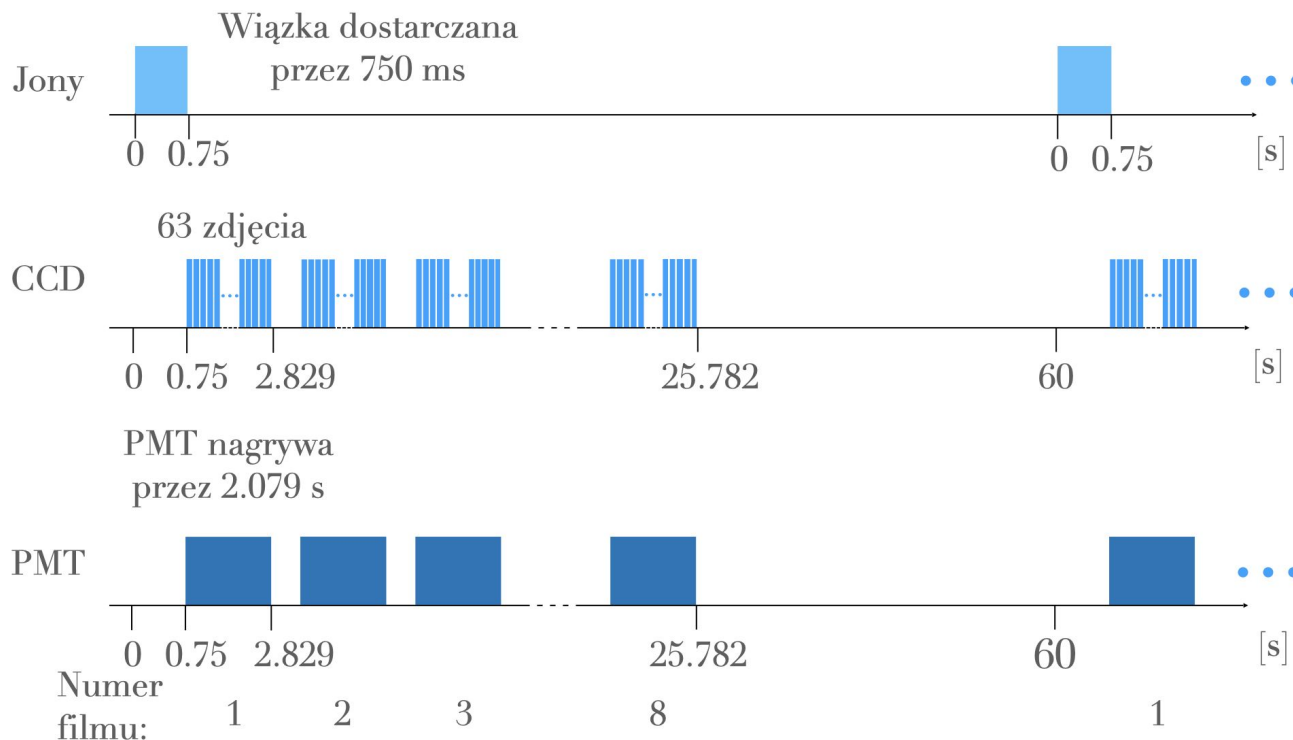
Solution:

Tracking of the peaks!!

- płaski rozkład
- 19.4(2.7)% jonów zatrzymywanych w detektorze

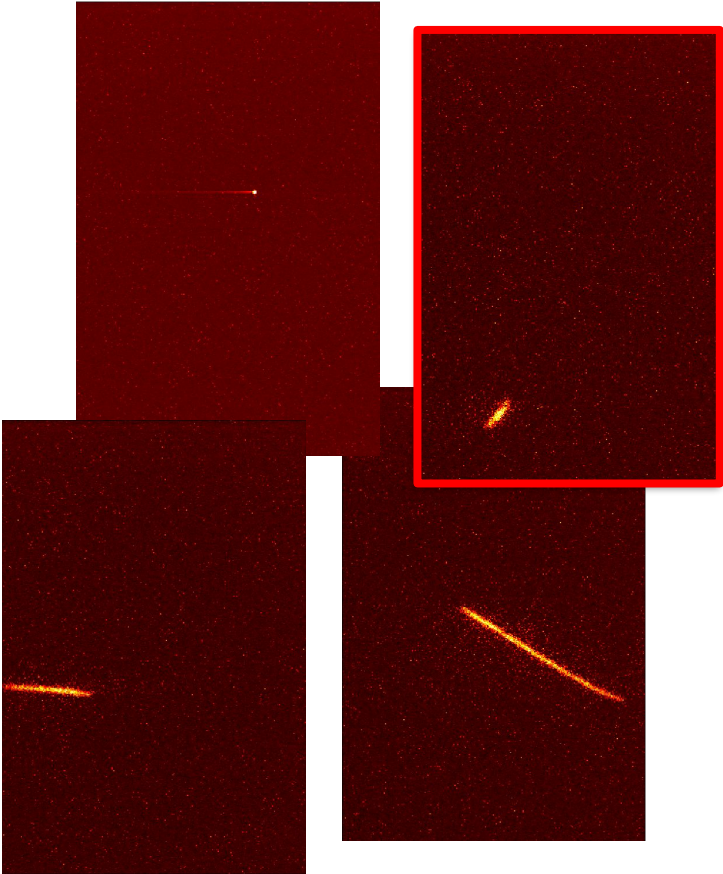
analiza wykonana przez
dr Victora Guadilla

Eksperyment w LNS w Katanii



- Implantacja przez 750 ms
- Jeden „film” składa się z 63 zdjęć po 33ms ekspozycji
- Nagrywamy 8 filmów (~26s)
- ~34s czekamy aż pozostałe jądra ^{11}Be się rozpadną
- Zaczynamy kolejną implantację

Eksperyment w LNS w Katanii - analiza danych



- Prawie 4M zdjęć
 - ~97% to puste zdarzenia
 - ~98k to przypadki tła, defektów lub z cząstką α ze źródła diagnostycznego
- ⇒ ok. 2k zdarzeń z rozpadami ^{11}Be

Eksperyment w LNS w Katanii - wyniki

$$b_{\beta\alpha} = \frac{n_{\alpha}}{n_d}$$

$$n_d = n_{total} \cdot p^{11Be} \cdot p_{stop} \cdot p_{decay}$$

$$n_{\alpha} = 1837$$

$$n_{total} = 633501$$

$$p^{11Be} = 0.93(1)$$

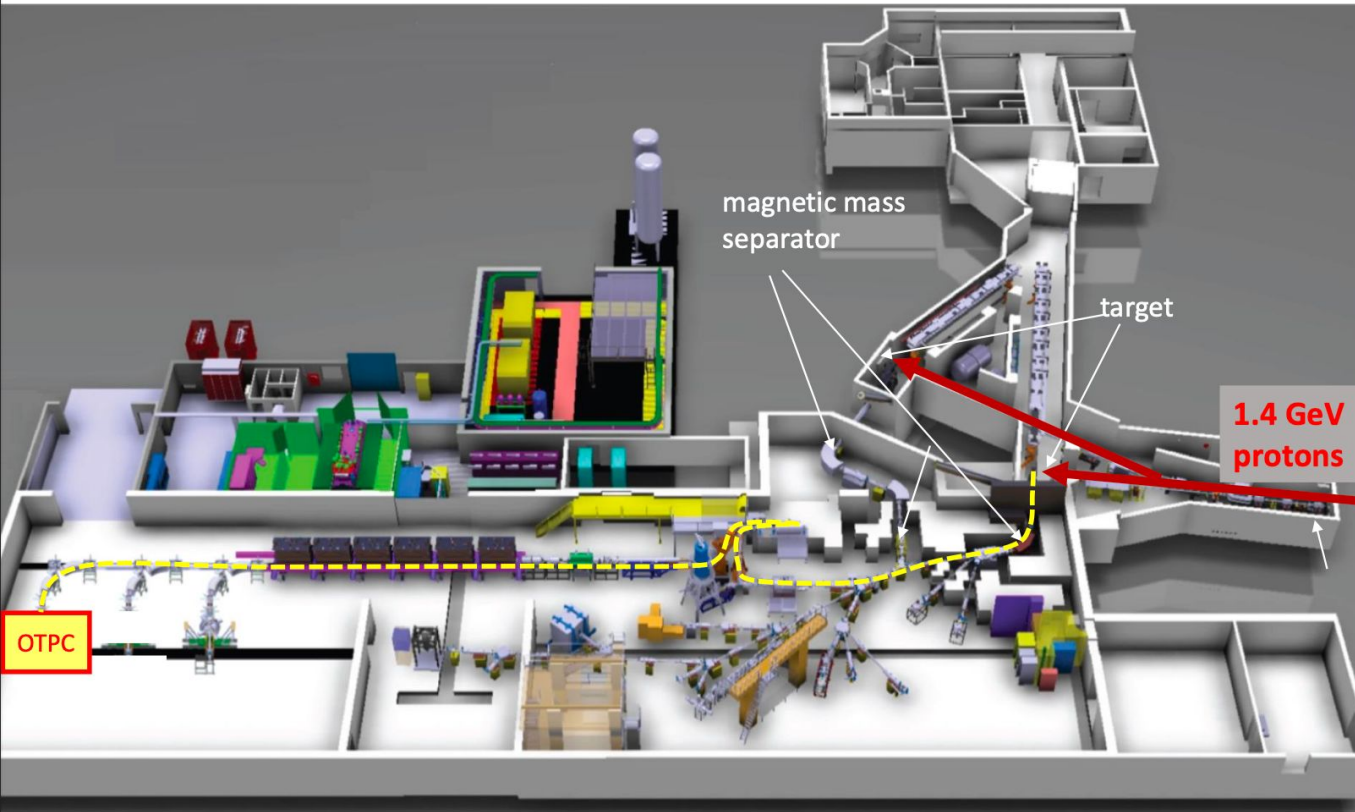
$$p_{stop} = 0.194(27)$$

$$p_{decay} = 0.493(1)$$

$$b_{\beta\alpha} = 3.26(45)\%$$

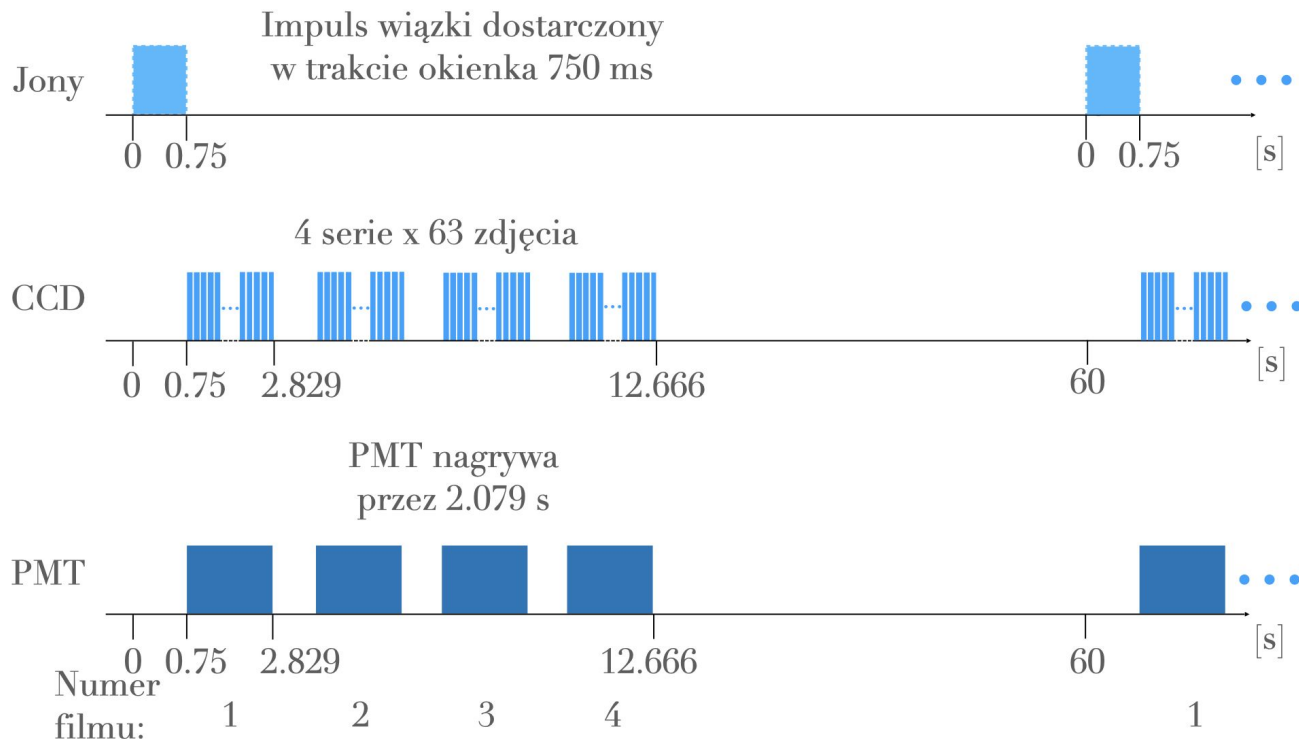
J. Refsgaard et. al. \rightarrow 3.30(10)%

Eksperyment w HIE-ISOLDE w CERN



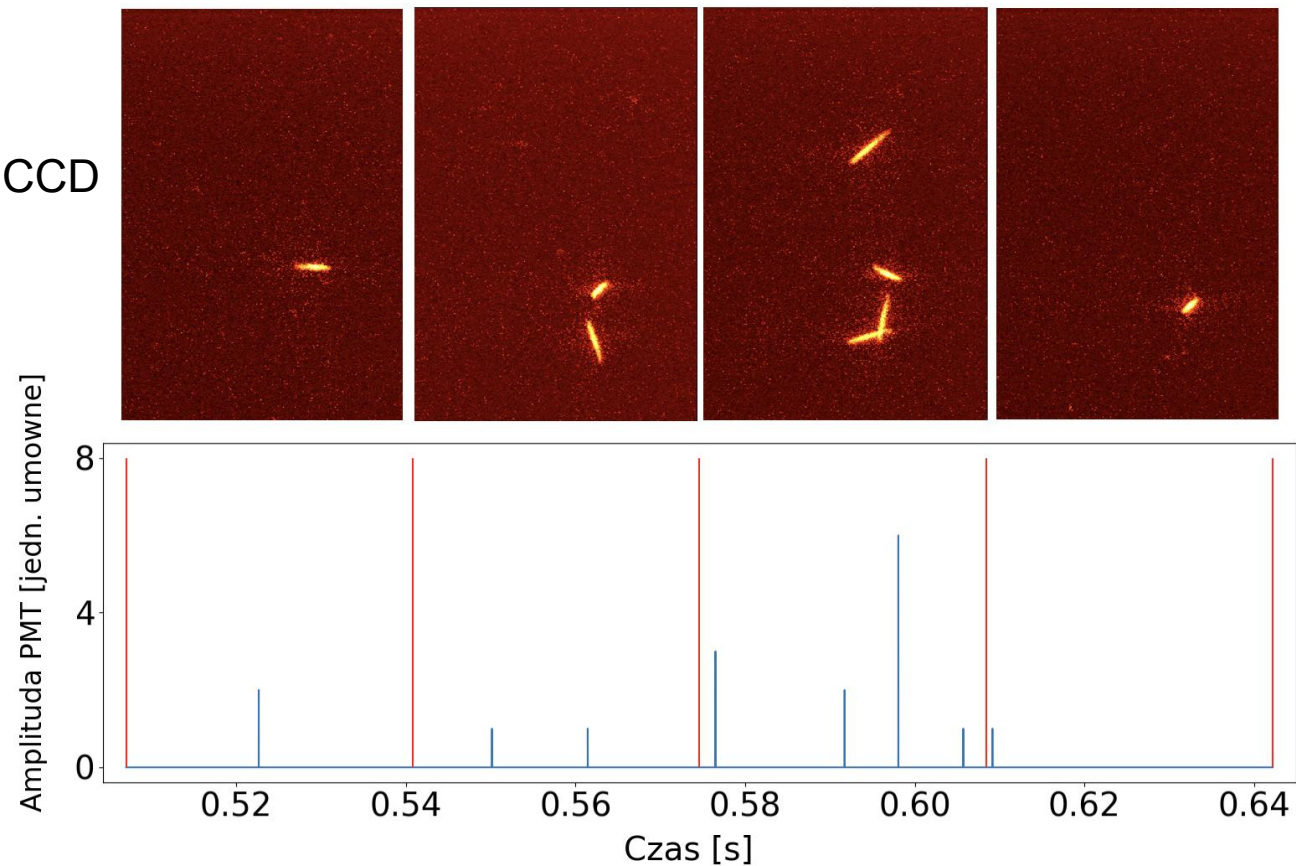
- Bardzo czysta i intensywna wiązka ^{11}Be
- $E = 7.5 \text{ MeV/nukleon}$
- Wiązka w paczkach - nie wiemy ile jonów w paczce!
- $\beta\alpha$ pozwala policzyć zatrzymane jony

Eksperyment w HIE-ISOLDE w CERN



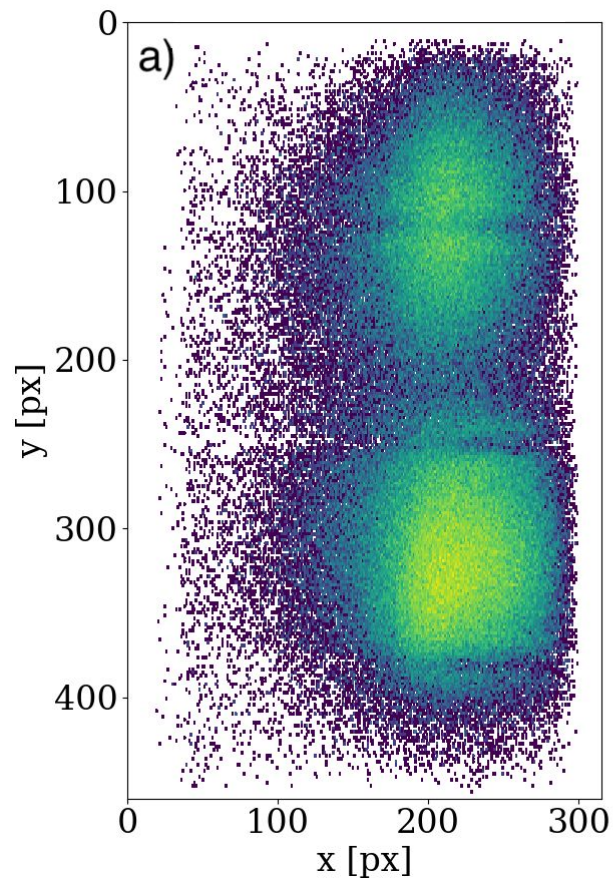
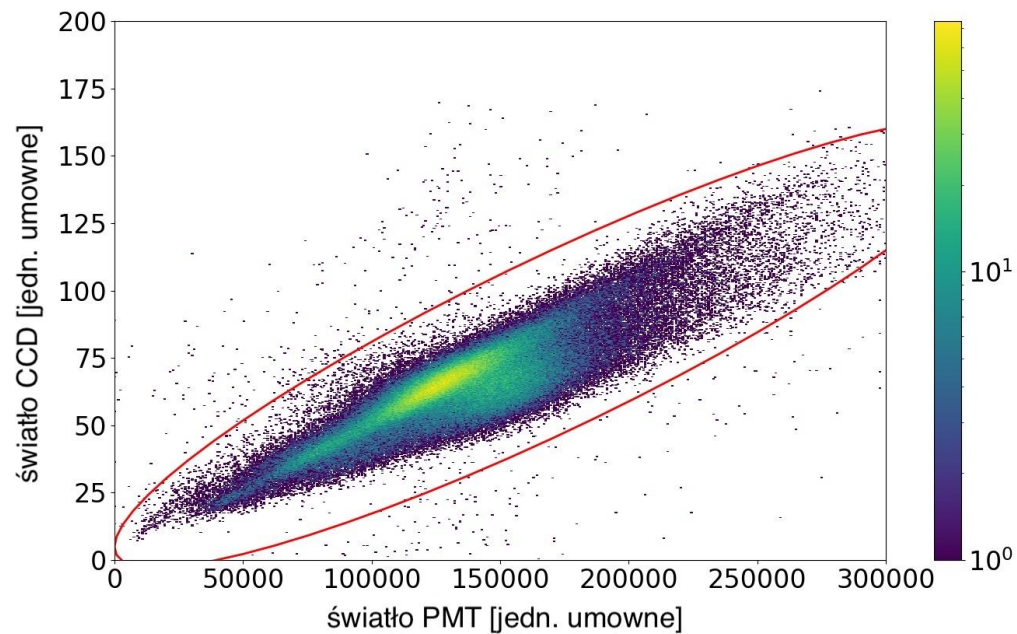
- Implantacja w trakcie okna 750 ms
- Jeden „film” składa się z 63 zdjęć po 33ms ekspozycji
- Nagrywamy 4 filmy (~12.7s)
- ~47s czekamy aż pozostałe jądra ^{11}Be się rozpadną
- Zaczynamy kolejną implantację

Zdarzenia $\beta\alpha$ w detektorze OTPC

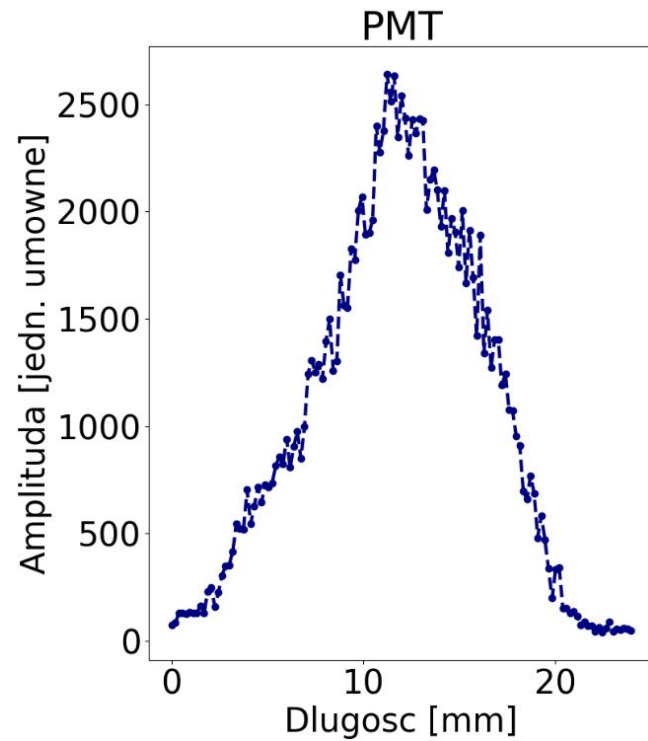
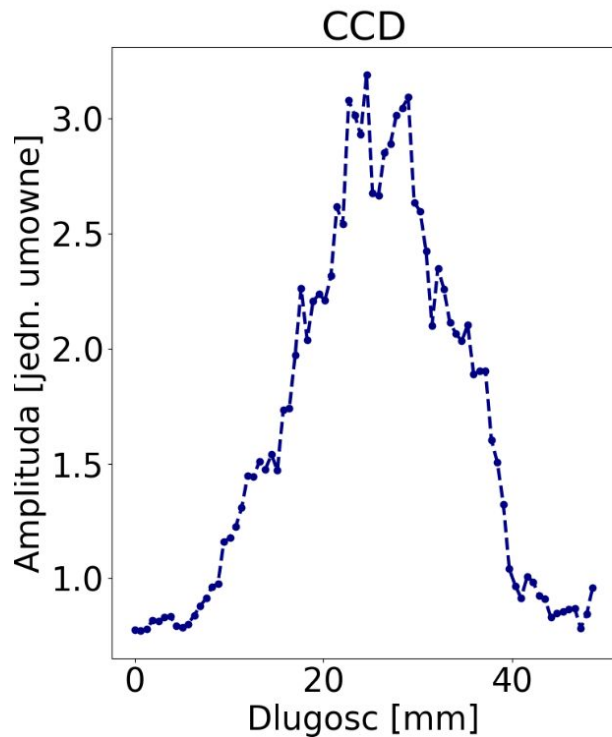
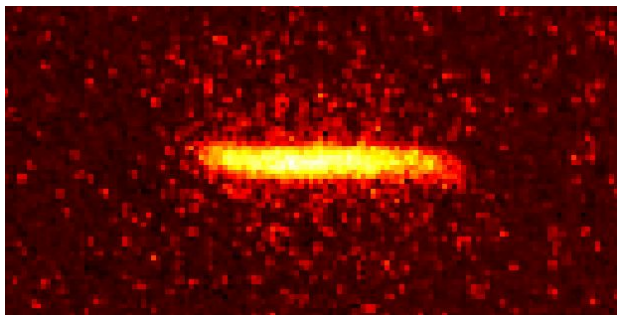


~1M rozpadów →
do analizy wybrano
tylko klatki z jednym
zdarzeniem
→ ok. 250k

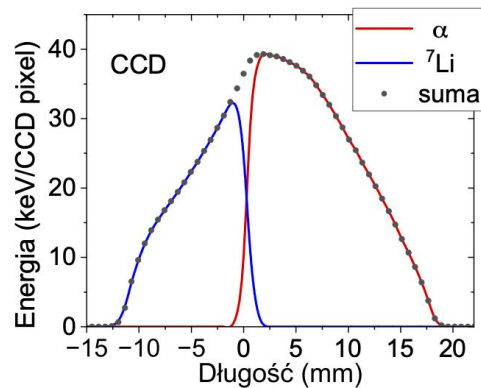
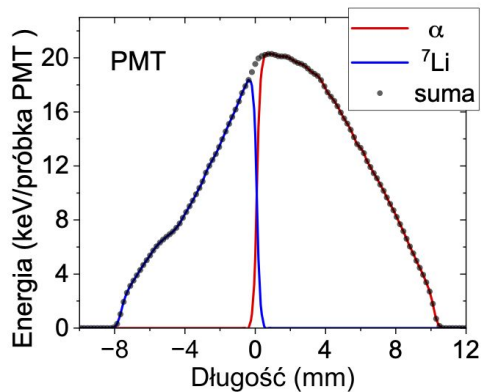
Zdarzenia $\beta\alpha$ w detektorze OTPC



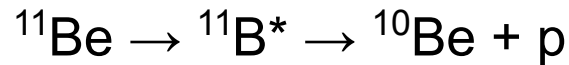
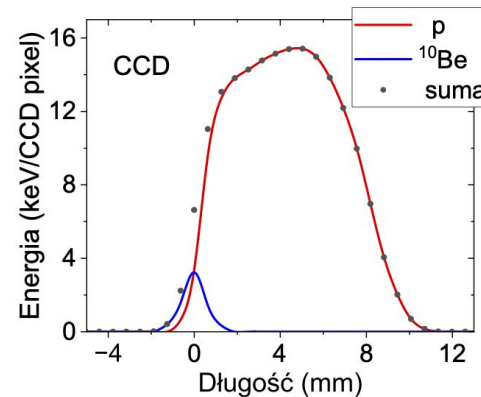
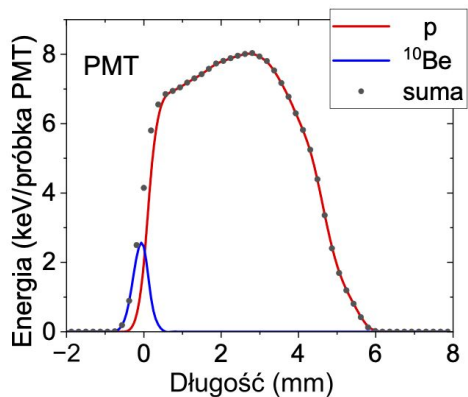
Przygotowanie danych do rekonstrukcji



Przewidywania (model SRIM)



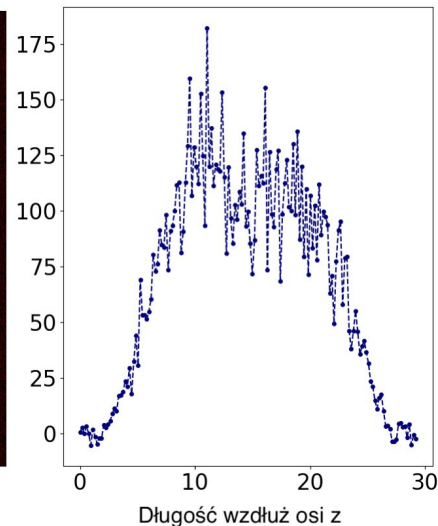
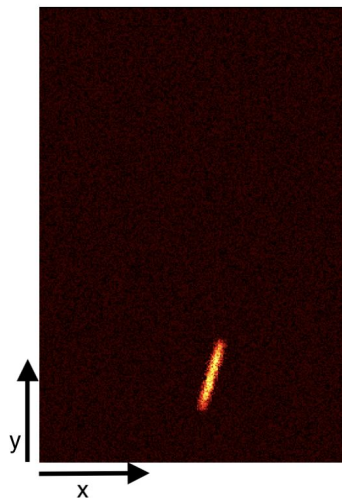
$$E = 1200 \text{ keV}, \theta = 60^\circ$$



$$E = 200 \text{ keV}, \theta = 60^\circ$$

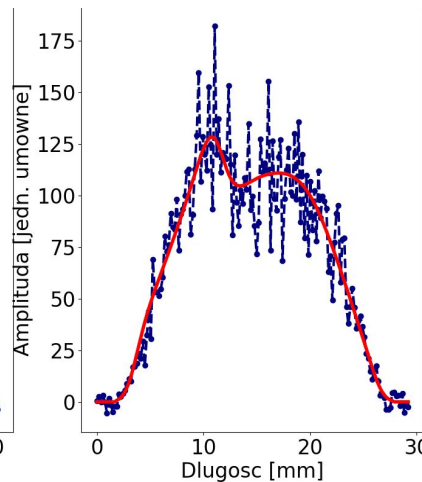
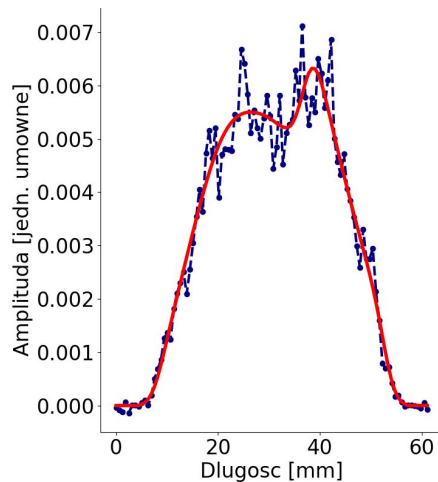
Symulacje

- GEANT4
- dr V. Guadilla
- Symulacje $\beta\alpha$ w szerokim zakresie energii
- Analiza taka sama jak danych



$$E_{\text{zakładana}} = 2012 \text{ keV}$$

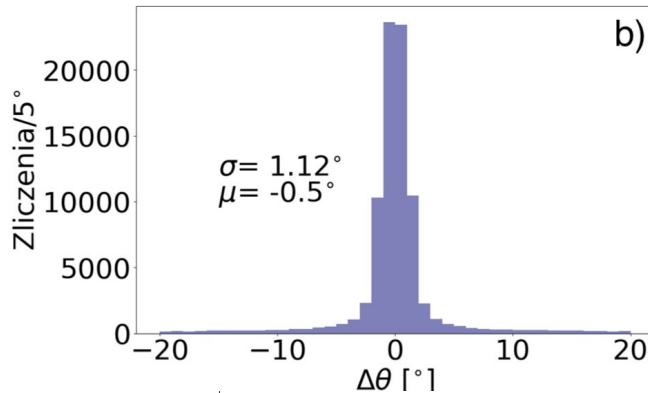
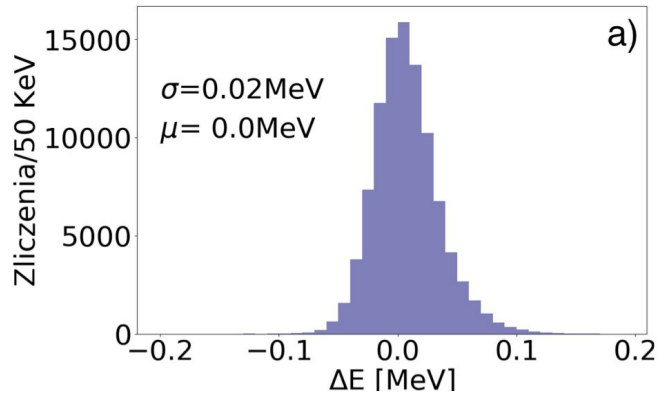
$$\theta_{\text{zakładana}} = 153^\circ$$



$$E_{\text{odtworzona}} = 2003 \text{ keV}$$

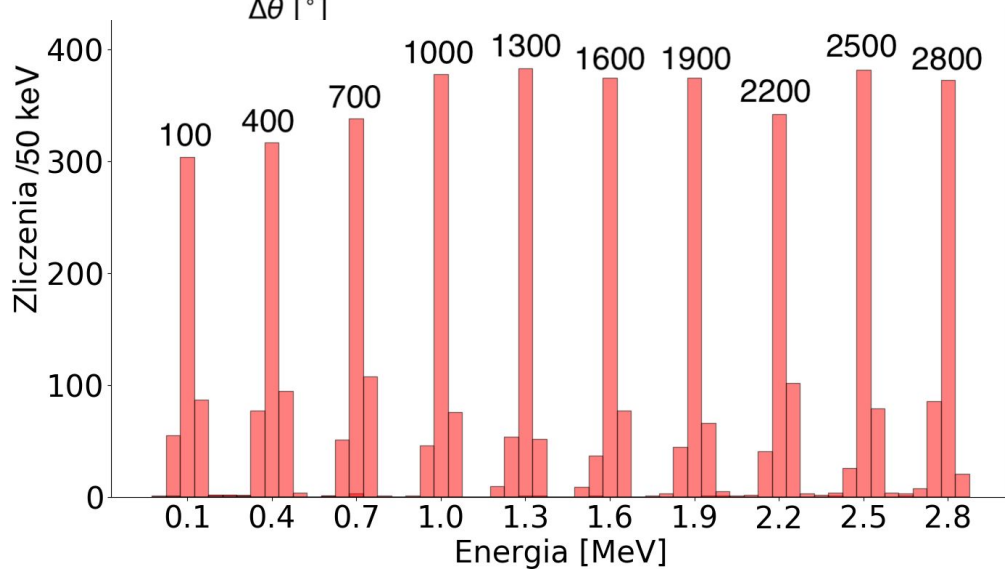
$$\theta_{\text{odtworzona}} = 153.5^\circ$$

Symulacje

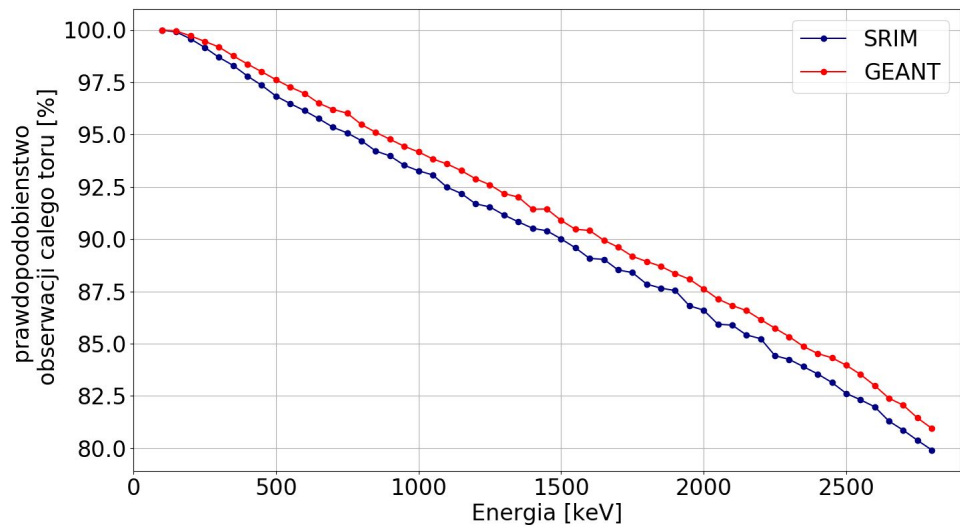
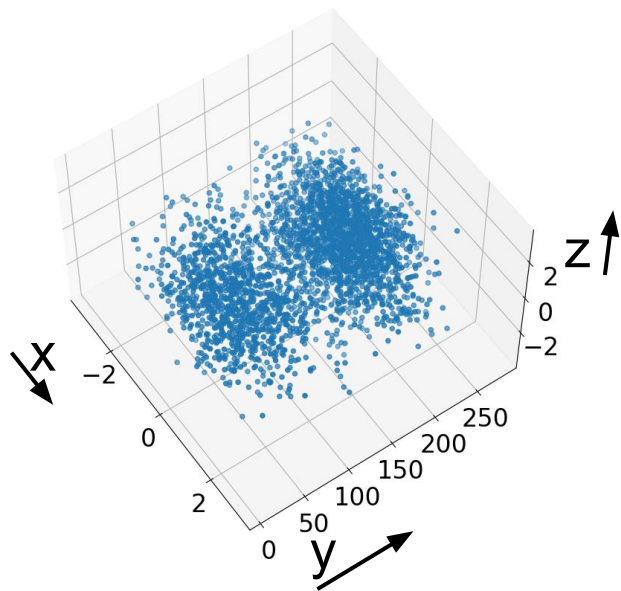
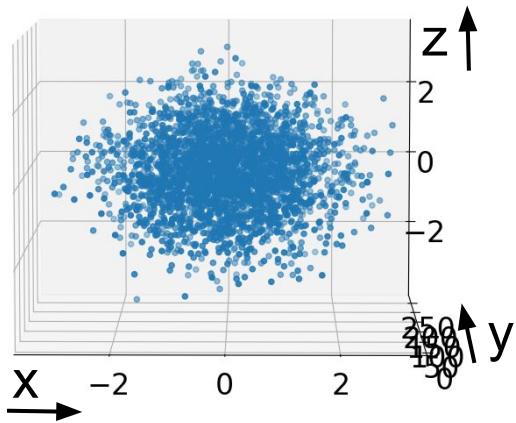


← Analiza widma „duńskiego”

Funkcja odpowiedzi „analizy danych” →

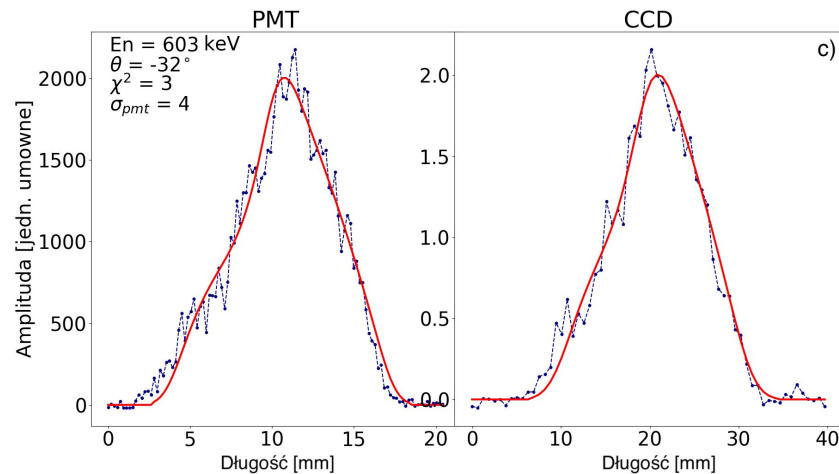
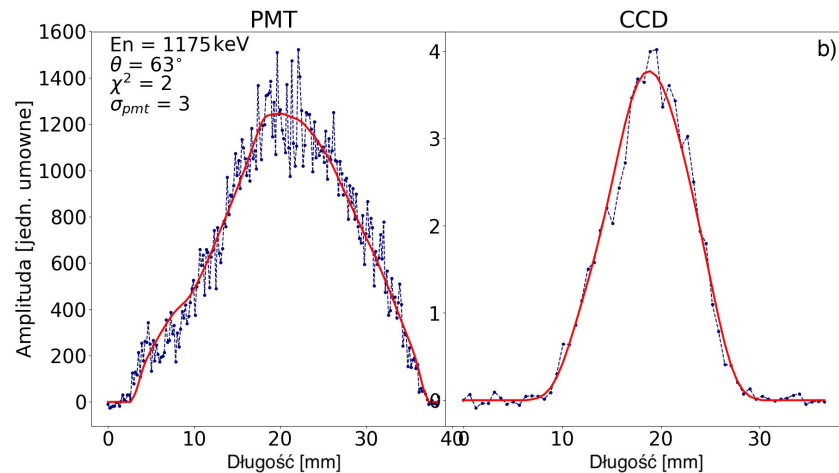
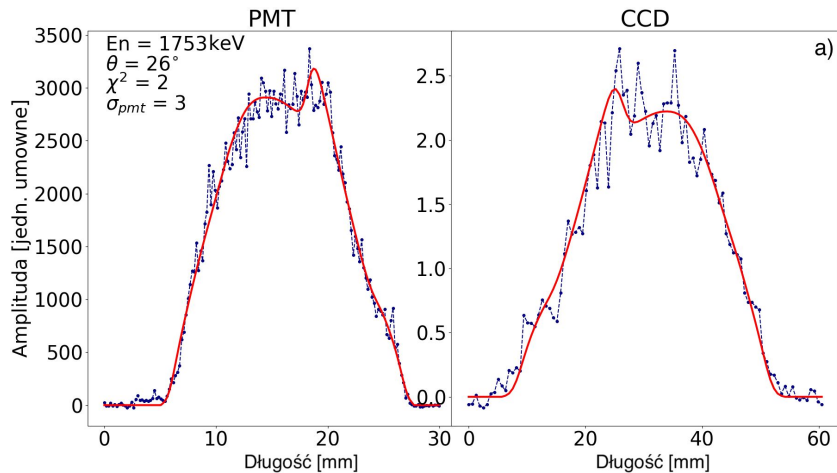
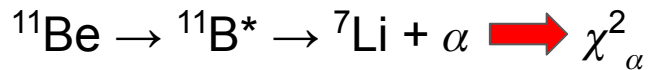


Symulacje

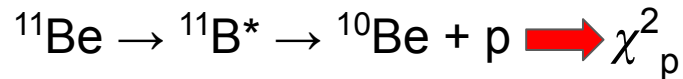


← Symulacje MC
obserwacji pełnego
śladu cząstki w
detektorze

Przykłady rekonstrukcji danych

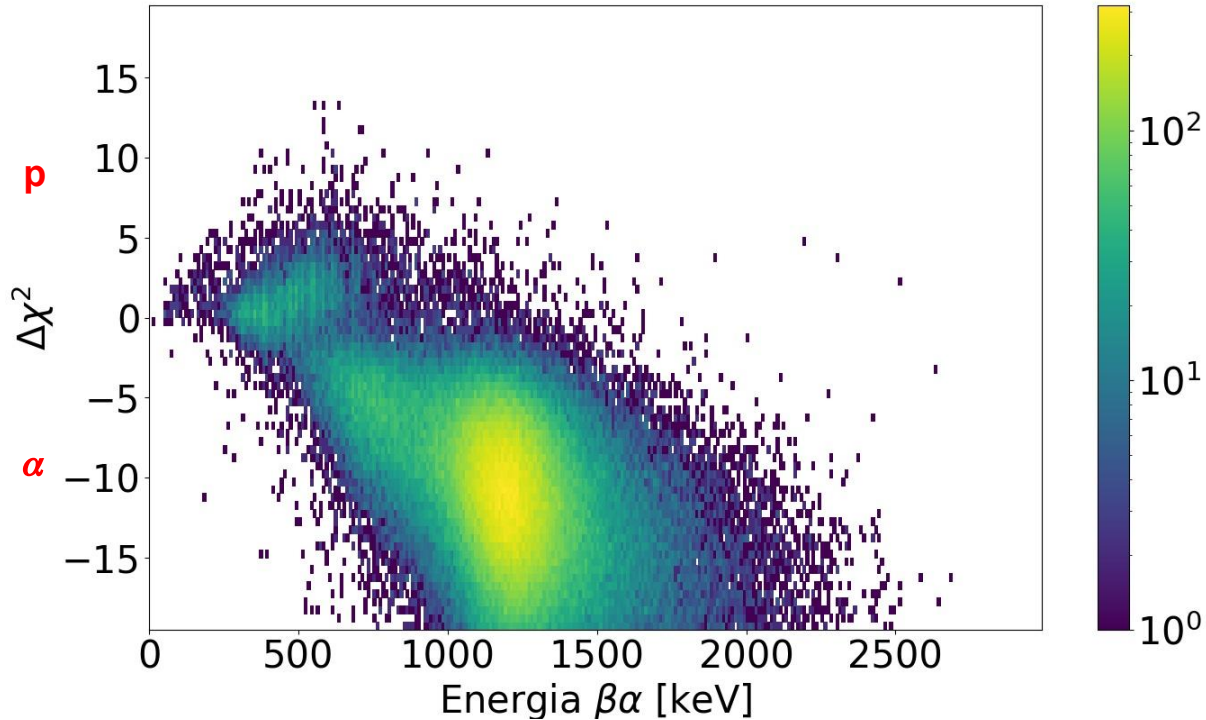


Do każdego zdarzenia dopasowano też scenariusz



Wybór zdarzeń $\beta\alpha$

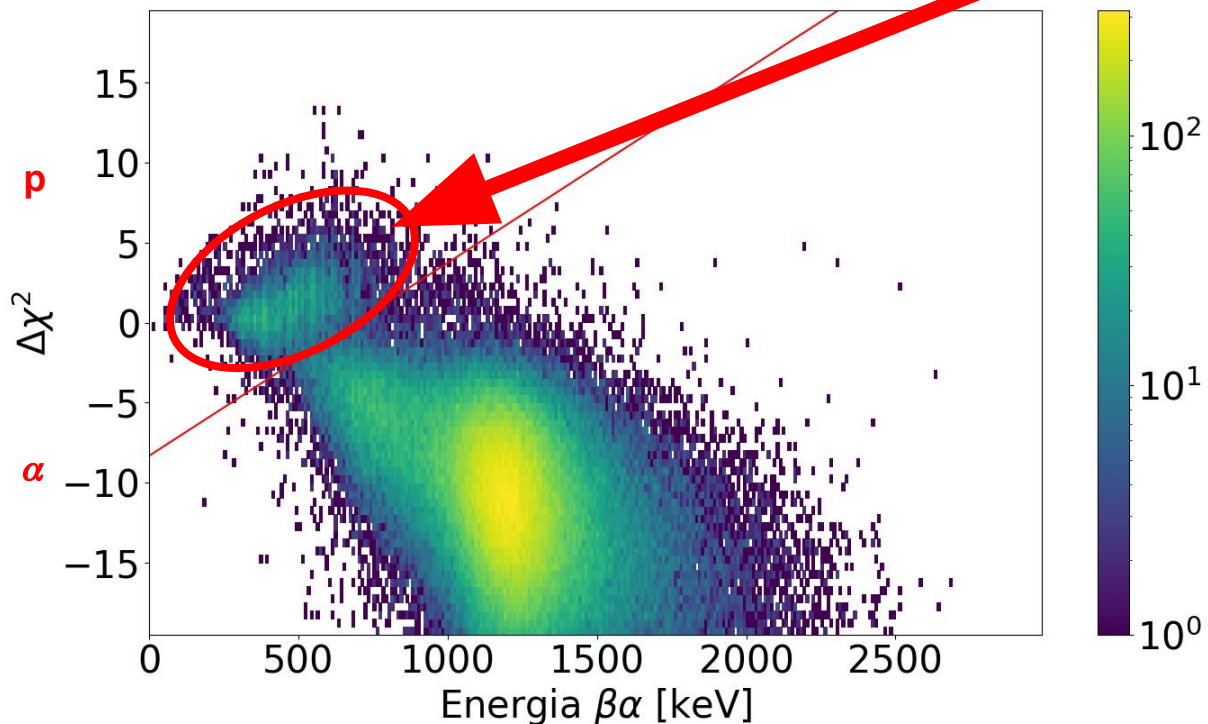
$$\Delta\chi^2 = \chi^2_{\alpha} - \chi^2_{\text{p}}$$



Wybór zdarzeń $\beta\alpha$

$$\Delta\chi^2 = \chi^2_{\alpha} - \chi^2_{\beta}$$

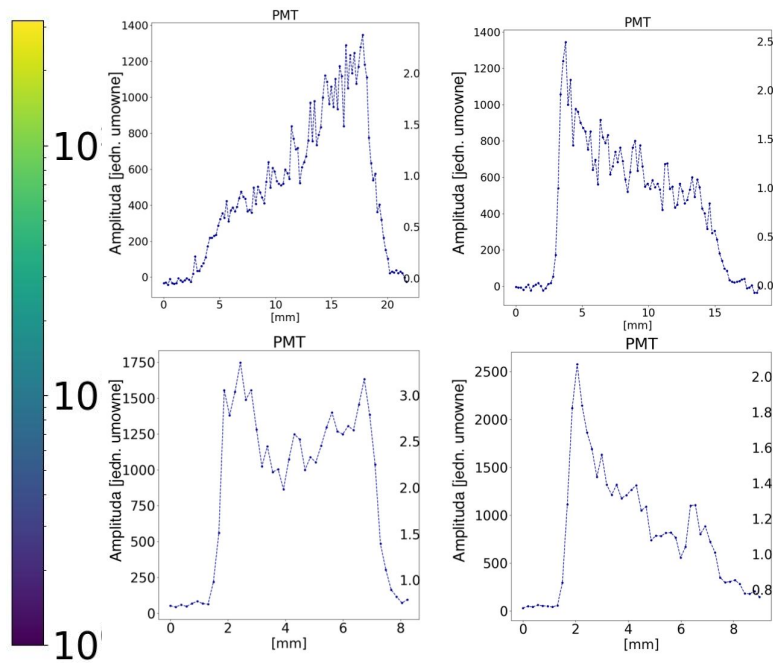
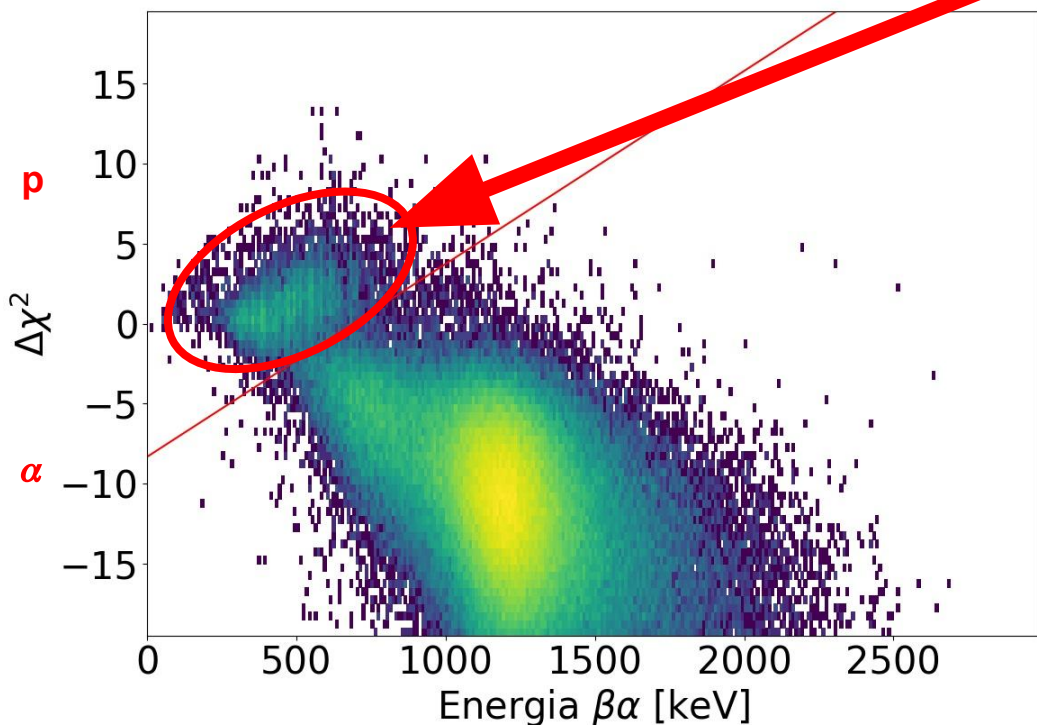
uszkodzone
zdarzenia (~ 3%)



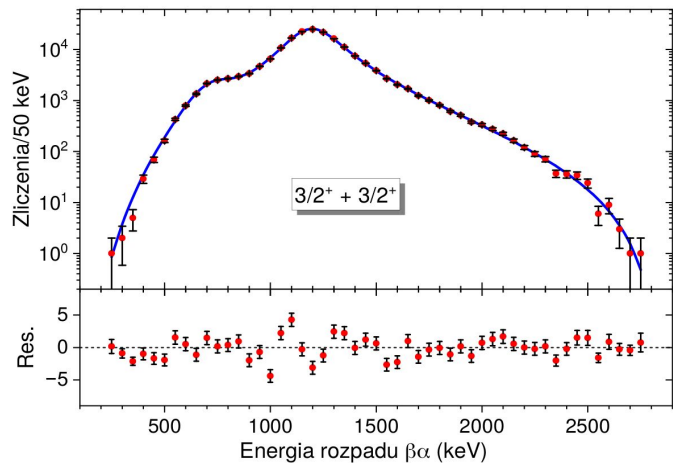
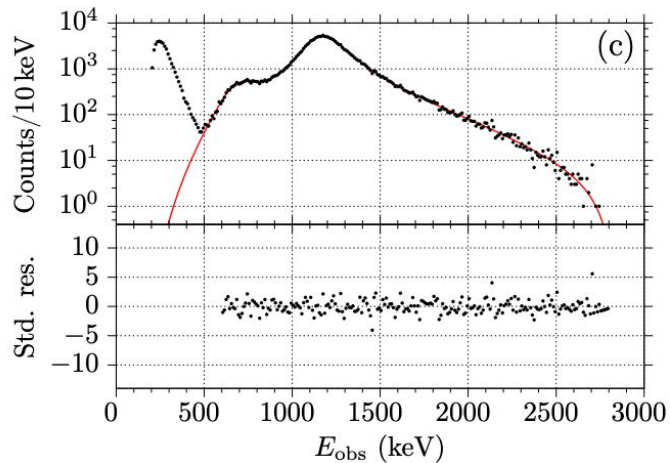
Wybór zdarzeń $\beta\alpha$

$$\Delta\chi^2 = \chi^2_{\alpha} - \chi^2_{\beta}$$

uszkodzone
zdarzenia (~ 3%)



Analiza widma $\beta\alpha$ - model macierzy R



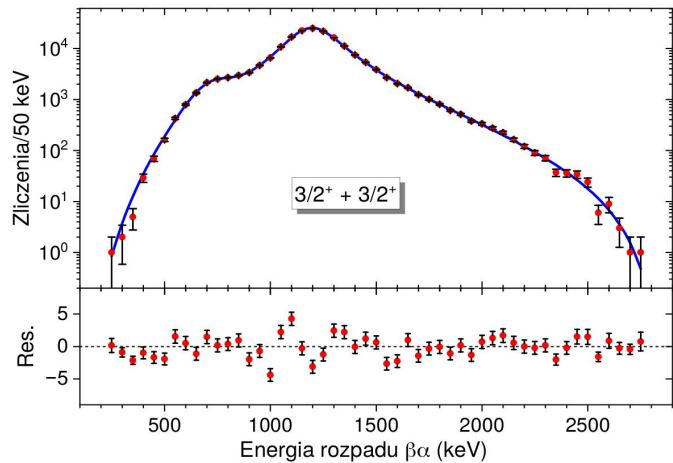
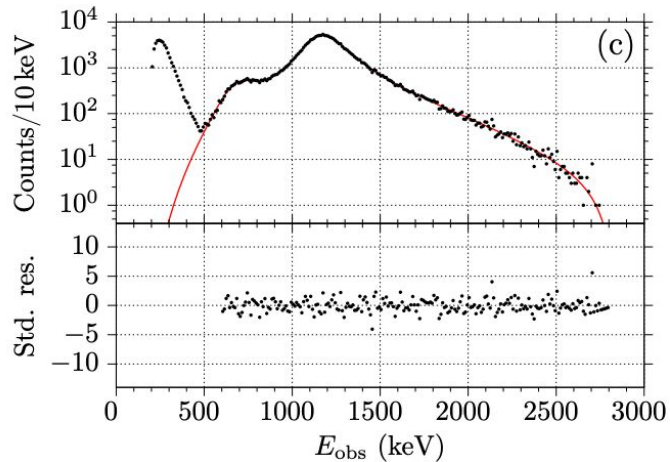
$$N(E) = \sum_c N_c(E),$$

$$N_c(E) = f_\beta P_c \left| \sum_{\lambda\mu} B_\lambda \gamma_{\lambda c} A_{\lambda\mu} \right|^2$$

- c - numeruje kanał rozpadu (${}^7\text{Li}$ (g.s) i ${}^7\text{Li}^*$)
- λ, μ - numeruje stany w ${}^{11}\text{B}$
- f_β - funkcja Fermiego (NNDC)
- P_c - przenikalność bariery kulombowskiej
- B_λ - współczynnik zasilania stanu
- $\gamma_{\lambda c}$ - zredukowana szerokość
- $A_{\lambda\mu}$ - element macierzowy stanów - zależny on E

$$\chi_L^2 = 2 \sum_i \left[y_i - n_i + n_i \log \left(\frac{n_i}{y_i} \right) \right]$$

Analiza widma $\beta\alpha$ - model macierzy R



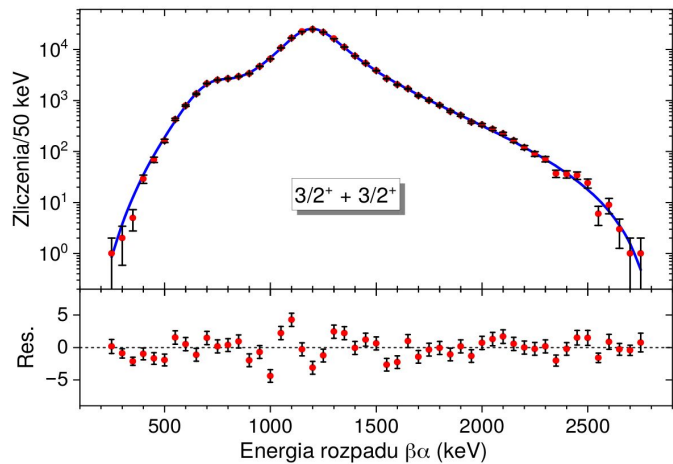
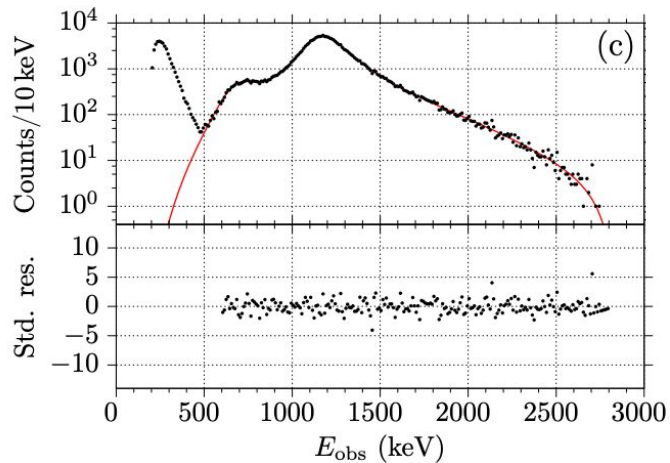
$$N(E) = \sum_c N_c(E),$$

$$N_c(E) = f_\beta P_c \left| \sum_{\lambda\mu} B_\lambda \gamma_{\lambda c} A_{\lambda\mu} \right|^2$$

- c - numeruje kanał rozpadu (${}^7\text{Li}$ (g.s) i ${}^7\text{Li}^*$)
- λ, μ - numeruje stany w ${}^{11}\text{B}$
- f_β - funkcja Fermiego (NNDC)
- P_c - przenikalność bariery kulombowskiej
- B_λ - współczynnik zasilania stanu
- $\gamma_{\lambda c}$ - zredukowana szerokość
- $A_{\lambda\mu}$ - element macierzowy stanów - zależny on E

$$\chi_L^2 = 2 \sum_i \left[y_i - n_i + n_i \log \left(\frac{n_i}{y_i} \right) \right]$$

Analiza widma $\beta\alpha$ - model macierzy R



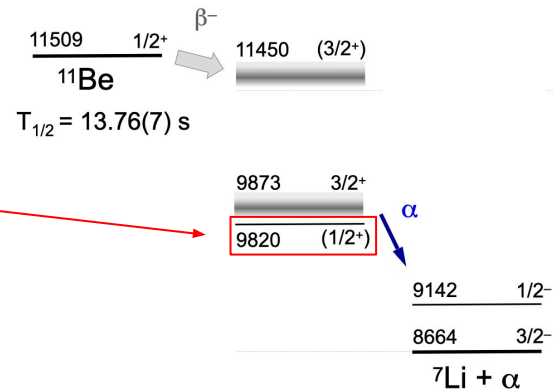
$$N(E) = \sum_c N_c(E), \quad M_{GT,\lambda} = \left(\frac{\pi D}{N t_{1/2}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \sum_c \gamma_{\lambda c}^2 \frac{dS_c}{dE} \Big|_{E_\lambda} \right)^{-\frac{1}{2}} B_\lambda,$$

$$N_c(E) = f_\beta P_c \left| \sum_{\lambda\mu} B_\lambda \gamma_{\lambda c} A_{\lambda\mu} \right|^2$$

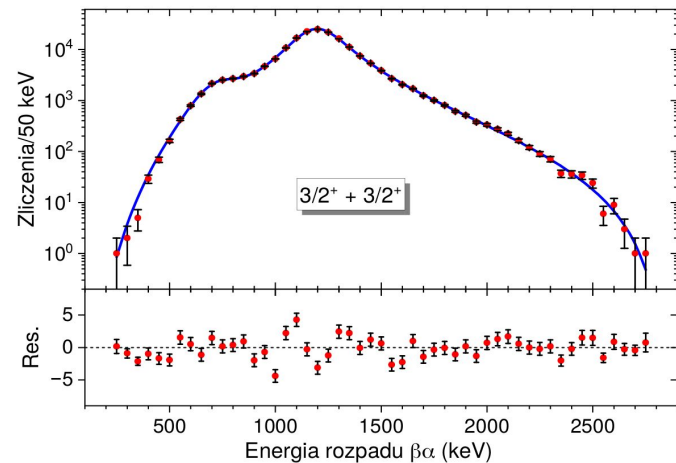
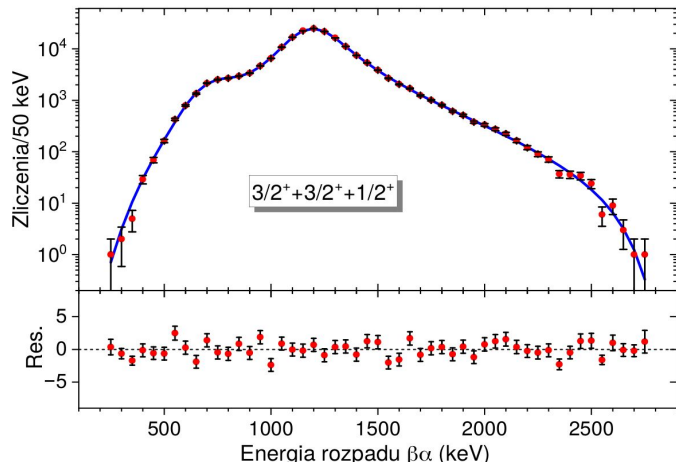
$$\log(ft)_\lambda = \log \left[\frac{D}{M_{GT,\lambda}^2} \right]$$

	Refsgard i inn.	Ta praca (dwa stany 3/2)
E_1 [keV]	9 841(1)[10]	9 901(1)[30]
$\log(ft)_1$	4.08(3)[2]	4.027(2)[40]
E_2 [keV]	11 490(80)[50]	11 682(75)[260]
$\log(ft)_2$	3.8(3)[1]	3.72(2)[30]

Analiza widma $\beta\alpha$ - model macierzy R

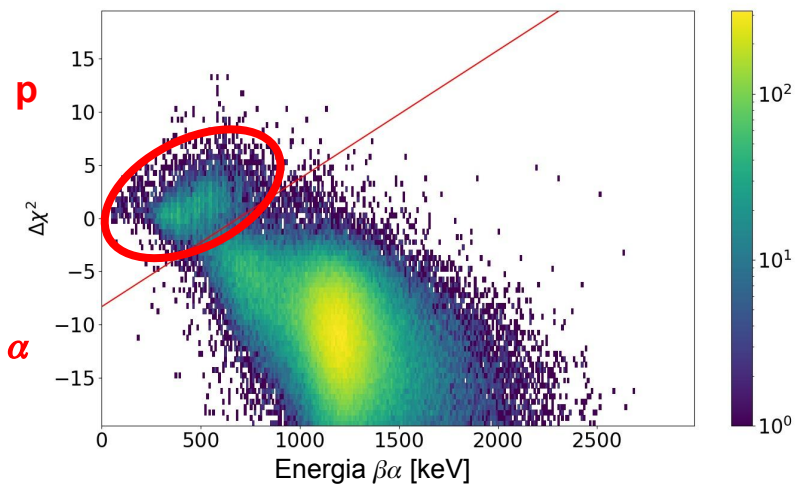


spróbujemy dołożyć stan 1/2

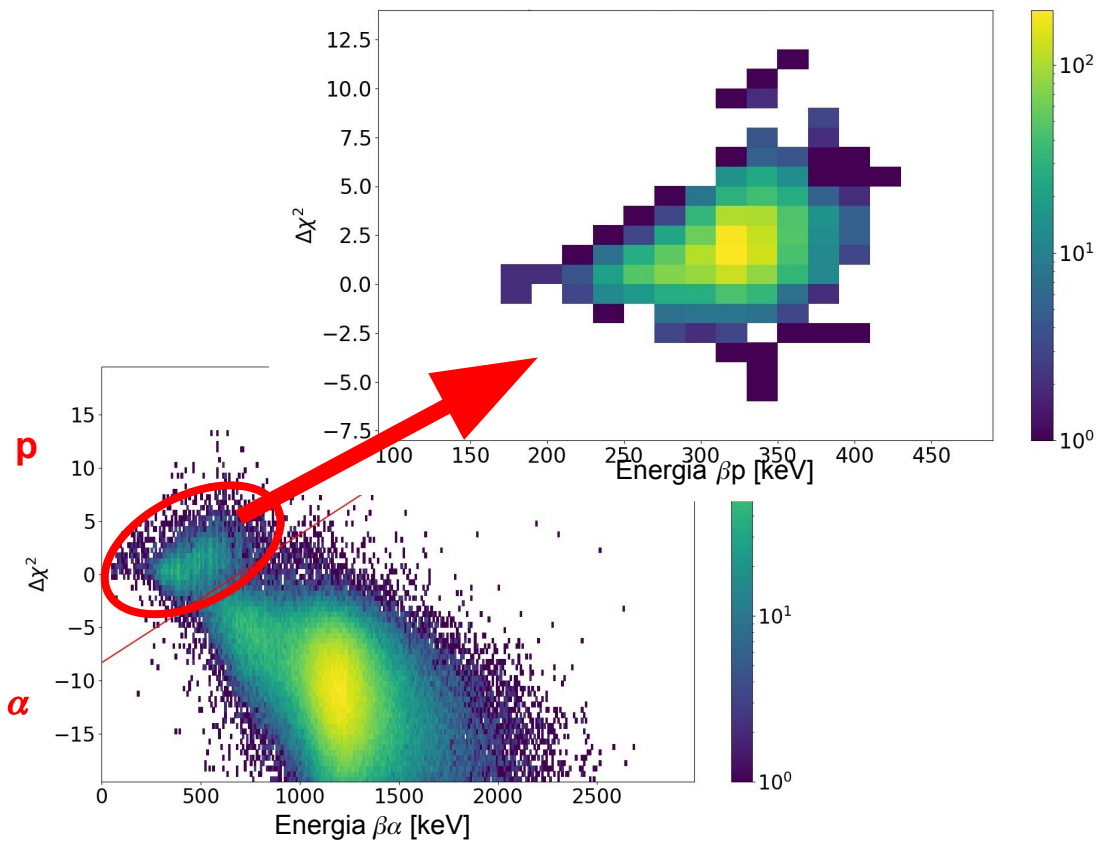


	dwa stany 3/2	dwa stany 3/2 + 1/2
E_1 [keV]	9 901(1)[30]	9 912(6)[35]
$\log(ft)_1$	4.027(2)[40]	4.08(2)[3]
E_2 [keV]	11 682(75)[260]	11 672(200)[40]
$\log(ft)_2$	3.72(2)[30]	4.2(2)[10]
E_3 [keV]		9 810(25)[40]
$\log(ft)_3$		5.1(2)[2]

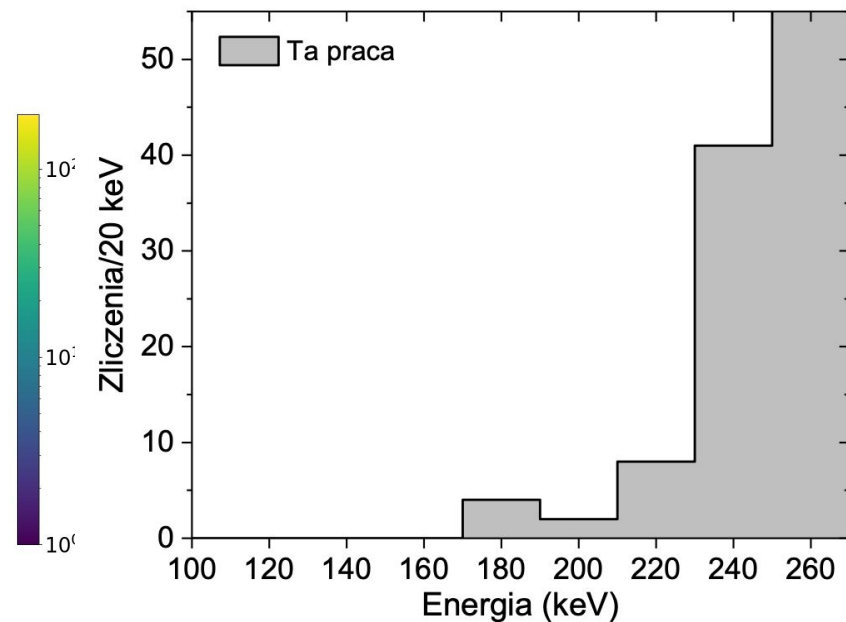
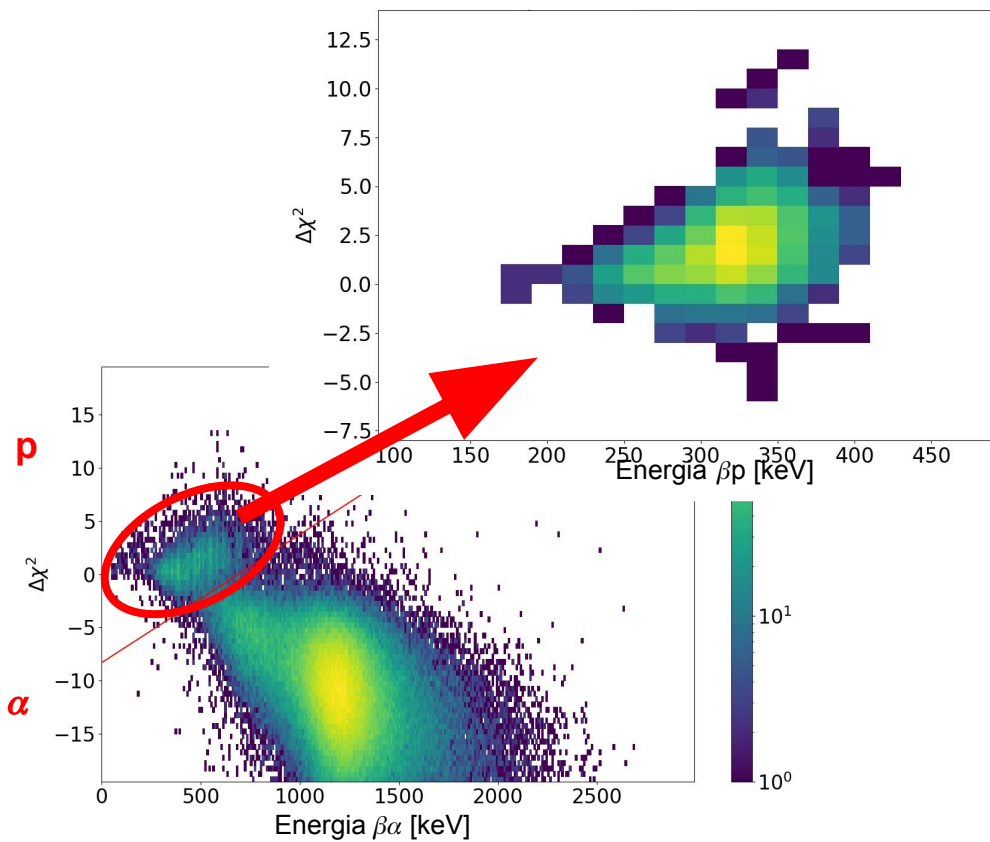
Poszukiwanie zdarzeń $\beta\beta$



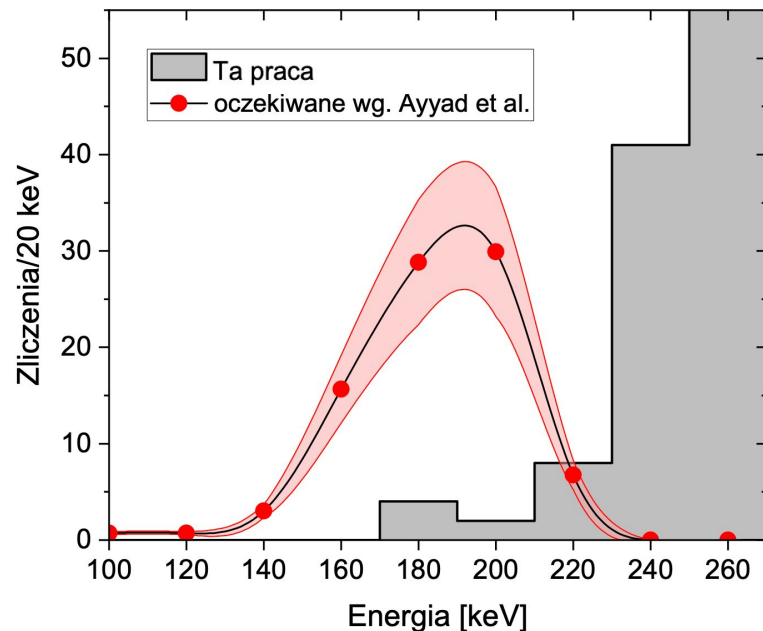
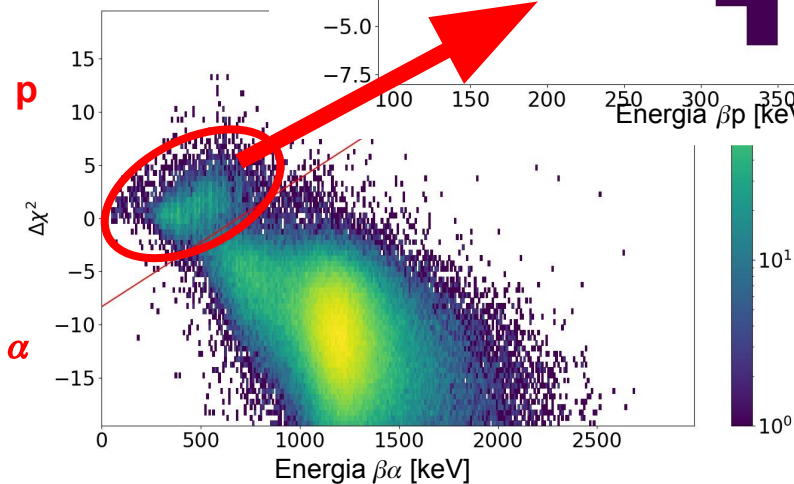
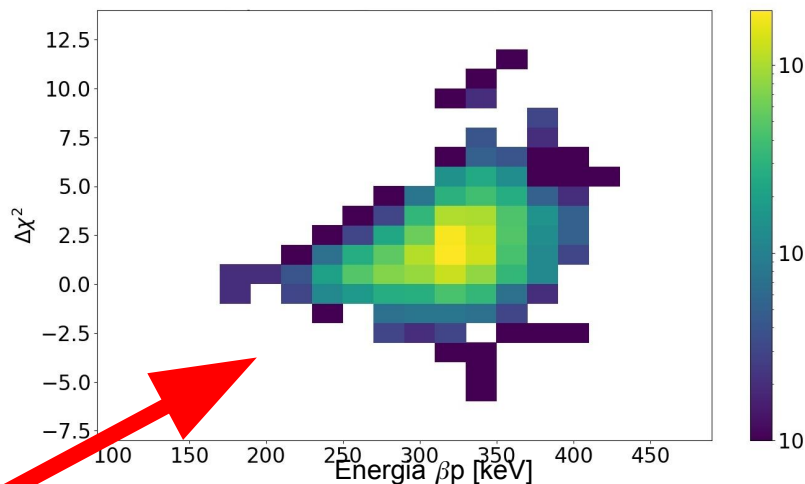
Poszukiwanie zdarzeń βp



Poszukiwanie zdarzeń $\beta\beta$



Poszukiwanie zdarzeń βp



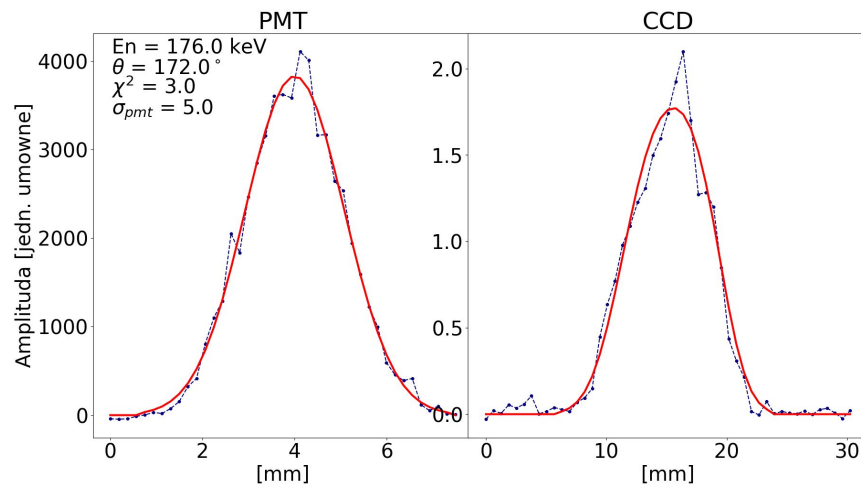
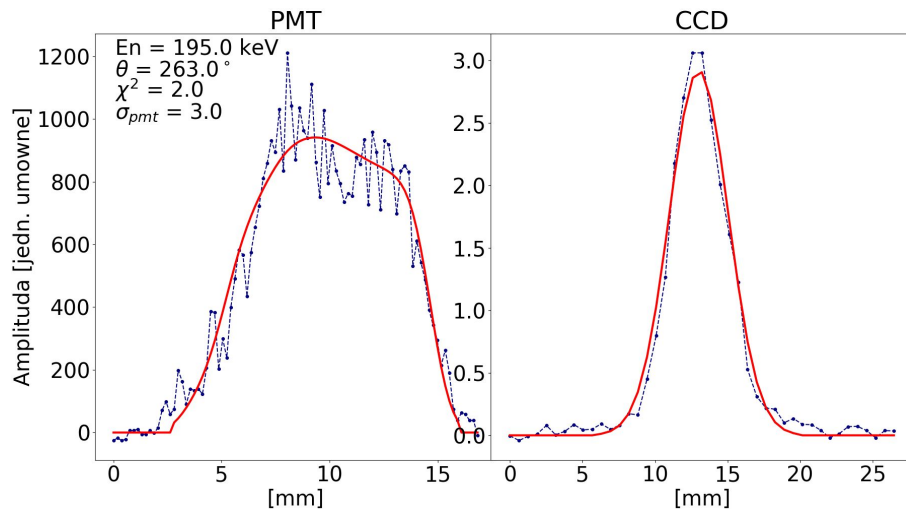
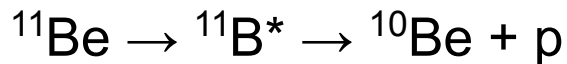
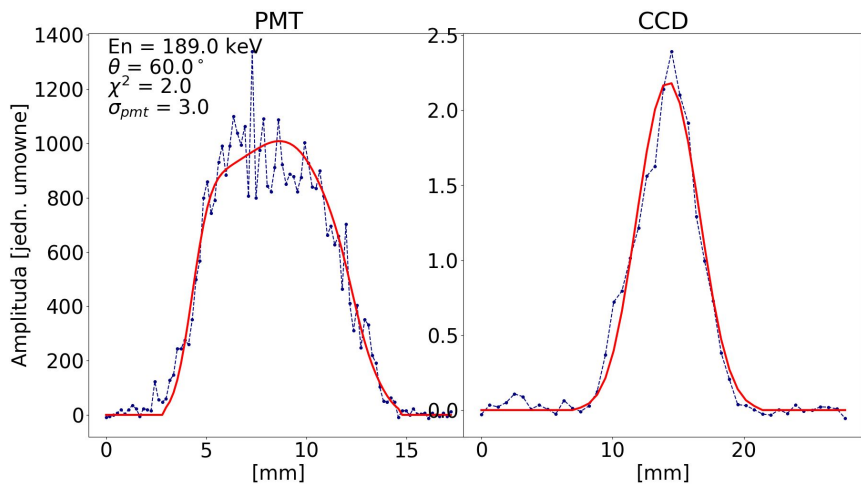
Symulacje w GEANT4 (V. Guadilla),
 $BR(\beta p) 1.3 \times 10^{-5}$

→ oczekujemy ~ 90 zdarzeń

$BR(\beta p) < 2 \times 10^{-6}$

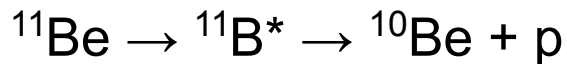
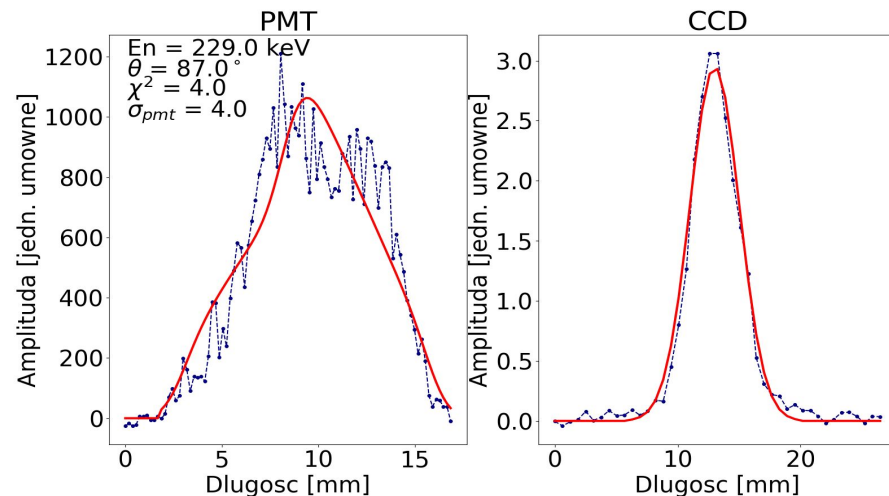
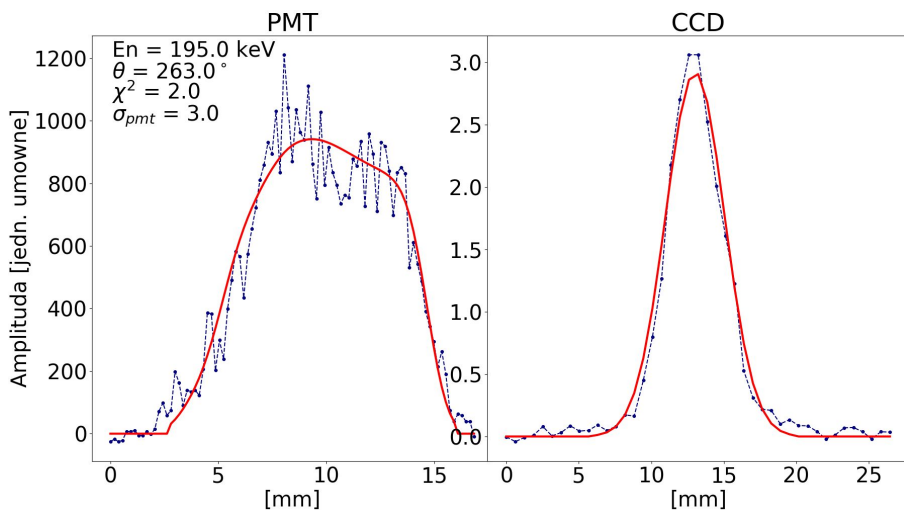
Poszukiwanie zdarzeń βp

- przykłady kandydatów na protony



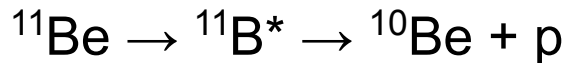
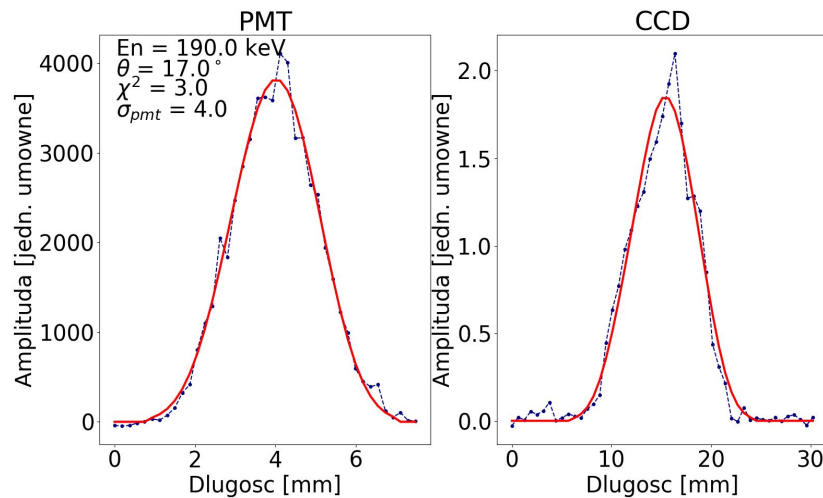
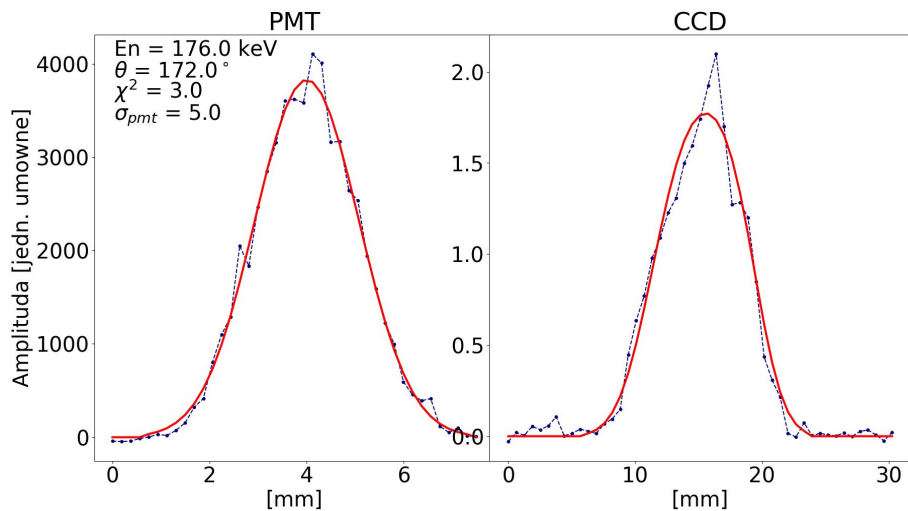
Poszukiwanie zdarzeń βp

- przykład kandydata na zdarzenie z emisją protonu



Poszukiwanie zdarzeń βp

- przykład zdarzenia niejednoznacznego



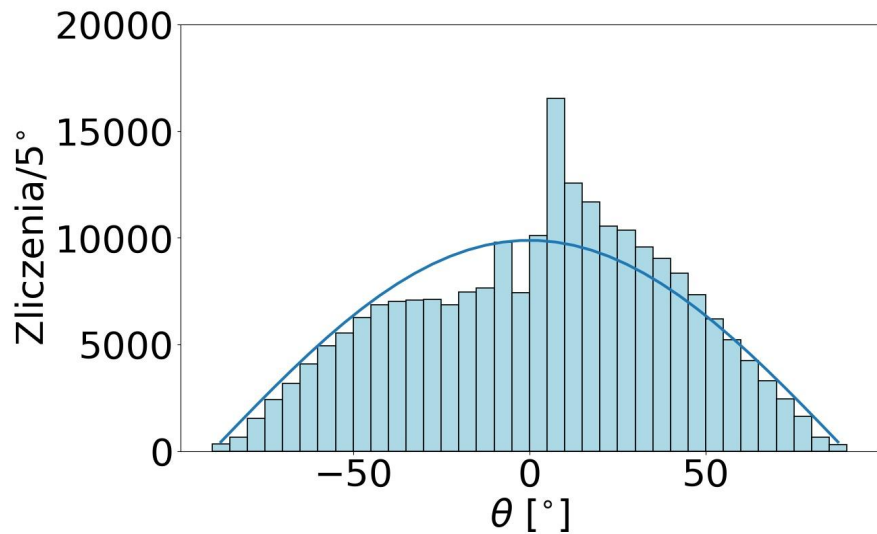
Podsumowanie

- Zmierzyliśmy $BR(\beta\alpha)$ z ^{11}Be i otrzymany wynik jest zgodny z literaturą
- Zmierzyliśmy widmo $\beta\alpha$ z ^{11}Be w pełnym zakresie energii
- Wynik analizy widma $\beta\alpha$ zgodny z J. Refsgaard et al.
- Możliwy udział trzeciego stanu w ^{11}B w procesie $\beta\alpha$
- Zidentyfikowaliśmy kilka kandydatów na zdarzenia βp , ale $BR(\beta p) < 2 \times 10^{-6}$ dla energii poniżej 230 keV
 - zgodny z ostatecznym wynikiem K. Riisager'a et al.
 - sprzeczny z pracą Y. Ayyad et al.

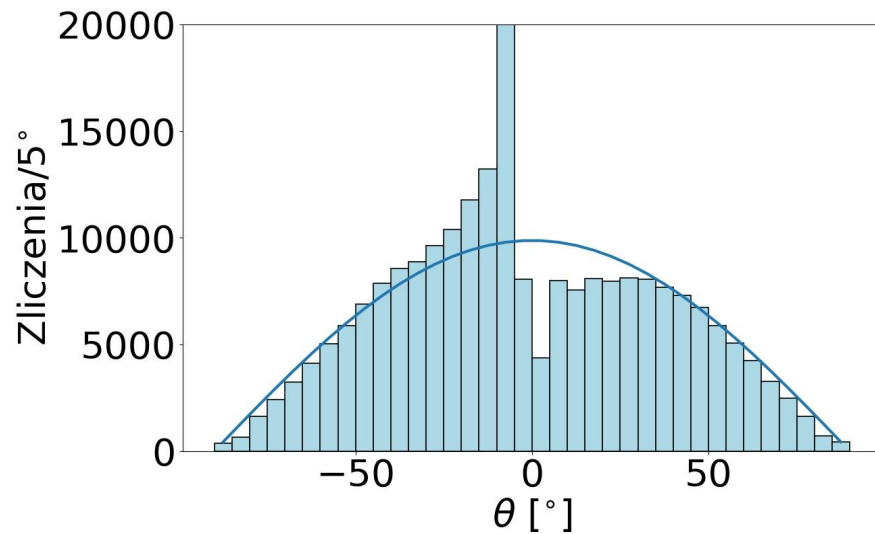
Dziękuję za uwagę!

Rekonstrukcja danych - rozkład kątowy

Model GEANT



Model SRIM



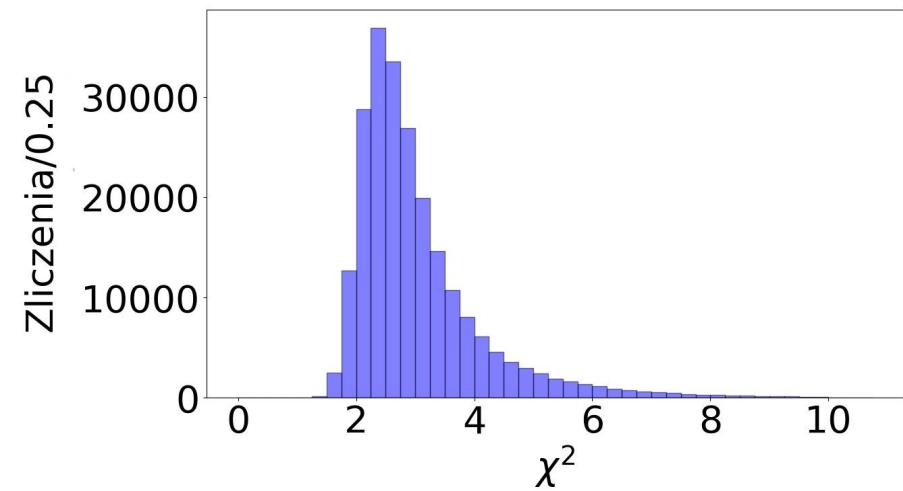
Wzór na χ^2

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^n \left(\frac{f_i - d_i}{err_{CCD}} \right)^2 + \sum_{i=0}^m \left(\frac{g_i - e_i}{err_{PMT}} \right)^2$$

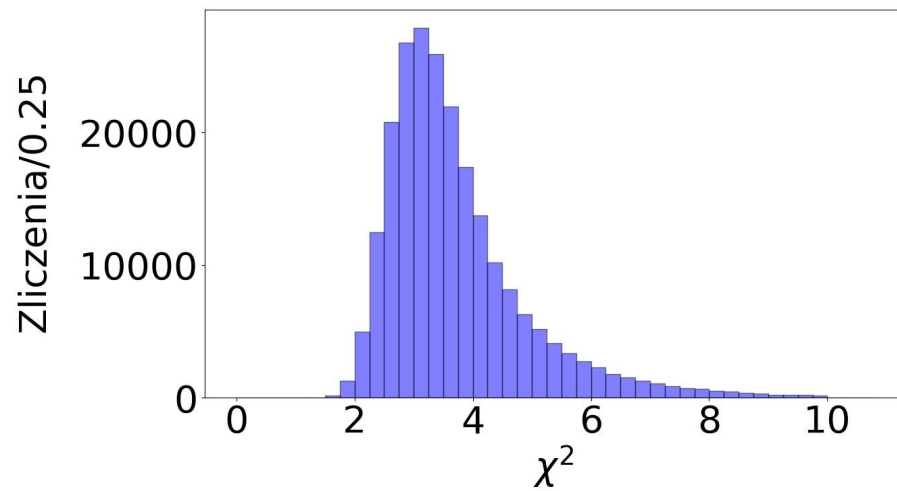
$$err = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (d_i - d_{ismooth})^2}{n}}$$

χ^2 - SRIM vs. GEANT4

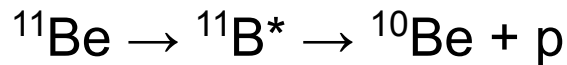
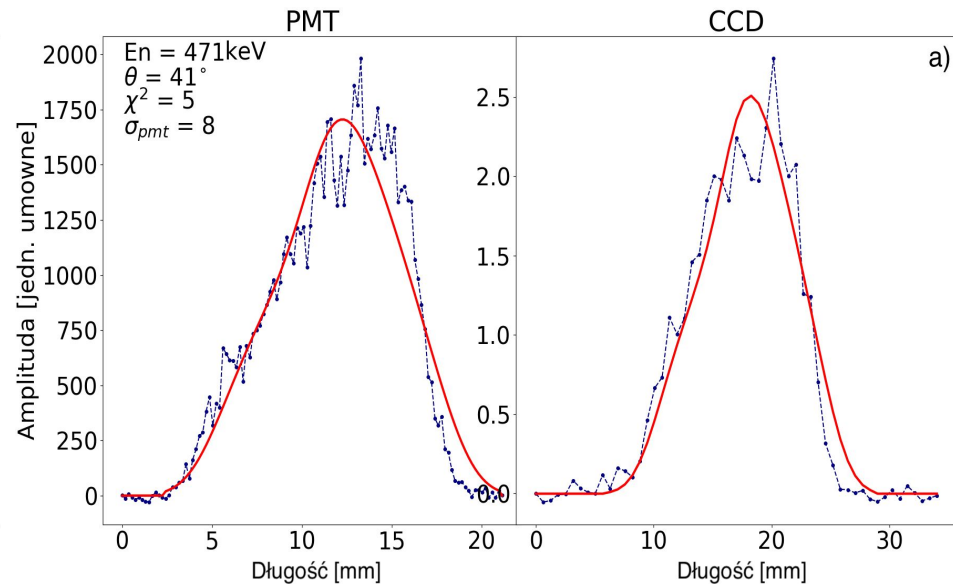
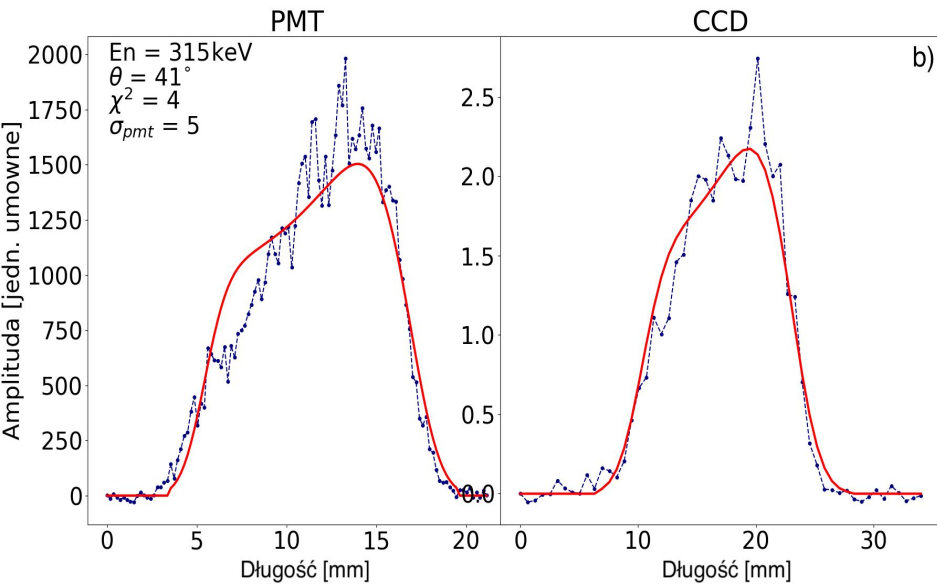
SRIM



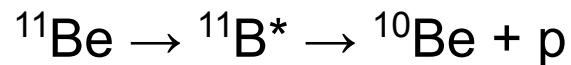
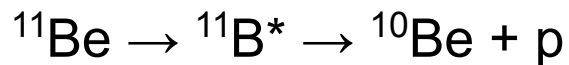
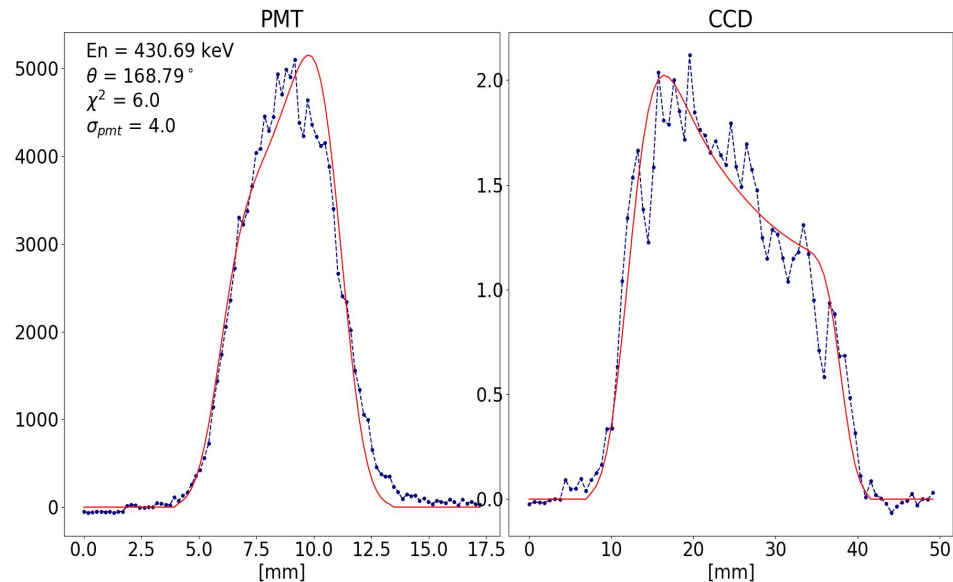
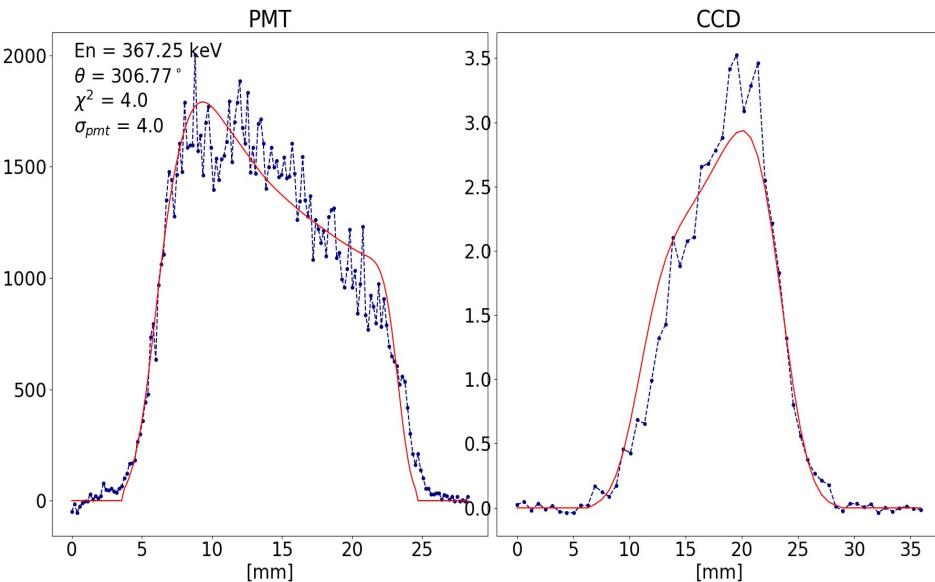
GEANT4



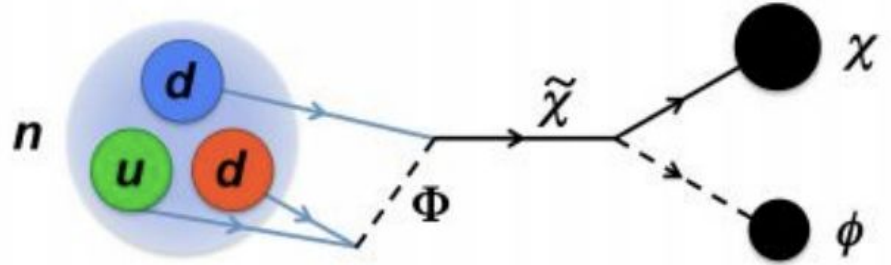
Zdarzenie - prawdopodobnie ucięte



Zdarzenie - prawdopodobnie ucięte



Problem czasu życia neutronu



- eksperymenty „butelkowe”:

$$\tau^{\text{bottle}} = 877.75 (20) \text{ s} \leftarrow \text{wszystkie rozpady}$$

- eksperyment „na wiązce”:

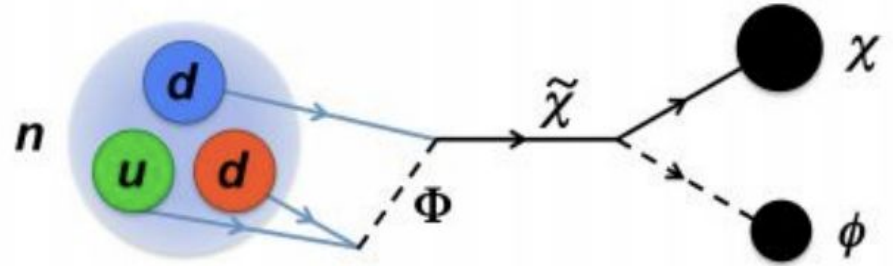
$$\tau^{\text{beam}} = 887.7(2.2) \text{ s} \leftarrow \text{tylko rozpady } \beta$$

B. Fornal i B. Grinstein, PRL 120, 191801 (2018):

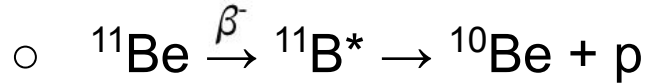
- 99% \rightarrow rozpady β
- 1% \rightarrow rozpad z emisją DM
- w jądrze atomowym:

$$937.993 \text{ MeV} < m_{\chi} < 939.565 \text{ MeV} - S_n$$

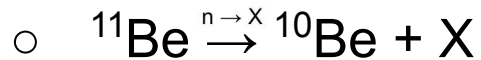
Problem czasu życia neutronu



- w ^{11}Be :
 $937.993 \text{ MeV} < m_x < 939.06 \text{ MeV}$
- próba interpretacji eksperymentów AMS:



ale również:



Eksperyment w Katanii - widmo

