

ZAKŁAD FIZYKI JĄDROWEJ
UNIwersYTET WARSZAWSKI

WYDZIAŁ
FIZYKI
UNIwersYTET
WARSZAWSKI

Neutrono-deficytowe izotopy cynku – produkcja, promieniotwórczość dwuprotonowa i inne kanały rozpadu

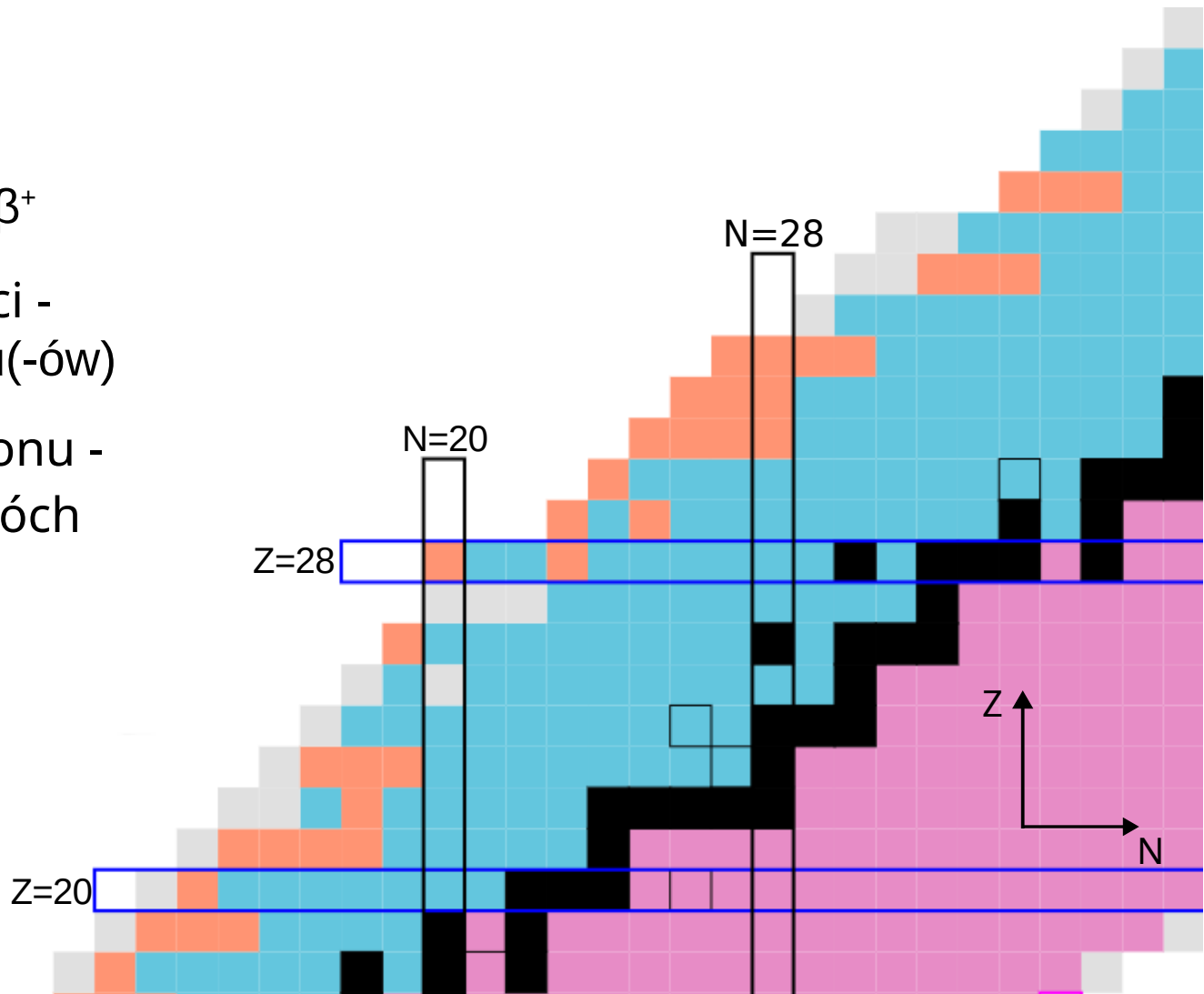
Adam Kubiela

Neutrono-deficytowe izotopy cynku – produkcja, promieniotwórczość dwuprotonowa i inne kanały rozpadu

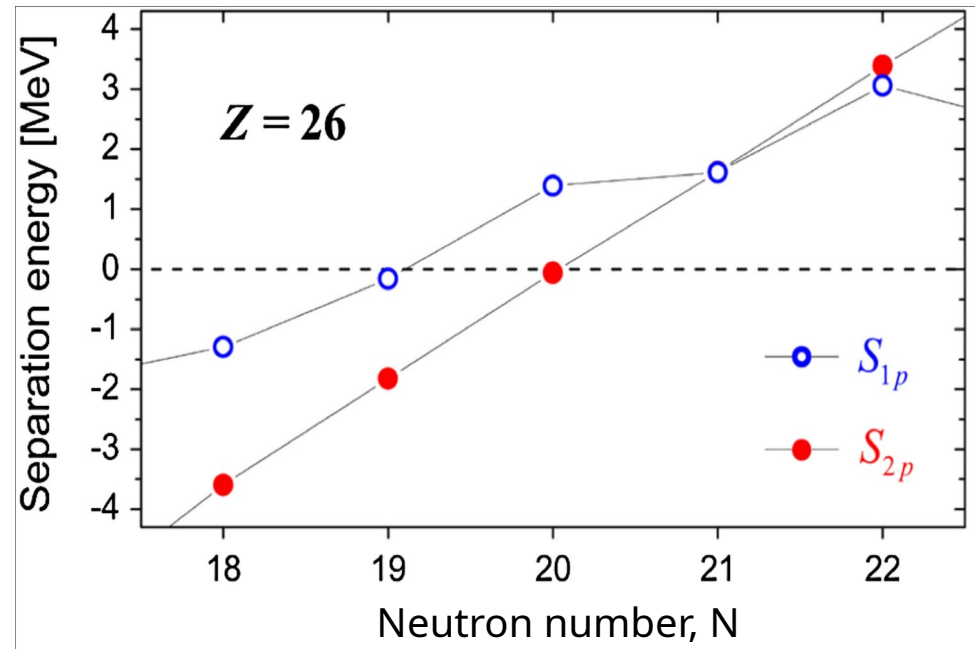
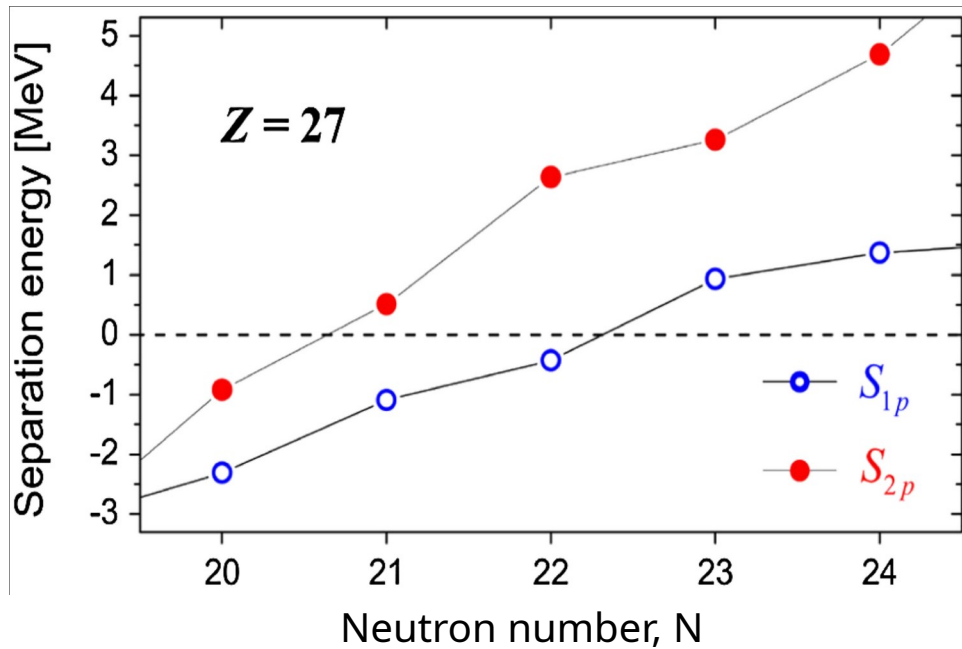
- 1) Wprowadzenie
 - neutrono-deficytowe jądra
 - promieniotwórczość 2p
 - przypadek ^{54}Zn
 - eksperyment w RIKEN
- 2) Badanie przekrojów czynnych
 - Opis układu eksperymentalnego
 - Analiza danych & wyniki
 - Reakcja fragmentacji i model AA
- 3) Badanie rozpadów cynku
 - Detektor OTPC
 - Rejestracja & rekonstrukcja torów cząstek
 - Rozpady $^{54, 55} \& ^{56}\text{Zn}$ – energia, BR, czas życia
- 4) Podsumowanie

Neutrono-deficytowe jądra atomowe

- Domyślny kanał rozpadu: β^+
- Jądra dalekie od stabilności - β -opóźniona emisja protonu(-ów)
- poza linią odpadania protonu - emisja protonu/emisja dwóch protonów



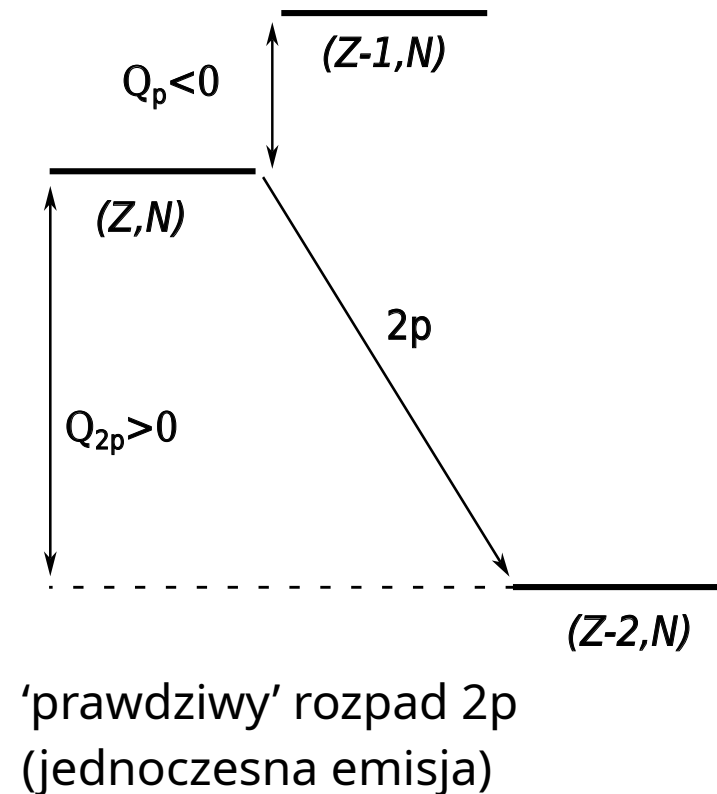
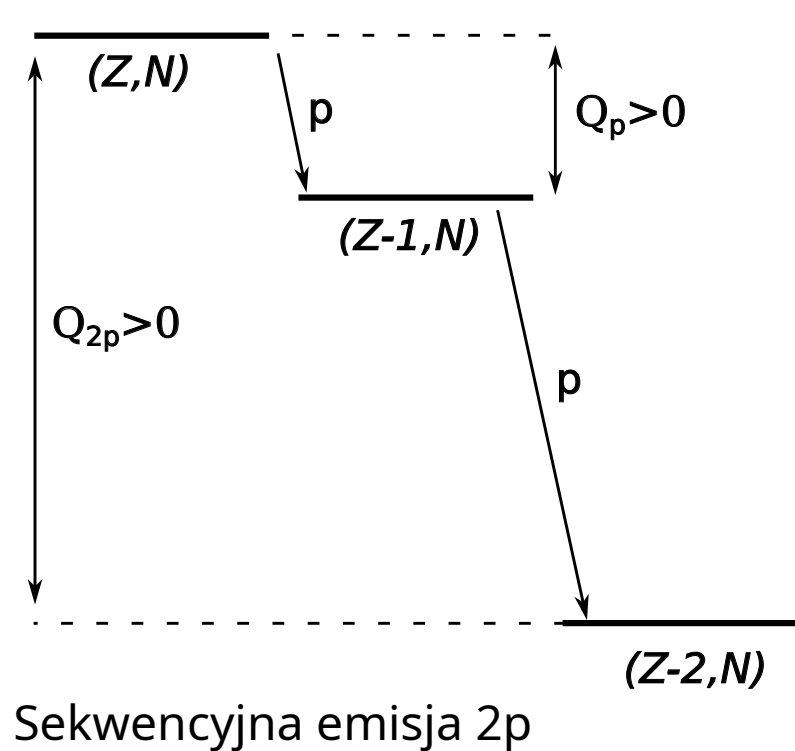
Promieniotwórczość 2p



$$S_p = B(A, Z) - B(A-1, Z-1)$$
$$S_{2p} = B(A, Z) - B(A-2, Z-2)$$

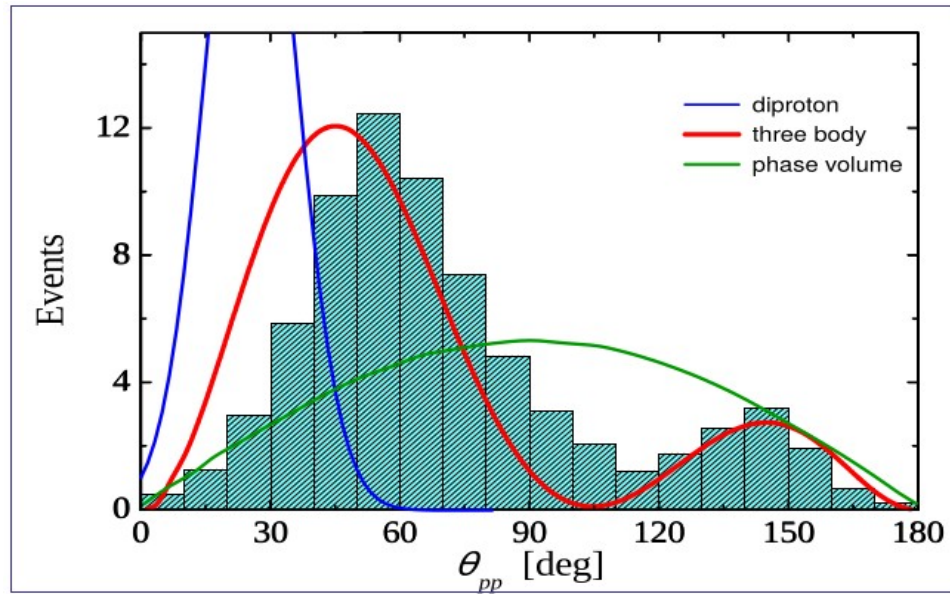
- Oddziaływanie *pairing* 'stabilizuje' jądra o parzystym Z
- $S_p > 0$ & $S_{2p} < 0 \rightarrow$ promieniotwórczość 2p
- 2p konkuruje z rozpadem β^+

Promieniotwórczość 2p



Geometria rozpadu daje wgląd do mechanizmu zjawiska → detektory TPC

Promieniotwórczość 2p

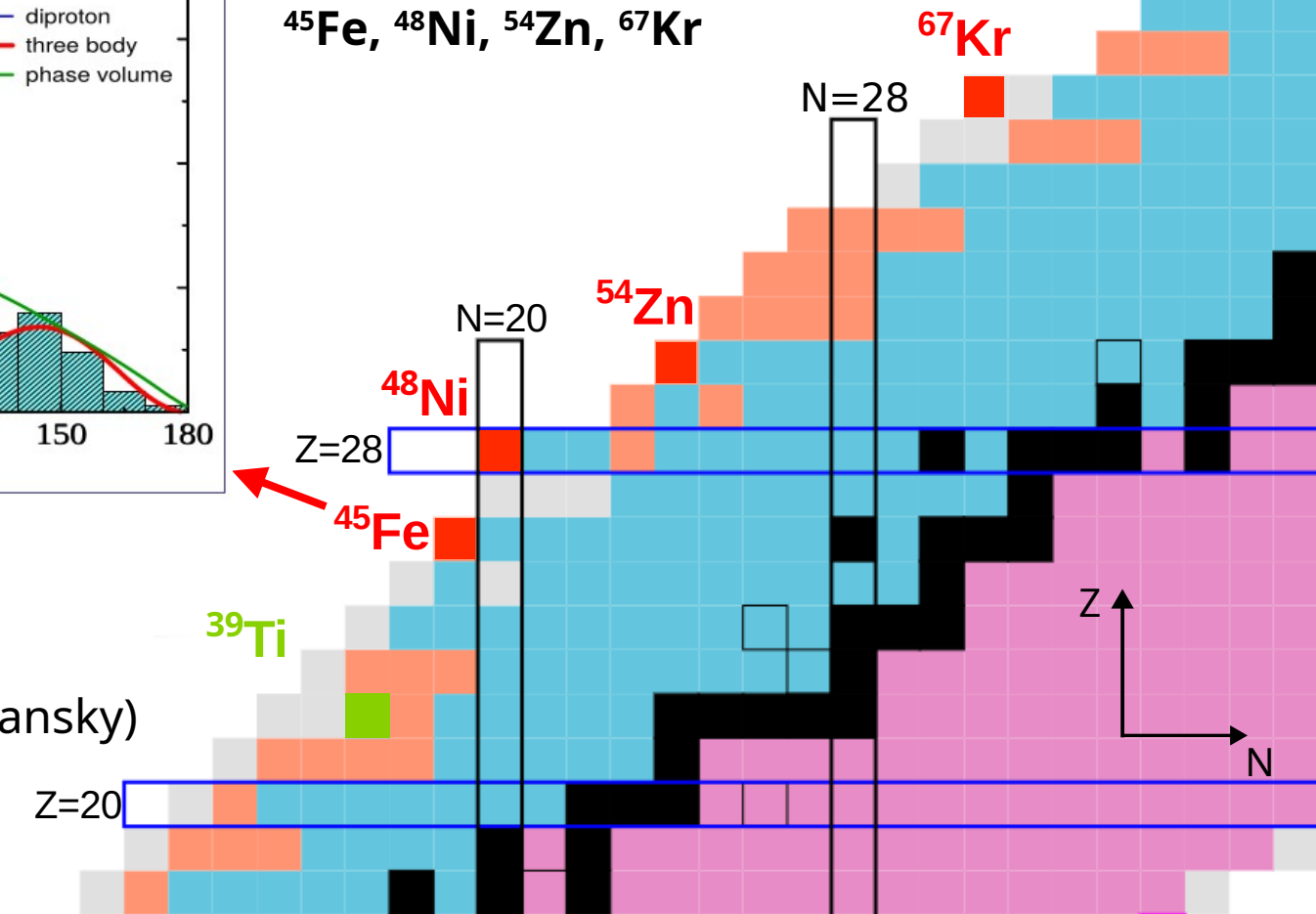


Rozkład kątów między protonami w rozpadzie ^{45}Fe (K. Miernik *et al.*, 2009)

- przewidziana w 1960r (V. I. Goldansky)
- pierwsza obserwacja w 2002 - ^{45}Fe (M. Pfützner, B. Blank)

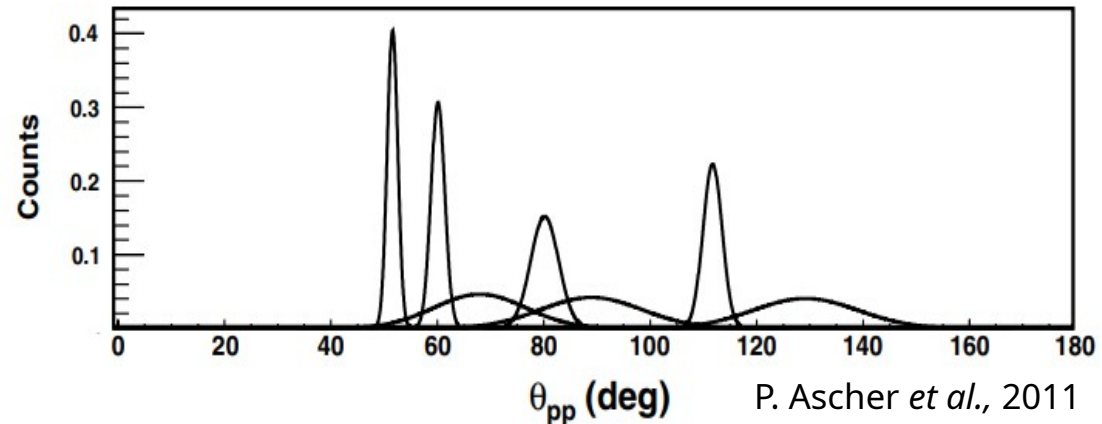
Znane emitery 2p (Z=20-36):

^{45}Fe , ^{48}Ni , ^{54}Zn , ^{67}Kr



Badania ^{54}Zn

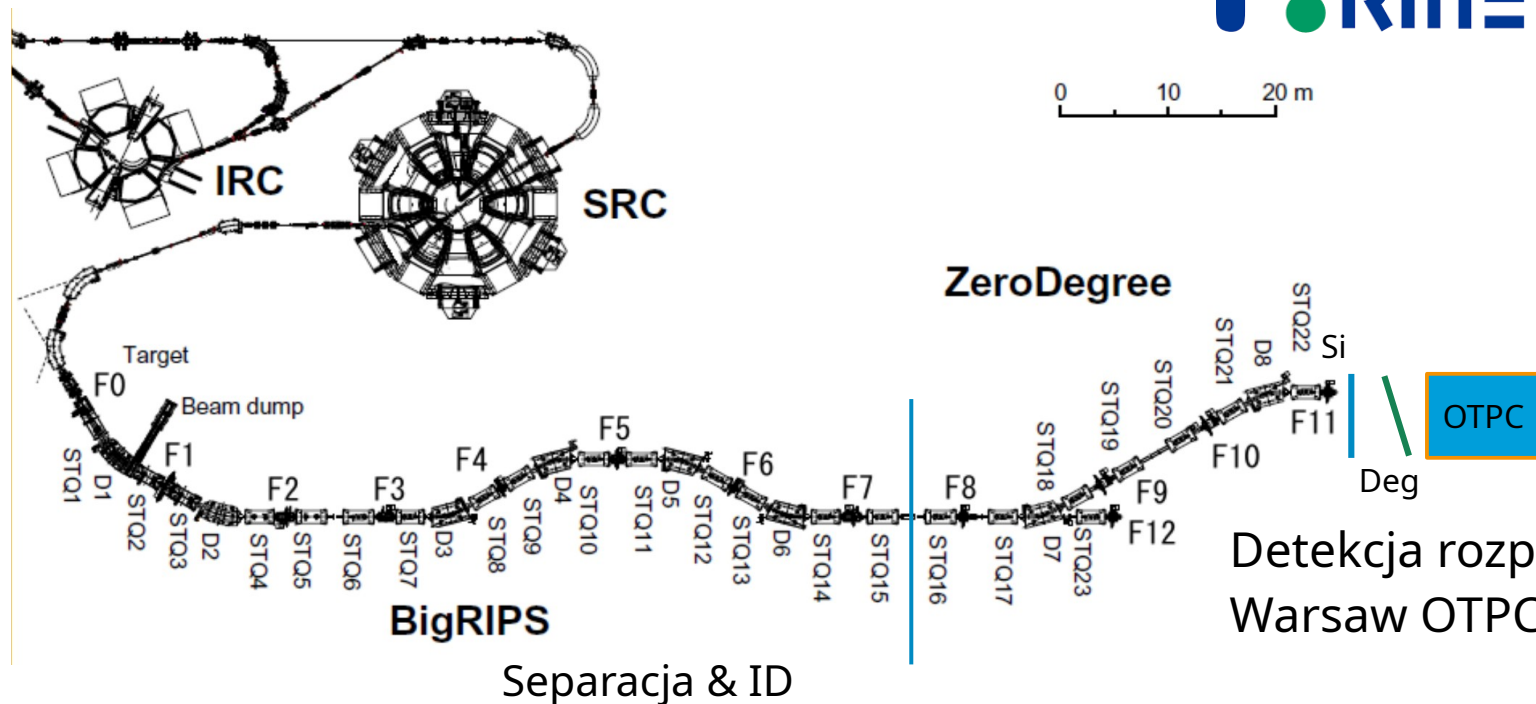
- Pierwsza obserwacja – GANIL, B. Blank *et al.*, 2005, det. Si, 8 implantacji
- Bezpośrednia obserwacja dwóch protonów: GANIL, P. Ascher *et al.*, det. TPC, 13 rozpadów 2p (7 w pełni zrekonstruowanych)
- Produkcja: fragmentacja $^{58}\text{Ni} + \text{Ni}$ @ 74.5 A MeV
- Przekrój czynny ~ 100 fb
- $T_{1/2} \sim 1.6$ ms



Główne wyzwania:

- Mały przekrój czynny \rightarrow trudna produkcja
- Krótki czas życia \rightarrow ograniczenia na separację i detekcję

Eksperyment OTPC @ RIKEN



Detekcja rozpadów:
Warsaw OTPC

Cele:

- Produkcja egzotycznych izotopów Zn w reakcji $^{78}\text{Kr} + \text{Be} \rightarrow$ przekroje czynne na produkcję
- Rozpad $2p$ ^{54}Zn – $T_{1/2}$, energia & **geometria** rozpadu
- Rozpady ^{55}Zn i ^{56}Zn – $T_{1/2}$, BR, kanały rozpadu

Pomiar przekrojów czynnych ^{54,55&56}Zn

Pomiar przekrojów czynnych

Zidentyfikowane jony Zn

Masa molowa tarczy

$$\sigma = \frac{N_{Zn}}{N_{Beam}} \frac{A}{d N_A T \eta}$$

Wydajność rejestracji (dead time)

Wiązka pierwotna

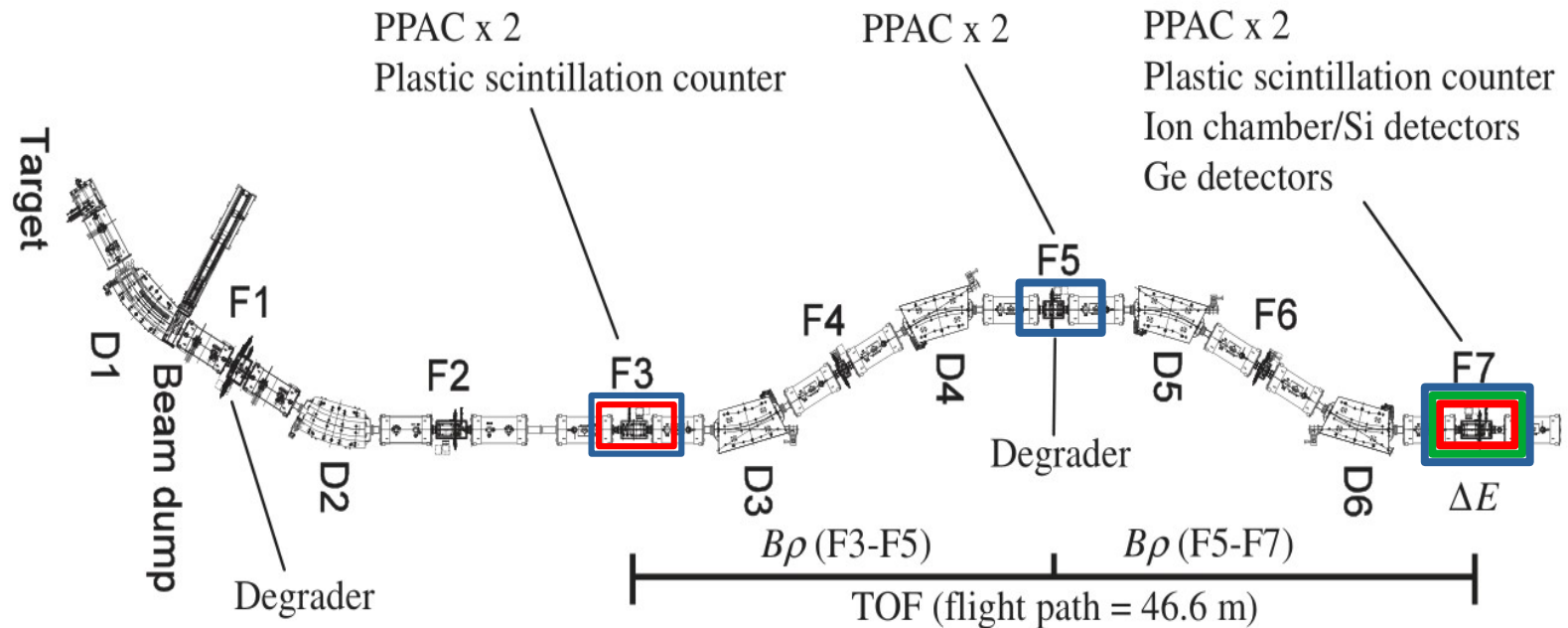
Transmisja przez separator

Grubość tarczy

6 ustawień separatora:

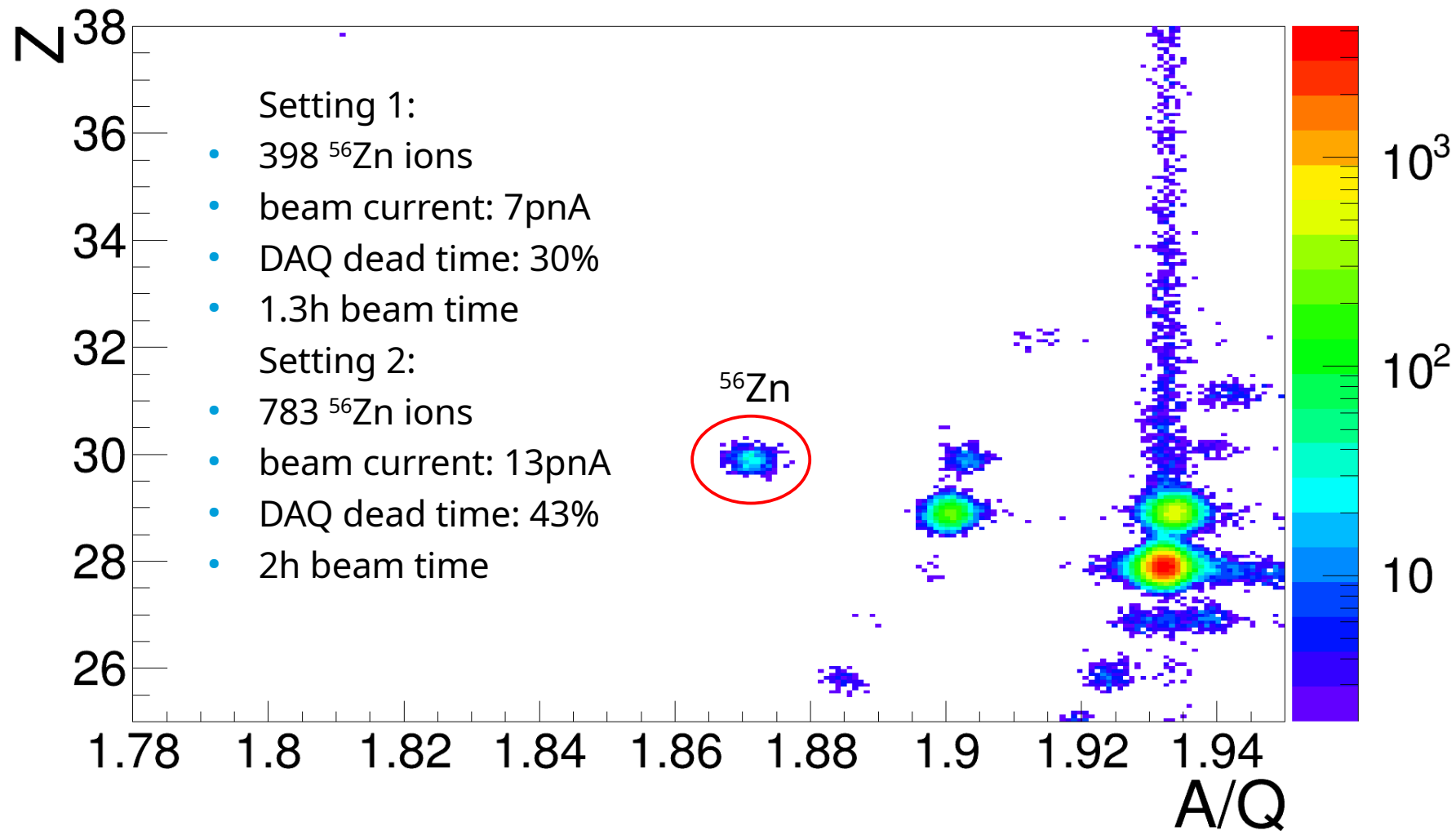
- 2 na ^{56}Zn
- 1 na ^{55}Zn
- 3 na ^{54}Zn

Identyfikacja jonów



- Identyfikacja TOF-dE-Brho:
- **TOF** – scyntylatory w **F3** i **F7**
- **dE** – kom. jonizacyjna w **F7**
- **B ρ** – trajektoria między **F3-F5** i **F5-F7** - PPAC

^{56}Zn ID – set. 1



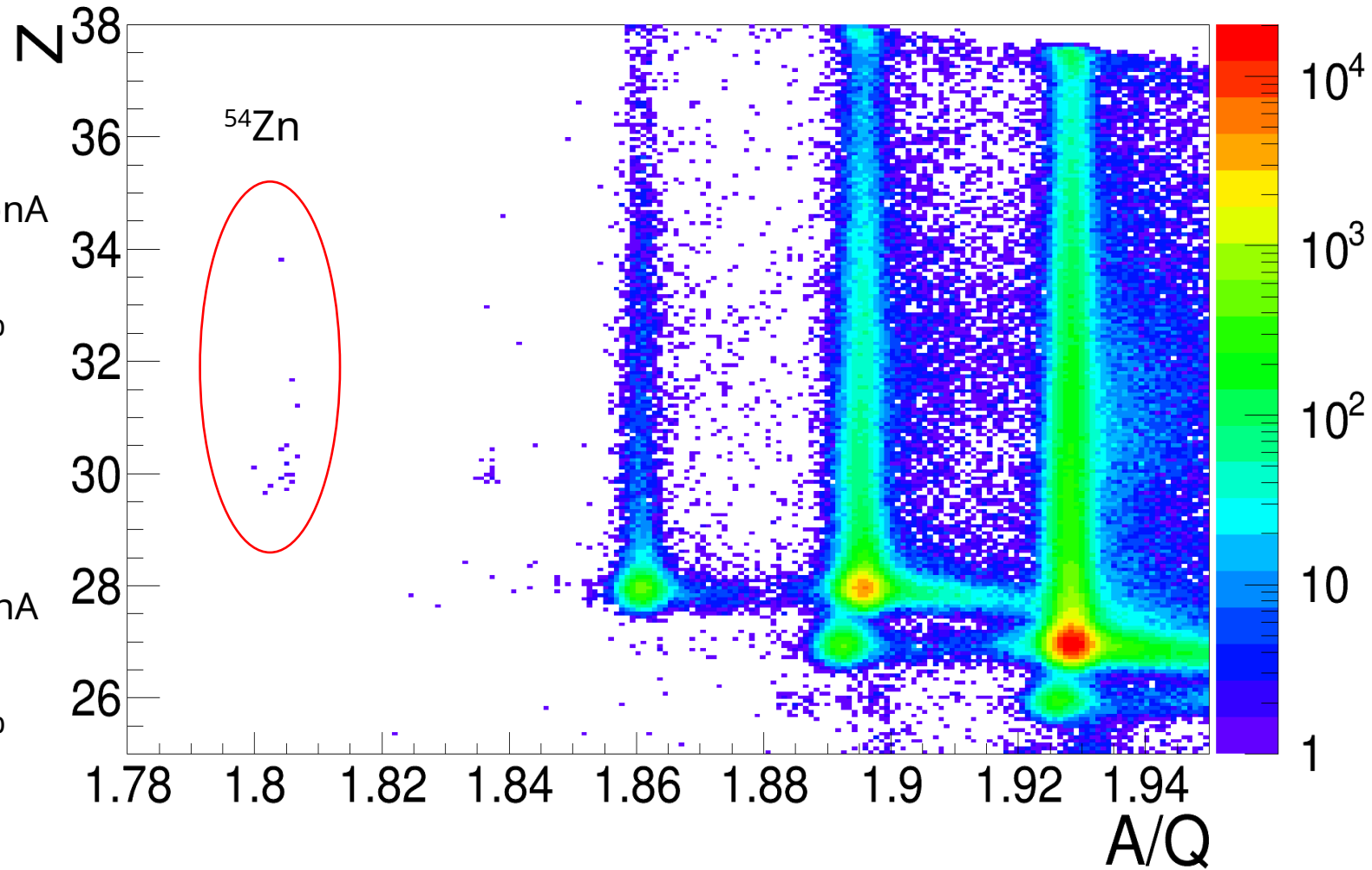
^{54}Zn ID – set. 1

Setting 1

- **14** base counts
- **4** pileups
- beam current: 217 pA
- beam time: 25h
- DAQ dead time: 48%

Setting 3:

- **1** base count
- **3** pileups
- beam current 235 pA
- beam time: 13h
- DAQ dead time: 53%

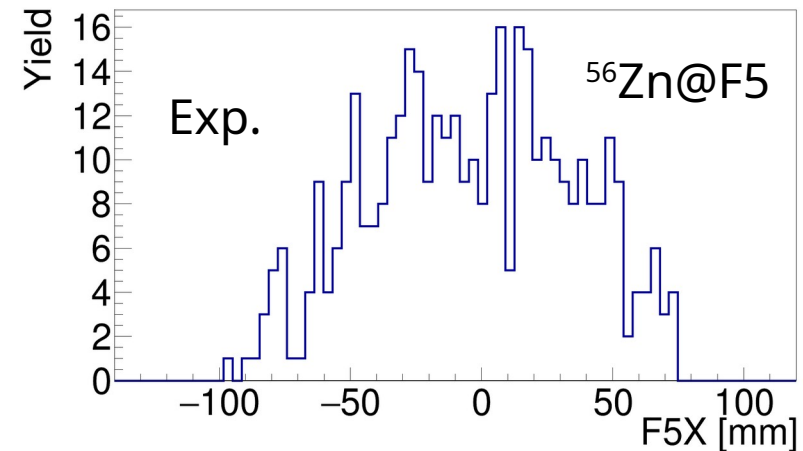
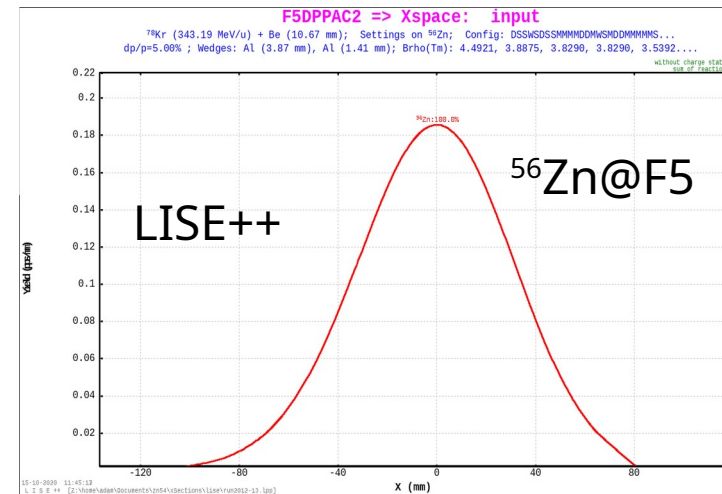


Transmisja przez separator - LISE++

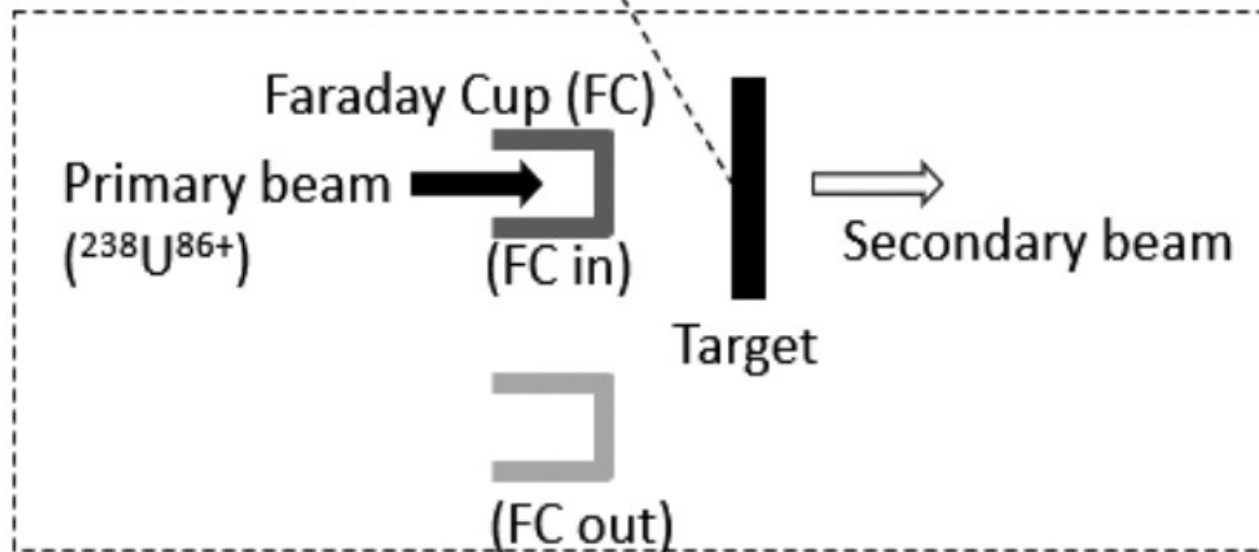
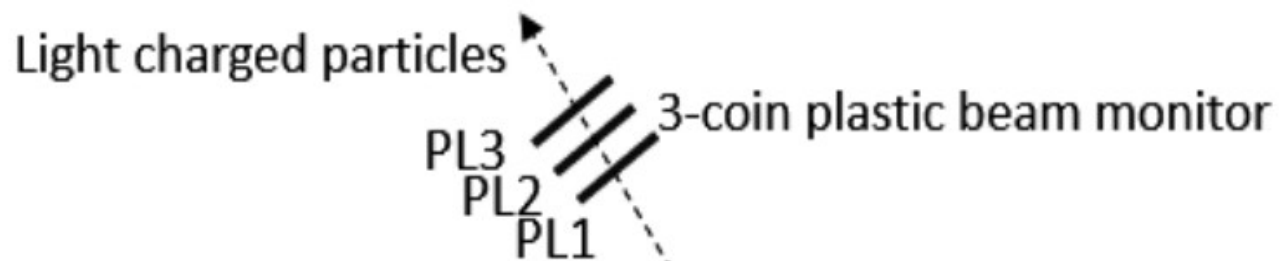
- Symulacja LISE++
- Optymalne ust. Bp wg. LISE użyte do wyznaczenia transmisji
- Profile wiązki w F3, F5 & F7 porównywane z symulacją

Transmisje:

- ^{56}Zn : 67%, 64%
- ^{55}Zn : 57%
- ^{54}Zn : 65%, **15%**, 64%



Produkcja - N_{beam}



[Production target chamber]

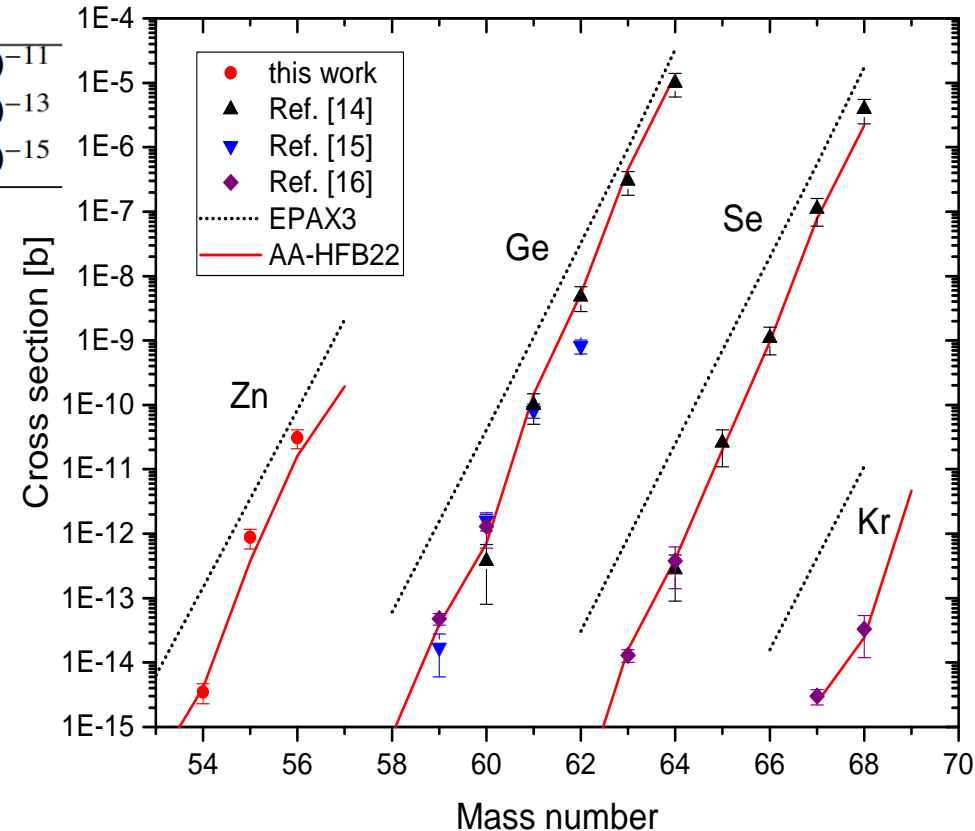
Ahn et al, RIKEN Accel. Prog. Rep. 52 (2019)

Zliczenia 3-coin
proporcjonalne do
intensywności wiązki

Pomiar przekrojów czynnych - wyniki

Nucleus	σ_{exp}	σ_{EPAX3}	σ_{AA}
^{56}Zn	$(3.1 \pm 0.1_{(stat)} \pm 1_{(syst)}) \times 10^{-11}$	8.45×10^{-11}	1.6×10^{-11}
^{55}Zn	$(8.8 \pm 0.3_{(stat)} \pm 3.1_{(syst)}) \times 10^{-13}$	3.47×10^{-12}	3.8×10^{-13}
^{54}Zn	$(3.5 \pm 0.7_{(stat)} \pm 1.2_{(syst)}) \times 10^{-15}$	1.47×10^{-13}	4.1×10^{-15}

- 22 jonów ^{54}Zn w 38 h wiązki (@F7)
- Produkcja ^{54}Zn – 3.5 fb!
- EPAX3 – empiryczna parametryzacja przekrojów czynnych w reakcji fragmentacji
- EPAX3 zawyża przekroje czynne neutrono-deficytowych jąder (linia przerywana)
- Model Abrasion-Ablation (O. Tarasov) – lepsza zgodność z eksperymentem (czerwona linia)



Więcej w publikacji:

Kubiela et al., Phys. Rev. C 104.6, 064610 (2021)

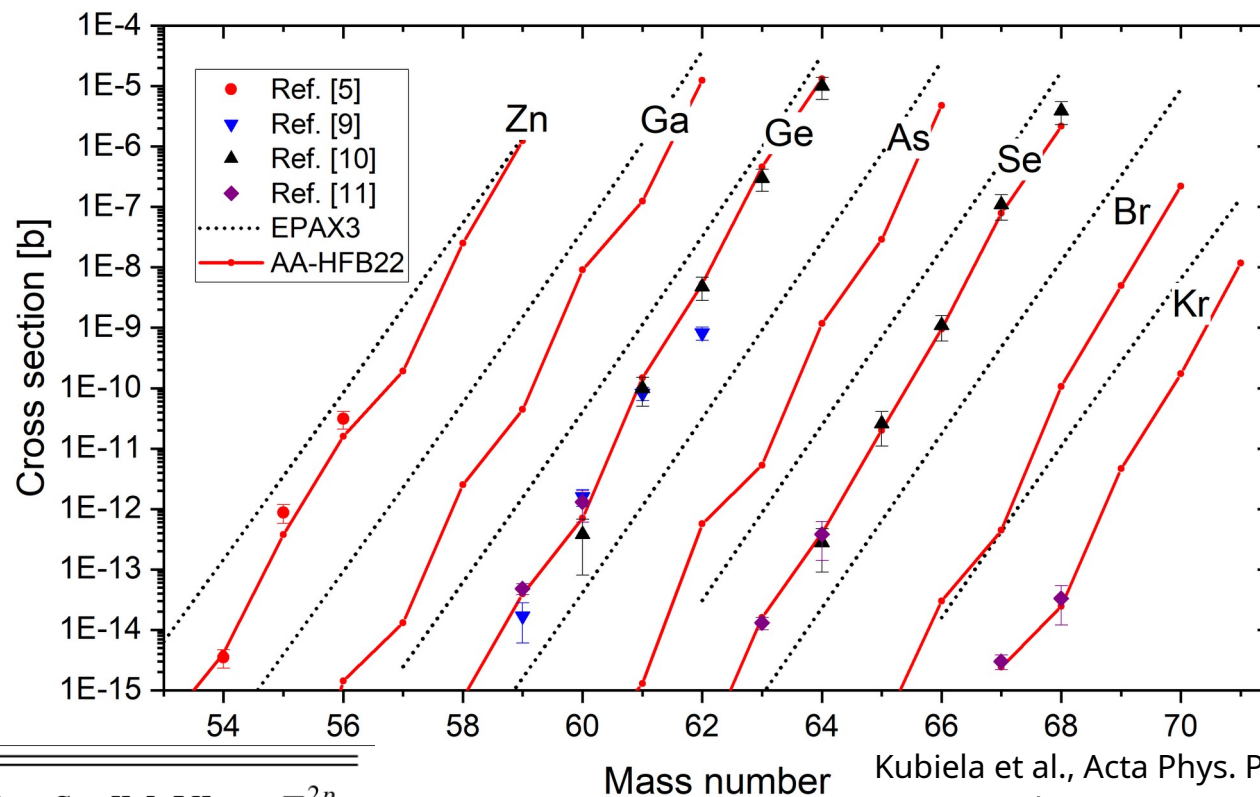
[14] - A. Stolz et al., Phys. Lett. B 627, 32 (2005)

[15] - A.A.Ciemny et al., Phys. Rev. C 92, 014622 (2015)

[16] - B. Blank et al., Phys. Rev. C 93, 061301(R) (2016)

Przewidywania modelu AA

- Pomoc w szacowaniu produkcji w przyszłych eksperymentach
- Potencjalni kandydaci na rozpad 2p: ^{58}Ge i ^{63}Se – przekroje czynne < 1 fb



Kubiela et al., Acta Phys. Pol. B
Proc. Suppl. 16, 4-A18 (2023)

Nucleus	σ [barn]	S_p [MeV]	S_{2p} [MeV]	$T_{1/2}^{2p}$
^{59}Ge	$(4.8 \pm 1) \times 10^{-14}$ ^a	0.349	-0.742	10^{11} s
^{58}Ge	7.6×10^{-16}	0.299	-2.122	$0.6 \mu\text{s}$
^{63}Se	$(1.3 \pm 0.3) \times 10^{-14}$ ^a	0.589	-1.512	1 s
^{62}Se	8.4×10^{-17}	0.099	-2.612	14 ns

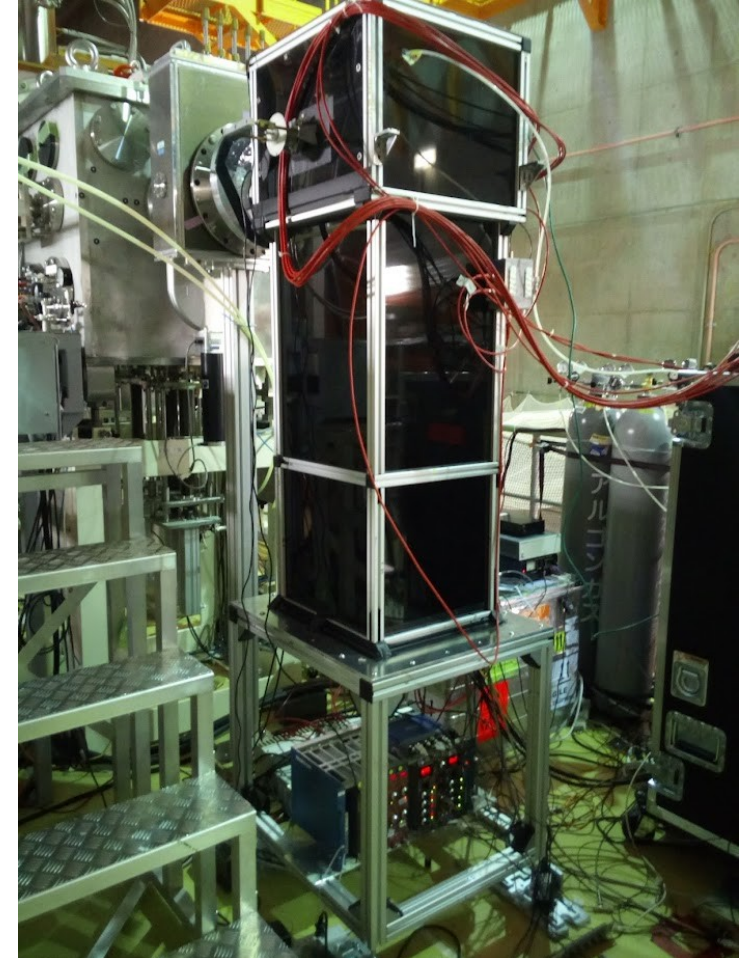
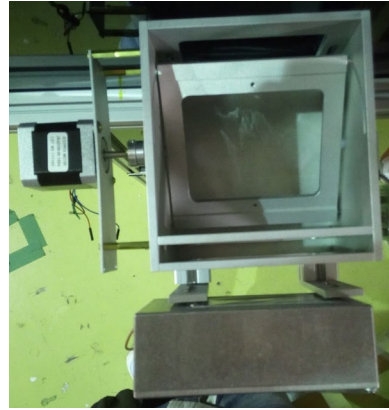
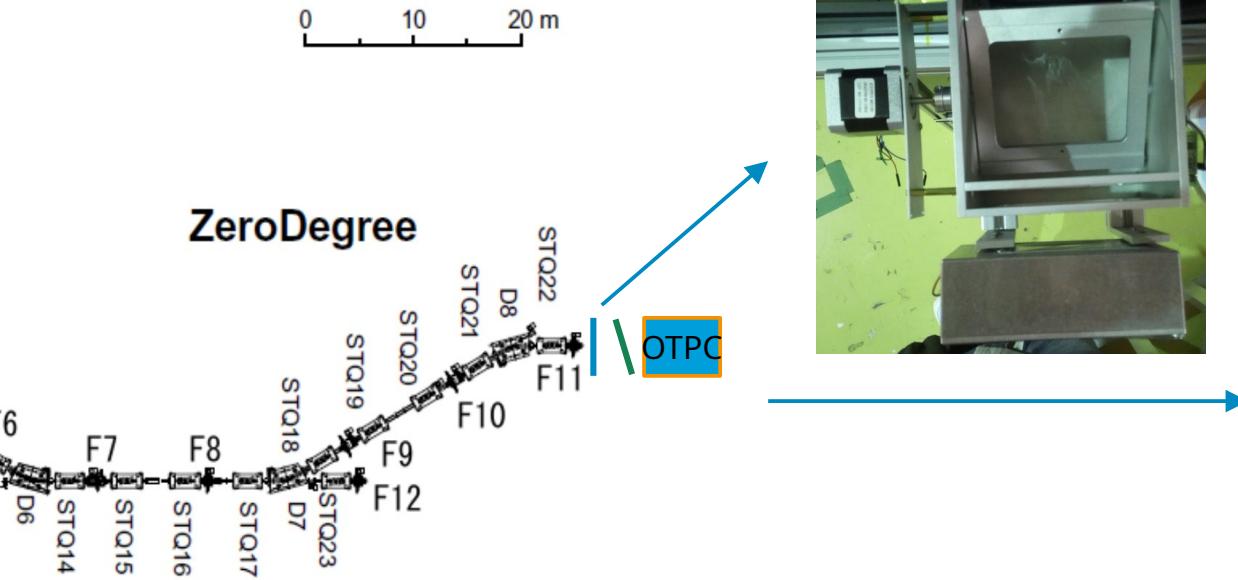
^{54}Zn : $^{58}\text{Ni} + \text{Ni}$ czy $^{78}\text{Kr} + \text{Be}$?

Lab	Beam	E [MeV/u]	I [pnA]	Target	d [g/cm ²]	σ [fb]	Y [1/day]
GANIL	$^{58}\text{Ni}^{+26}$	75	154	Ni	0.250	100	22
RIKEN	$^{78}\text{Kr}^{+36}$	345	300	Be	1.850	3.5	70

- $^{58}\text{Ni} + \text{Ni}$ – ok. 30x większy przekrój czynny niż $^{78}\text{Kr} + \text{Be}$
- ALE
- grubsza tarcza i większa intensywność kompensują

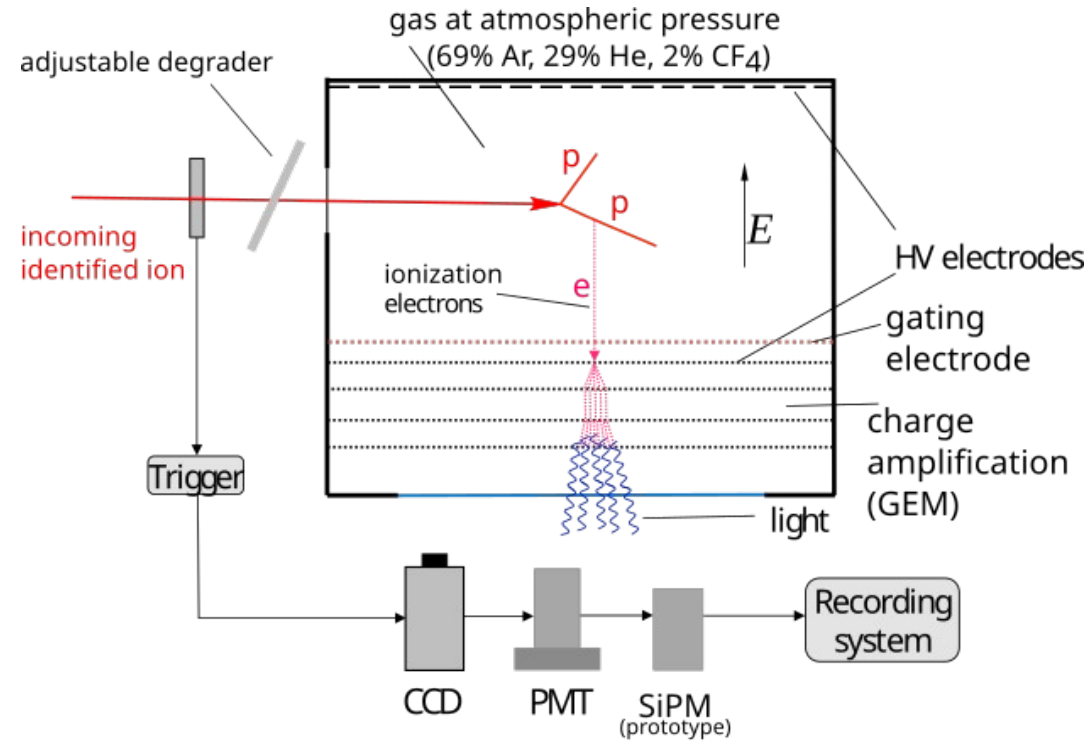
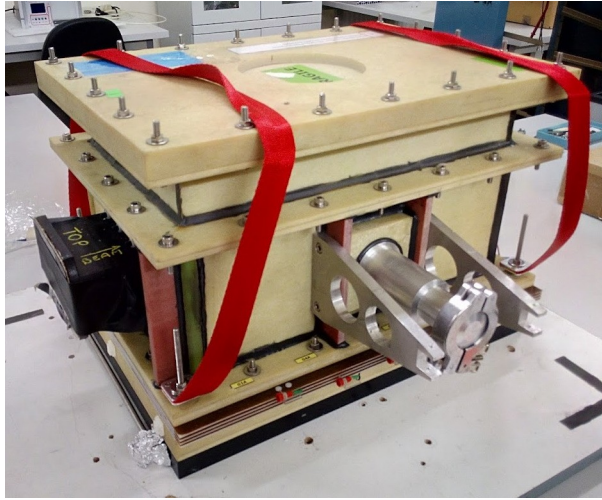
Badanie rozpadów Zn

OTPC @ RIKEN



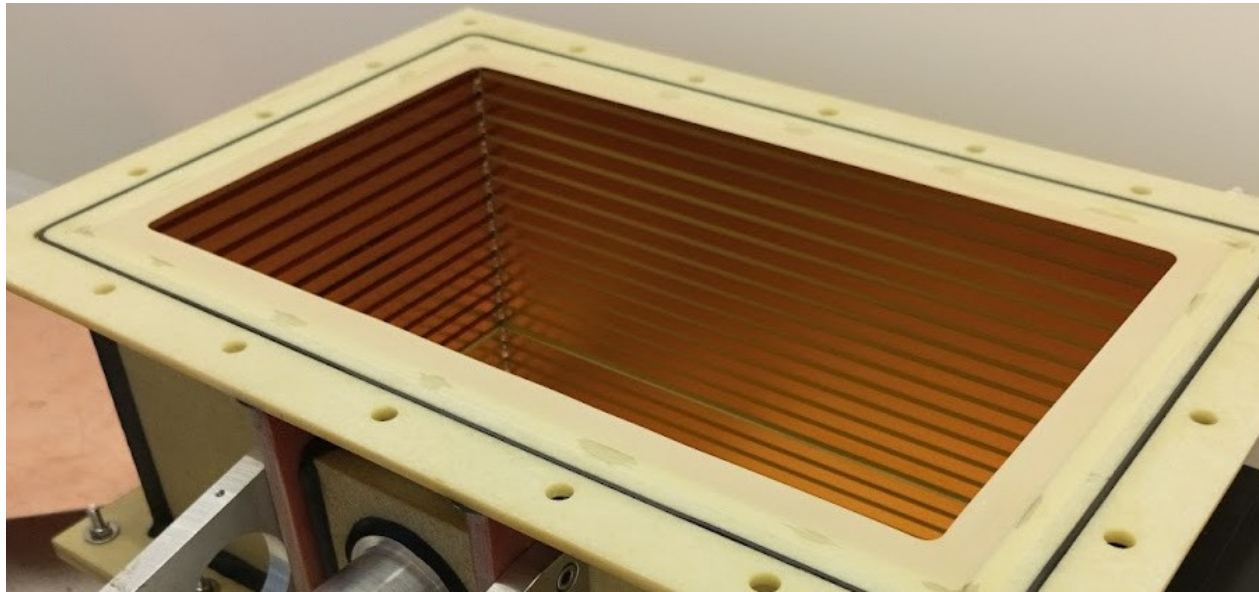
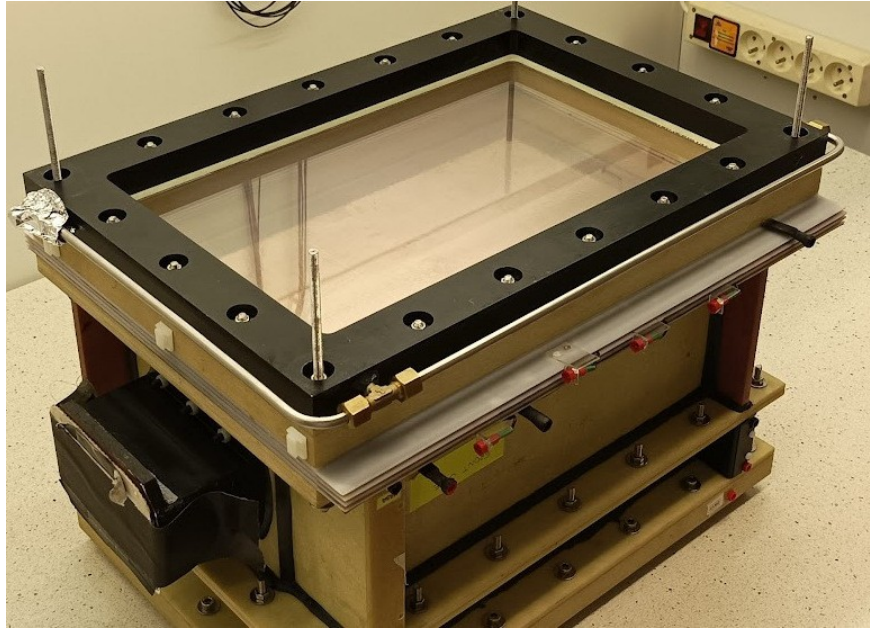
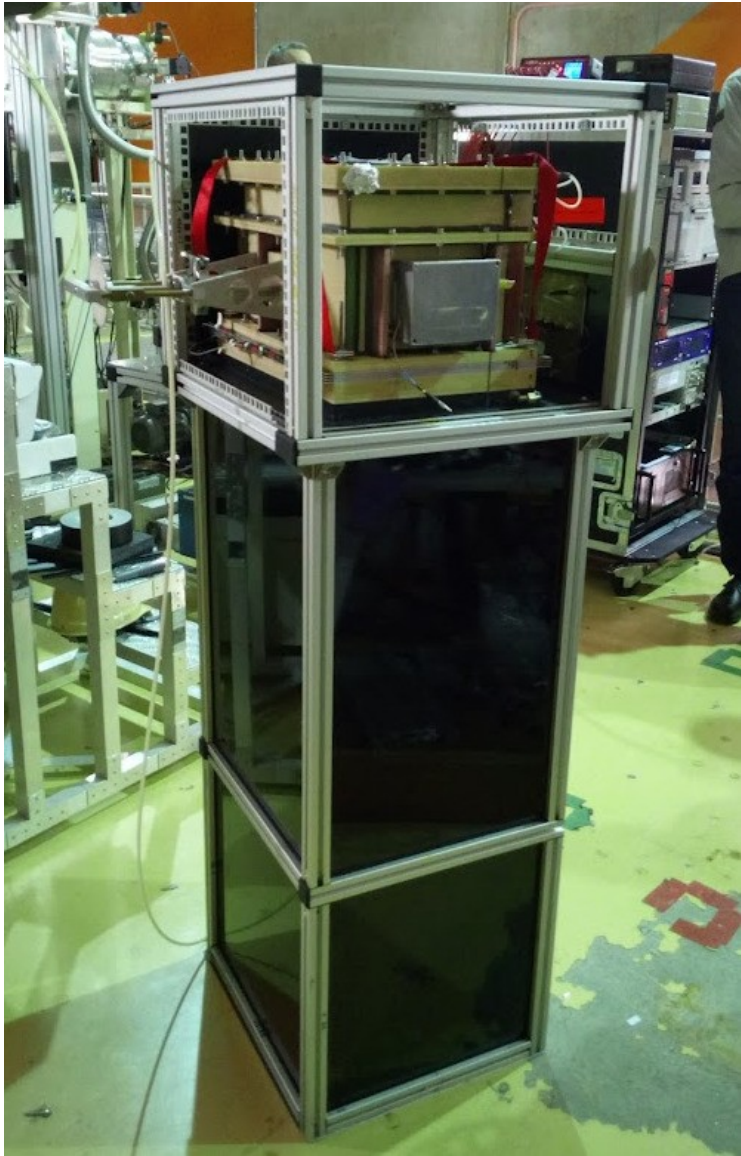
- akwizycje OTPC i BigRIPS niezależne (ale synchronizowane)
- wyzwalanie akwizycji OTPC - dodatkowa identyfikacja TOF-dE (dE za F11)
- regulowany degrader do ustalenia zasięgu wiązki (kalibracja na ^{56}Zn)

Optical Time Projection Chamber (OTPC)



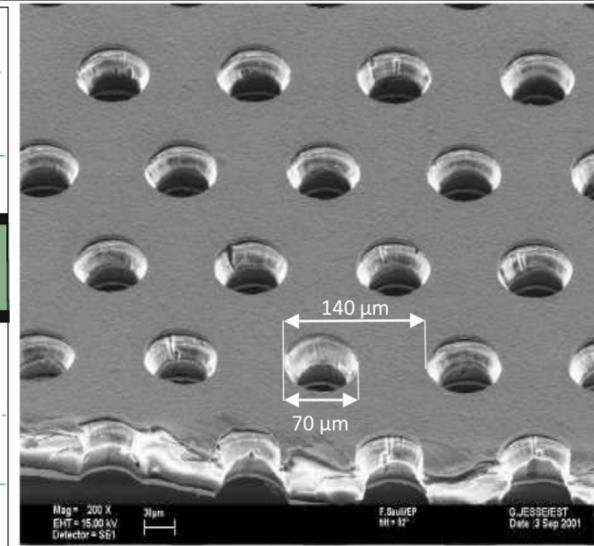
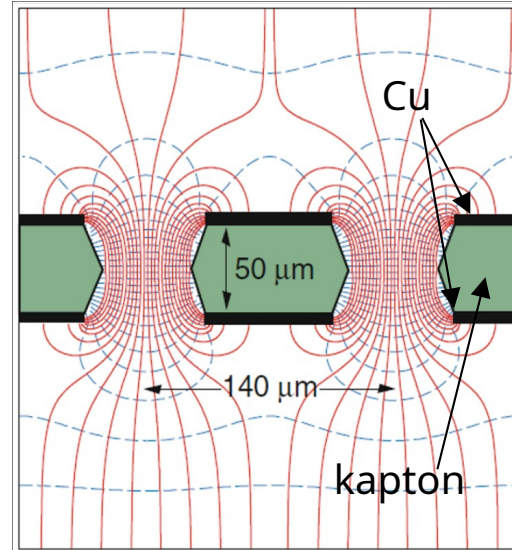
OTPC - principle of operation

- TPC – rekonstrukcja 3D toru cząstek naładowanych
- Sygnał optyczny rejestrowany przez CCD i PMT
- Pomiar energii, $T_{1/2}$, wsp. rozgałęzienia
- Nieczuły (prawie) na prom. beta



Gas Electron Multiplier (GEM)

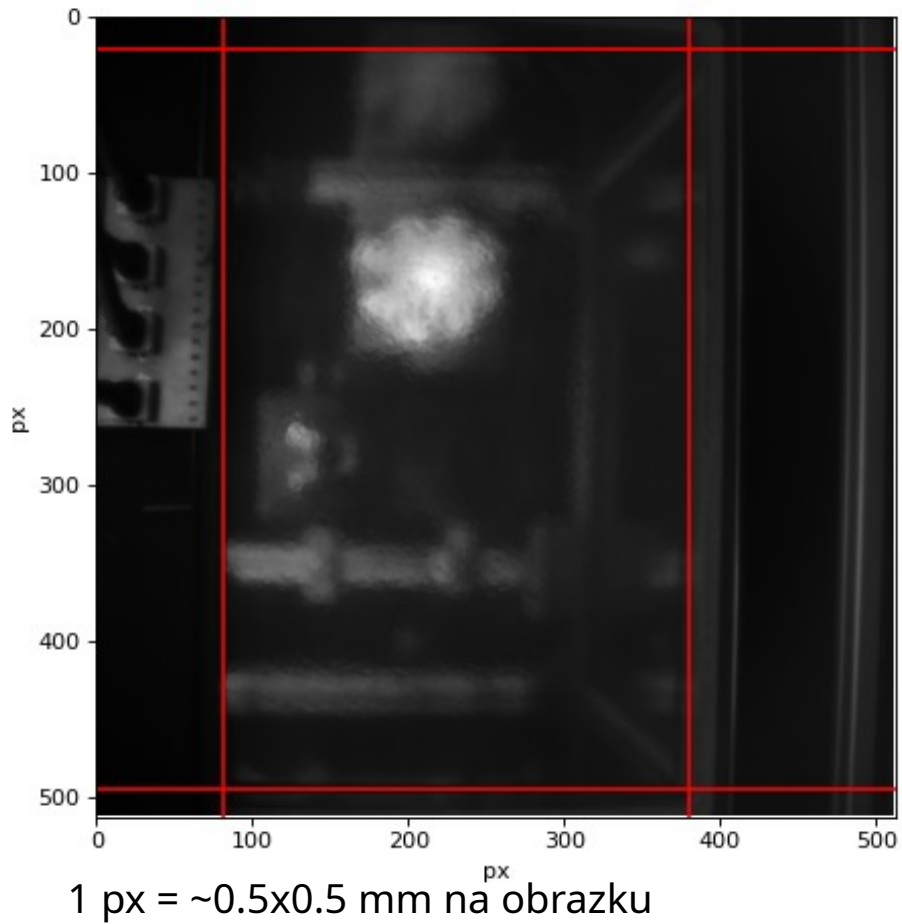
- Wysokie napięcie (200-500 V) między elektrodami Cu
- Silne pole E w otworach – wzmocnienie sygnału jonizacji ($\sim 10^4$)
- Można ułożyć kaskadę dla większego wzmocnienia
- OTPC – kaskada 4 GEMów



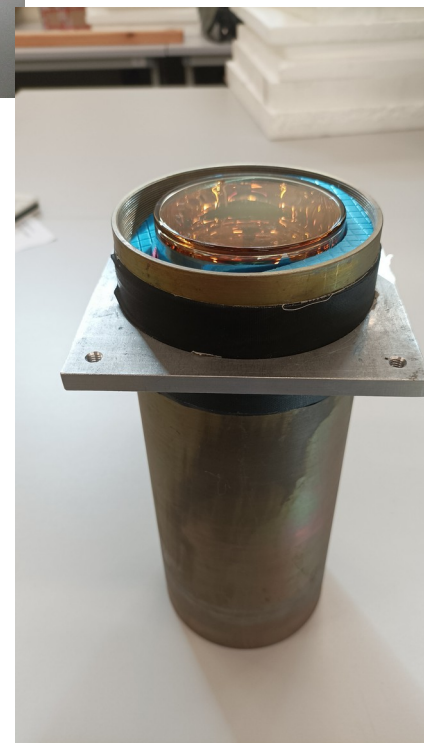
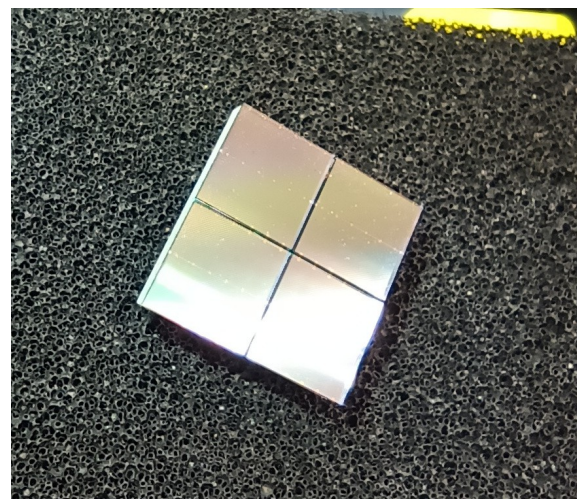
Źródło: CERN

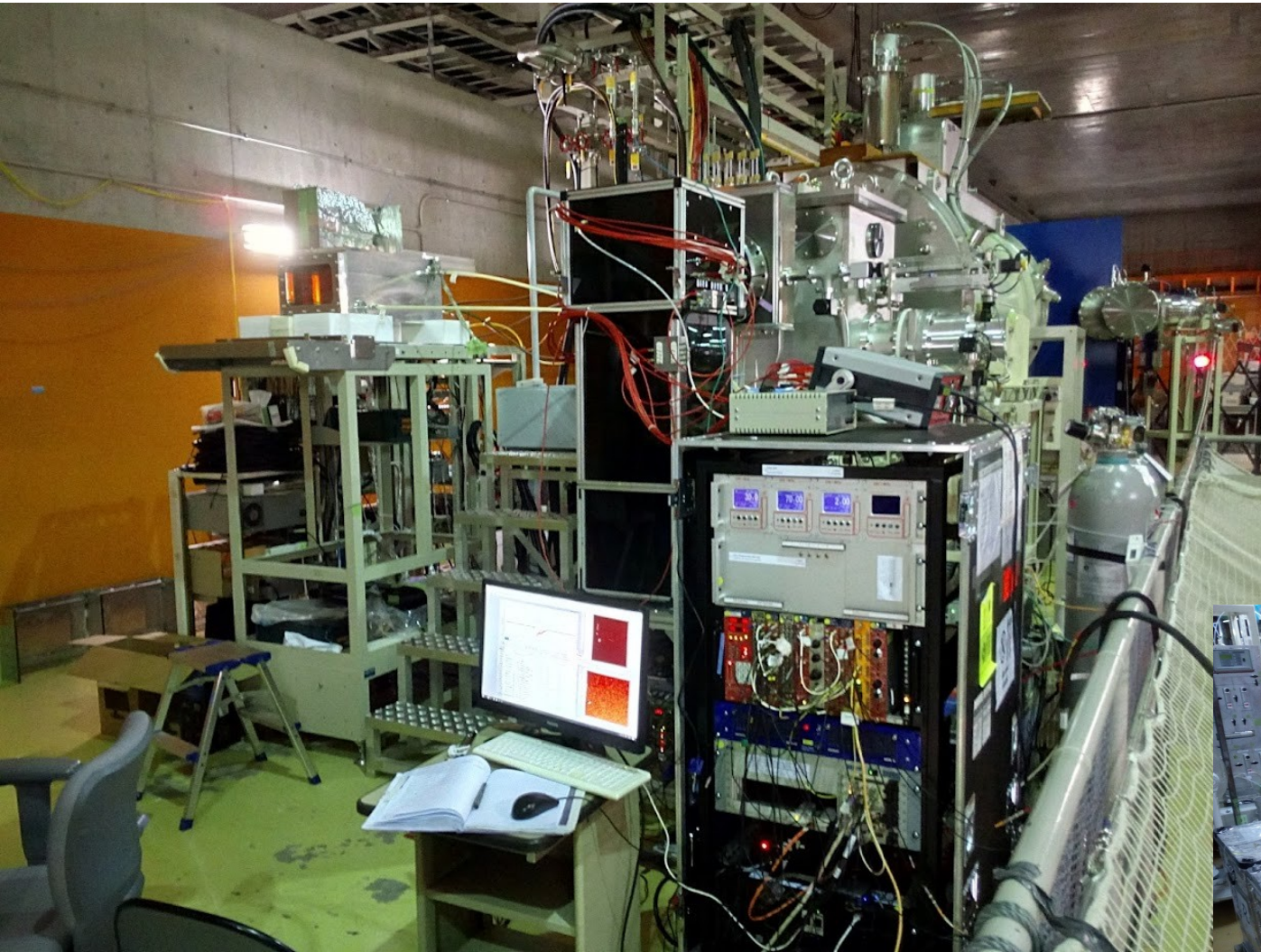


Odczyt optyczny

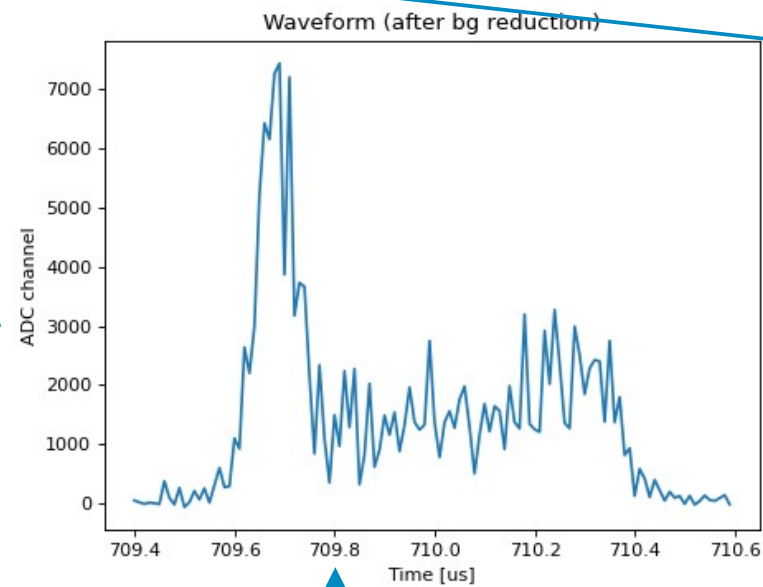
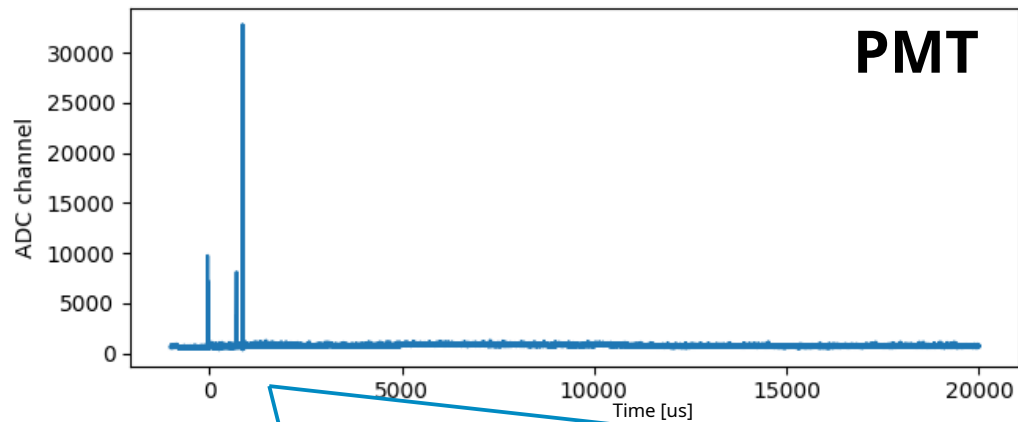
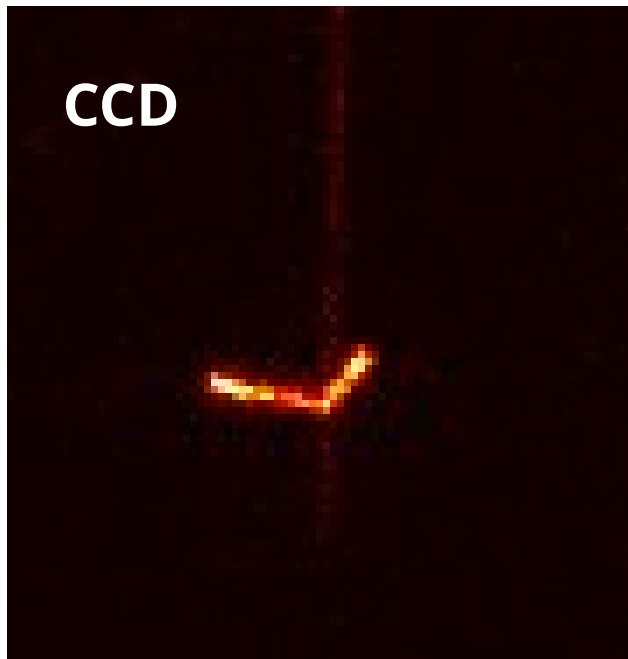


Hamamatsu EM-CCD, 512x512 px

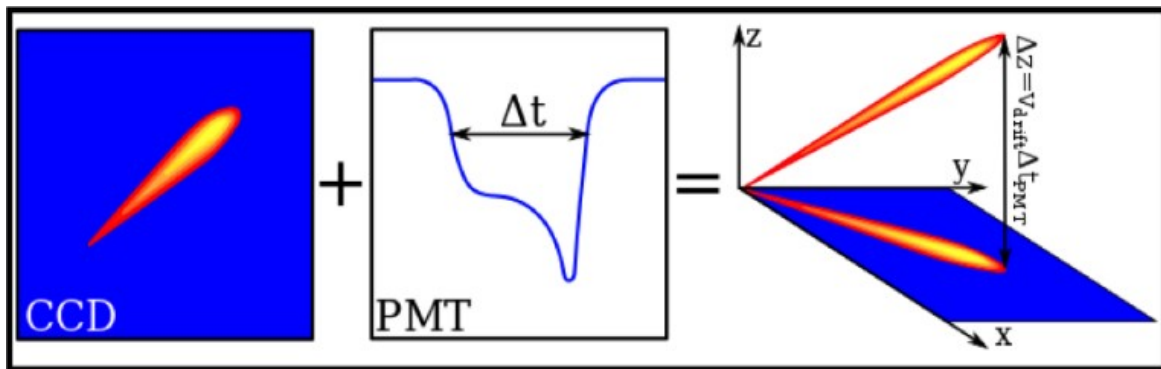




Dane z OTPC

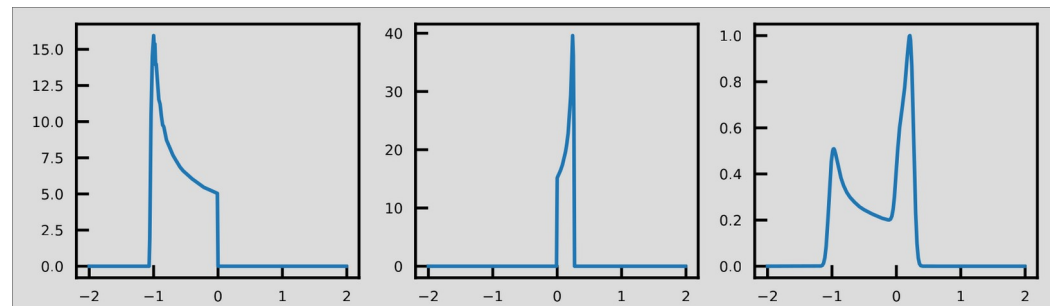
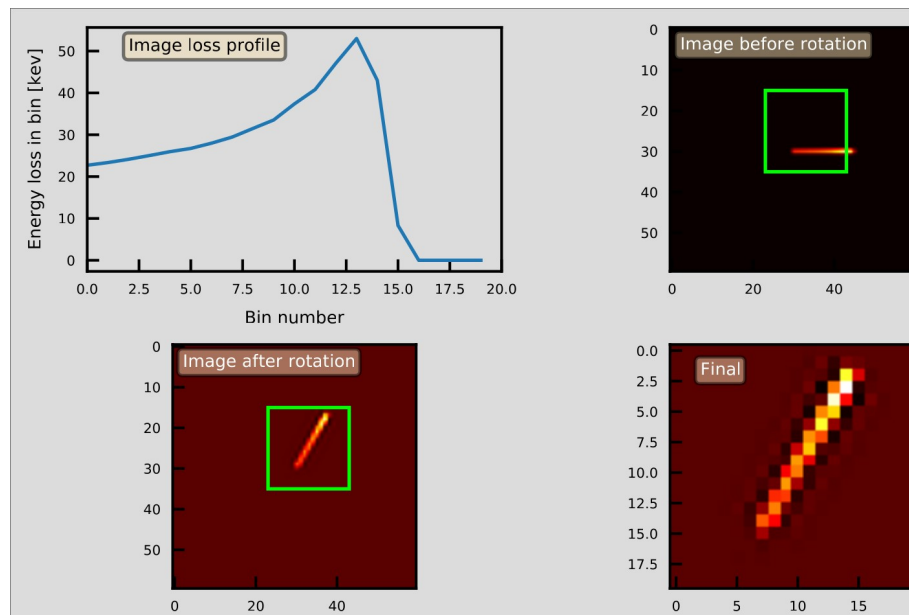
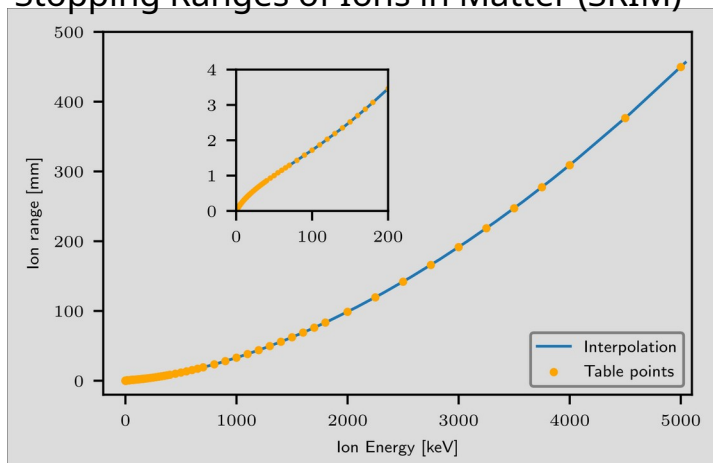


Moment rozpadu → czas życia

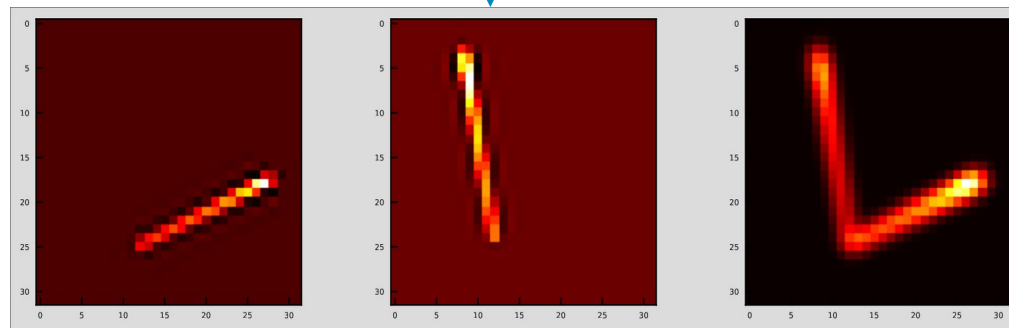


Modelowanie zdarzeń 2p

Stopping Ranges of Ions in Matter (SRIM)

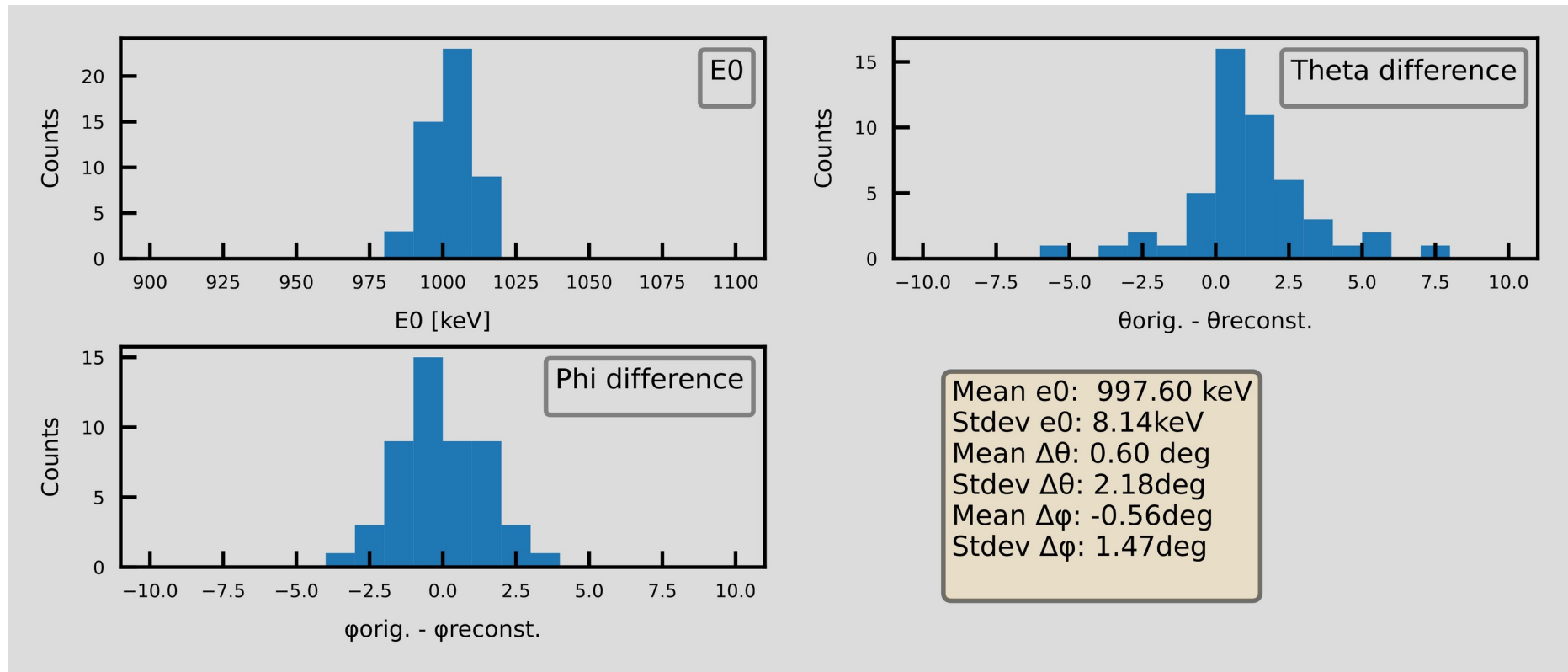


PMT



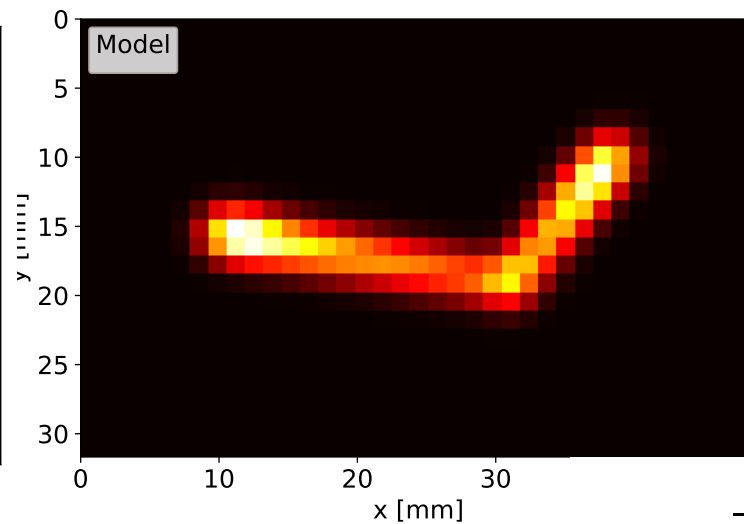
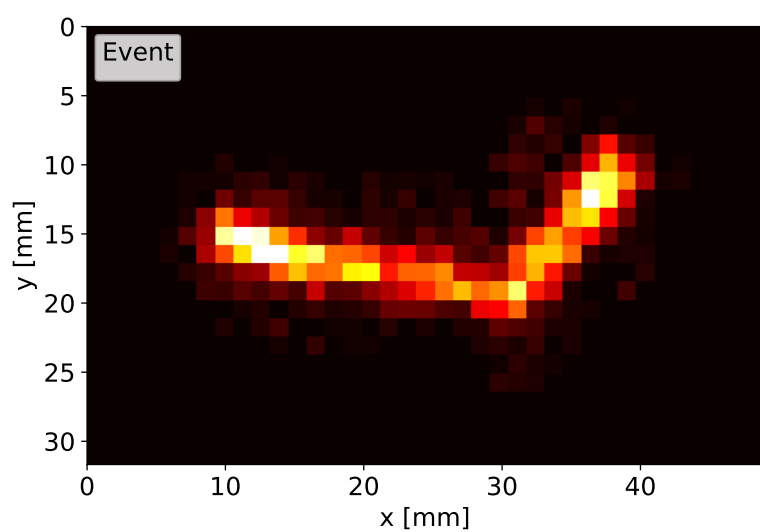
CCD

Modelowanie zdarzeń 2p - test



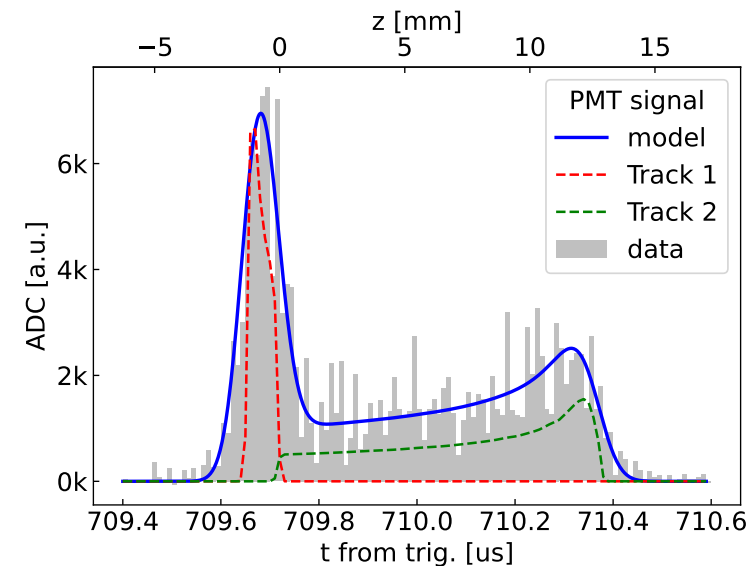
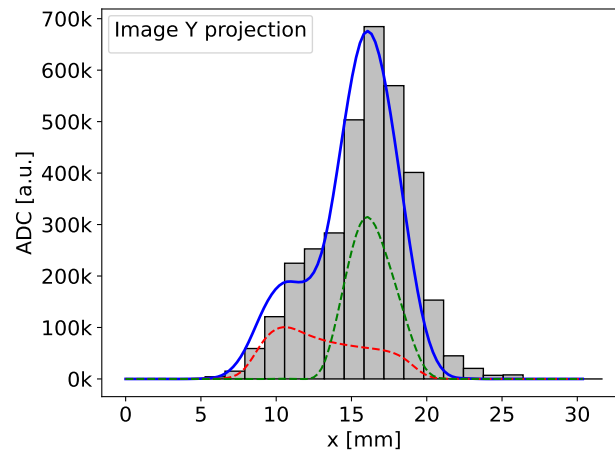
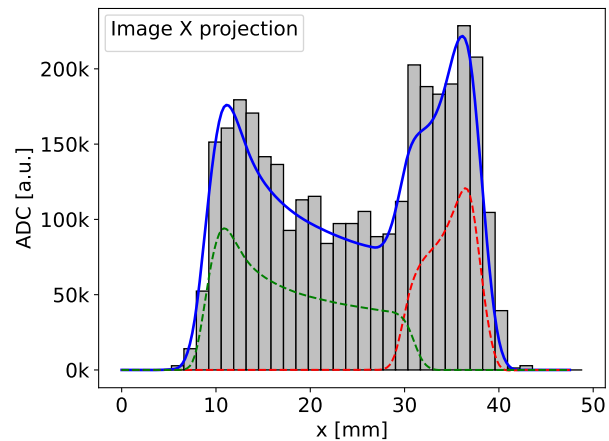
Test rekonstrukcji na symulowanych zdarzeniach OTPC
Symulacje MC GEANT4 - Victor Guadilla

Rekonstrukcja zdarzeń 2p



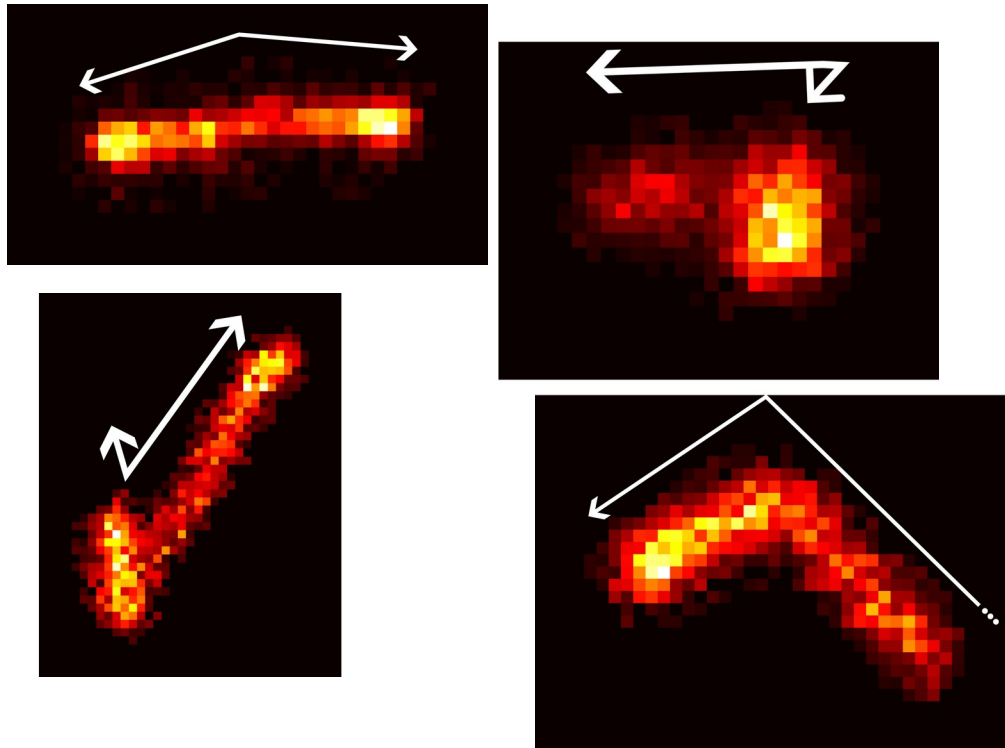
^{54}Zn 2p - przykład:

- $E_1 = 543$ keV
- $E_2 = 853$ keV
- $Q_{2p} = 1411$ keV
- Kąt między protonami: **117°**



Rozpad $2p$ ^{54}Zn - wyniki

Experiment	$T_{1/2}$ (ms)	Q_{2p} (MeV)	BR (%)
Blank <i>et al.</i> [1]	$3.2^{+1.8}_{-0.8}$	1.48 ± 0.02	87^{+10}_{-17}
Ascher <i>et al.</i> [2]	$1.59^{+0.6}_{-0.35}$	1.28 ± 0.21	92^{+6}_{-13}
This work	$0.76^{+0.83}_{-0.36}$	1.35 ± 0.08	≈ 100



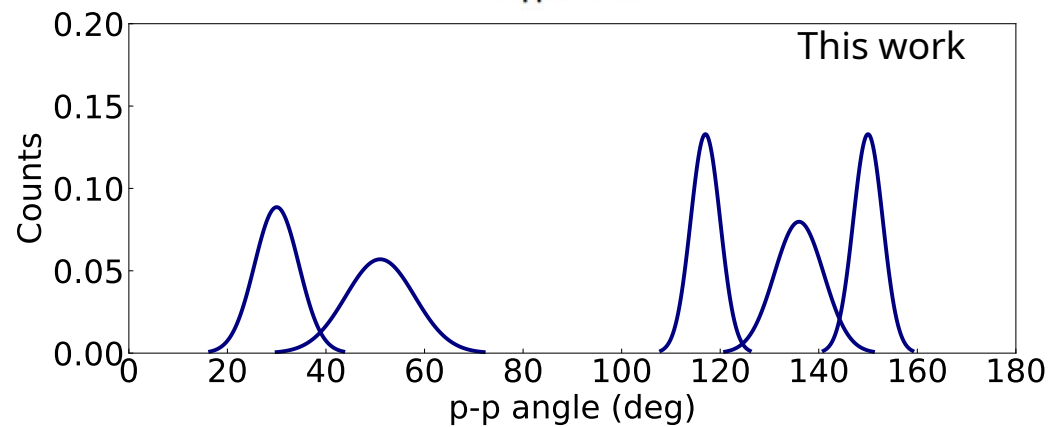
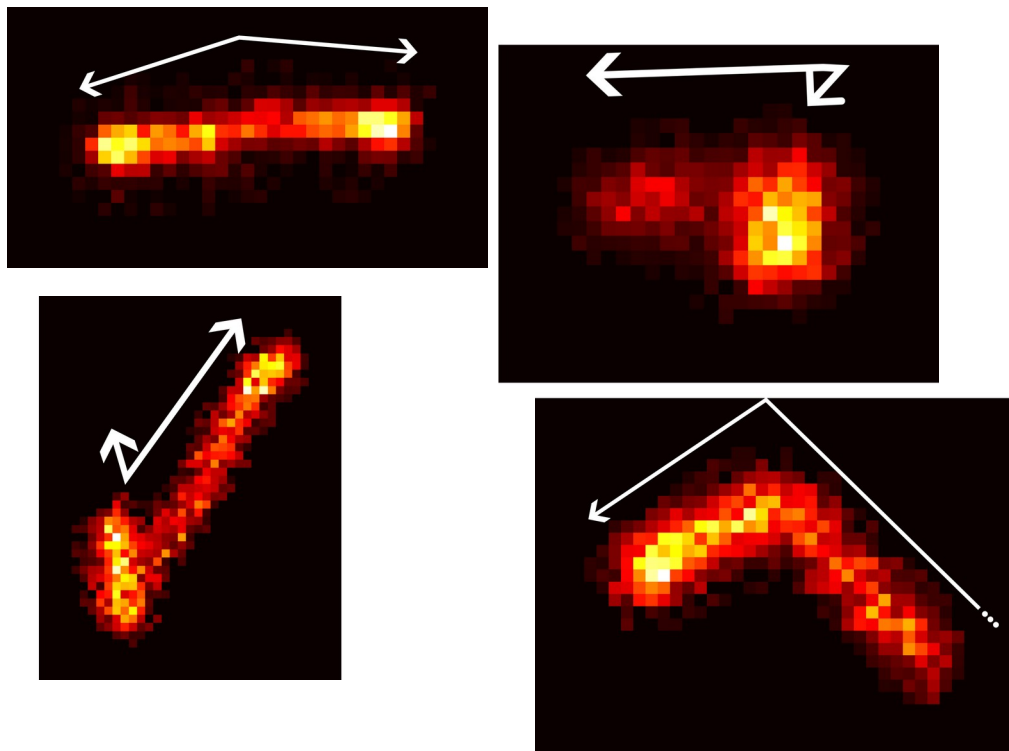
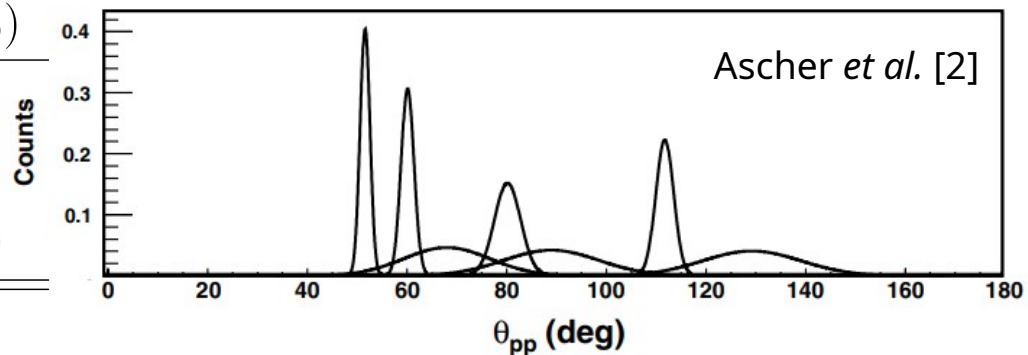
- 9 jonów ^{54}Zn zidentyfikowanych w detektorze Si za F11
- 5 jonów ^{54}Zn zatrzymanych w OTPC
- wszystkie zatrzymane rozpadły się przez emisję $2p$
- pełna rekonstrukcja energii i geometrii dla 4 zdarzeń (+ 1 niepełna rekonstrukcja geometrii)

[1] B. Blank *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 232501 (2005)

[2] P. Ascher *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 102502 (2011)

Rozpad $2p$ ^{54}Zn - wyniki

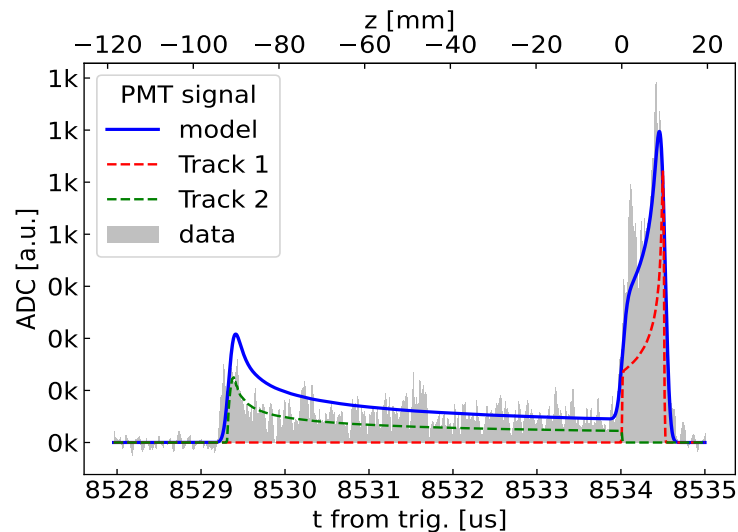
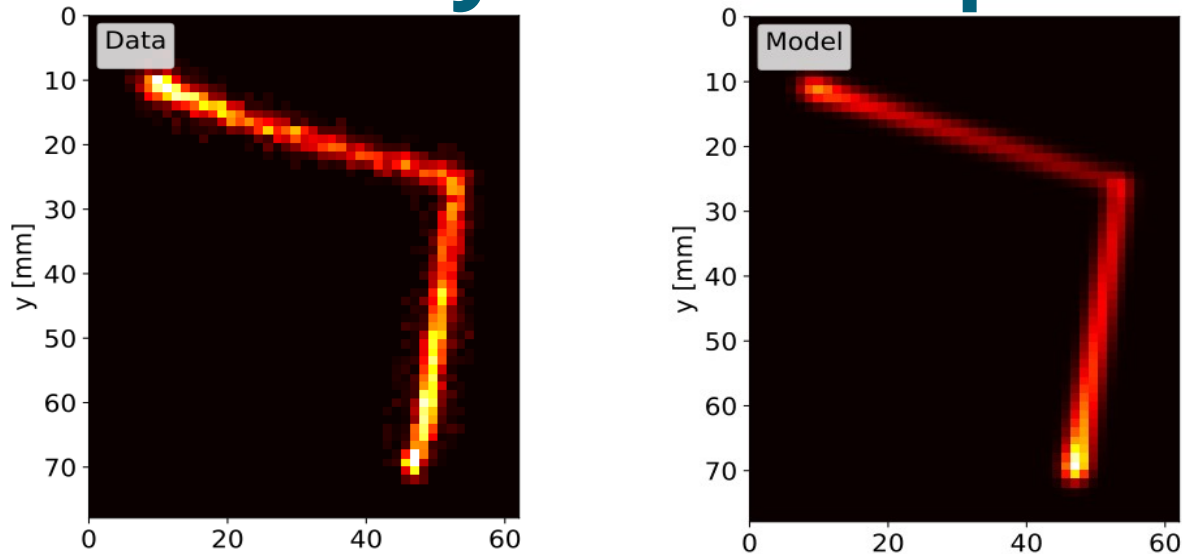
Experiment	$T_{1/2}$ (ms)	Q_{2p} (MeV)	BR (%)
Blank <i>et al.</i> [1]	$3.2^{+1.8}_{-0.8}$	1.48 ± 0.02	87^{+10}_{-17}
Ascher <i>et al.</i> [2]	$1.59^{+0.6}_{-0.35}$	1.28 ± 0.21	92^{+6}_{-13}
This work	$0.76^{+0.83}_{-0.36}$	1.35 ± 0.08	≈ 100



[1] B. Blank *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 232501 (2005)

[2] P. Ascher *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 102502 (2011)

^{55}Zn – nowy kanał rozpadu



^{55}Zn $\beta 2p$ - przykład:

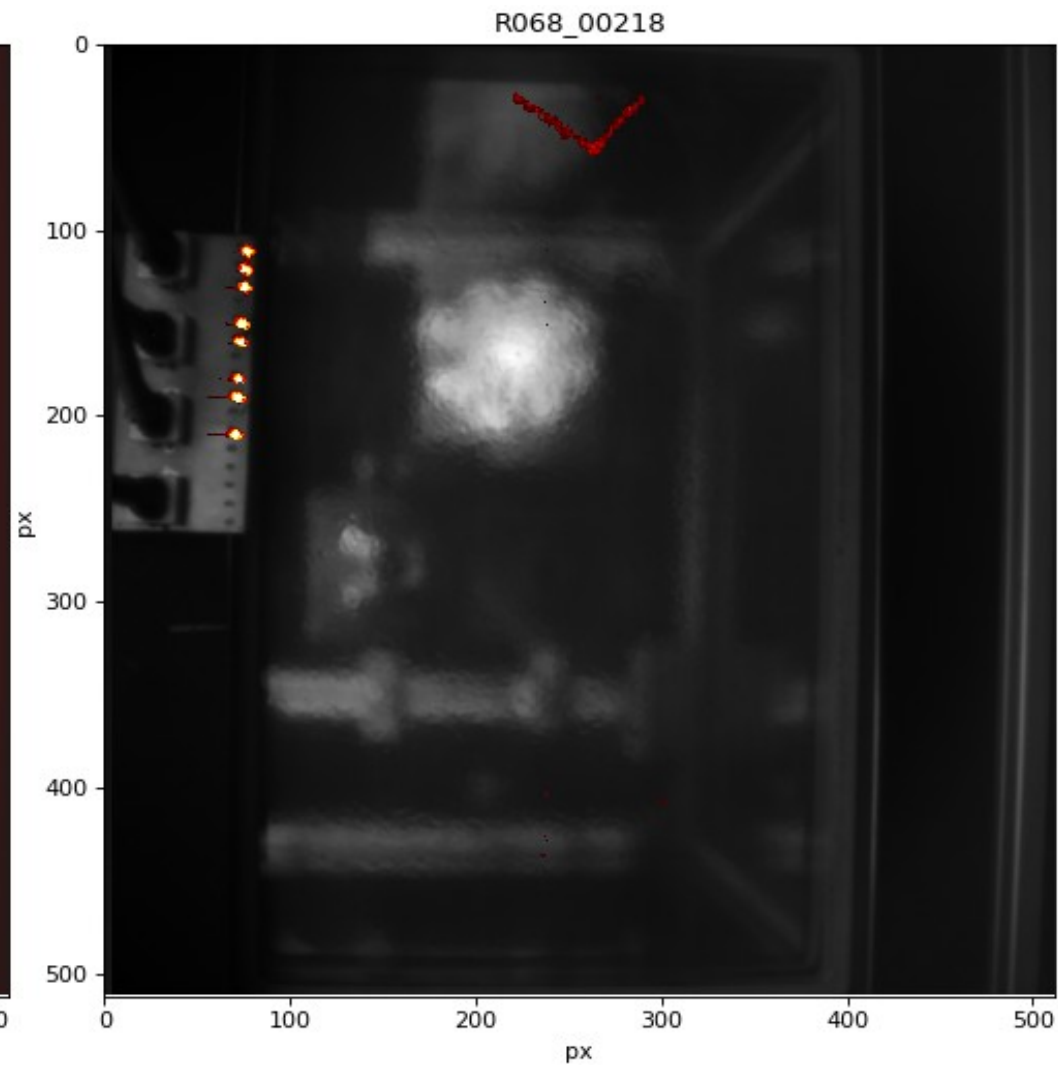
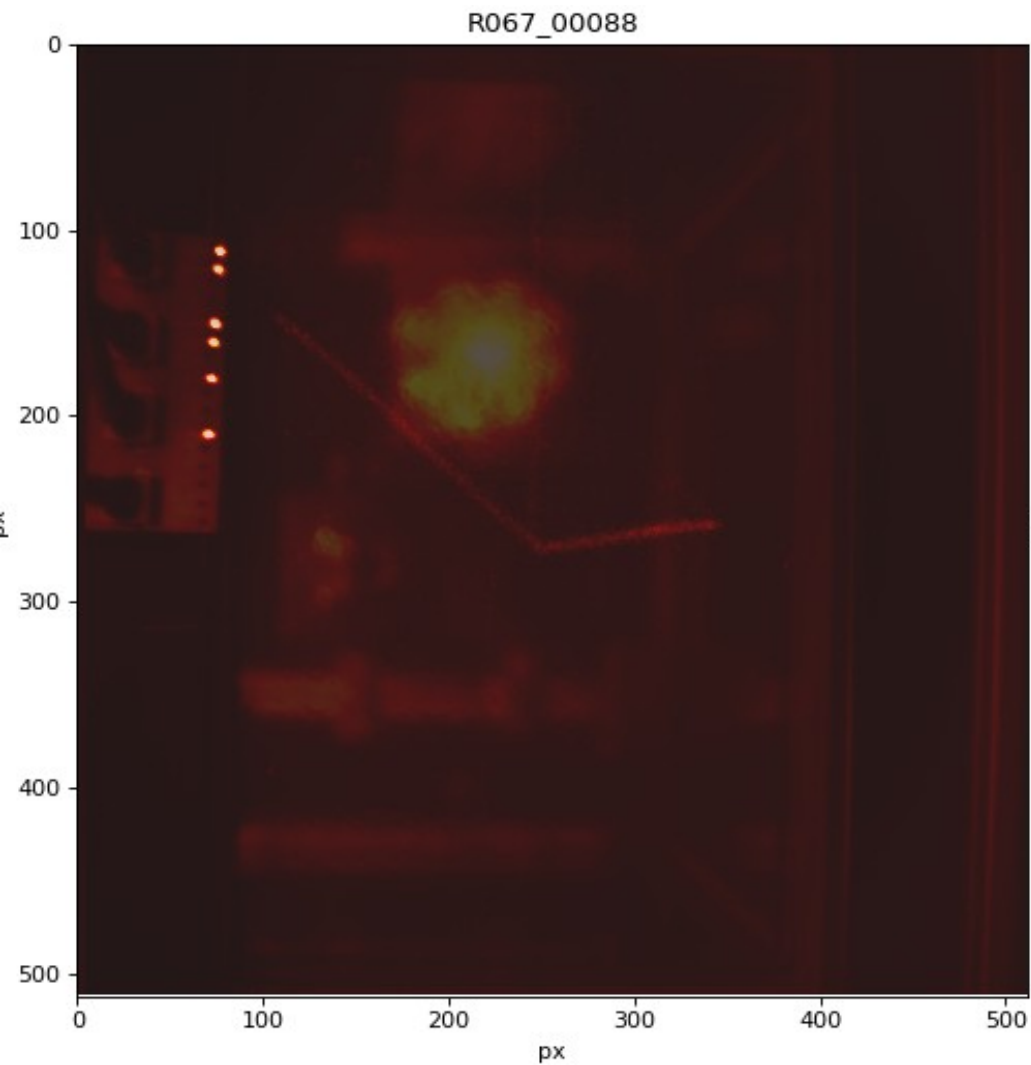
- $E_1 = 1303$ keV
- $E_2 = 2056$ keV
- $Q_{\beta 2p} = 3407$ keV
- Kąt między protonami : 104°

- 16 zdarzeń $\beta 2p$
- Energia rozpadu za wysoka na rekonstrukcję większości zdarzeń
- Wsp. Rozgałęzienia^[1]:
 - $BR_{\beta 1p} = (89.3 \pm 5.9) \%$
 - $BR_{\beta 2p} = (6.2 \pm 1.7) \%$
- Dane literaturowe^[2]
 - $BR_{\beta 1p} = (91.0 \pm 5.1) \%$

[1] A. Giska, Master Thesis

[2] Dossat et al., NP A792 (2007) 18

^{55}Zn – nowy kanał rozpadu



Podsumowanie


Produkcja neutrono-deficytowych izotopów w reakcji $^{78}\text{Kr} + \text{Be}$:

- Przekrój czynny na produkcję $^{56,55,54}\text{Zn}$ zmierzony
- Model AA opisuje przekroje czynne dla izotopów Zn-Kr

Rozpady egzotycznych jąder Zn:

- Energia & $T_{1/2}$ ^{54}Zn zgodne z wcześniejszymi eksperymentami
- Statystyka zbyt mała na badania korelacji p-p w ^{54}Zn
- Zmierzone czasy życia $^{55,56}\text{Zn}$
- Nowy kanał rozpadu $^{55}\text{Zn} - \beta 2p$; zmierzone wsp. rozgałęzienia βp & $\beta 2p$

**Dalsze plany: eksperyment dot. rozpadu $2p$ ^{54}Zn & ^{48}Ni
zaakceptowany w FRIB**

A. Kubiela,^{1,*} H. Suzuki,² O. B. Tarasov,³ M. Pfützner ^{1,†} D.-S. Ahn,² H. Baba,² A. Bezbakh,⁴ A. A. Ciemny,¹ W. Dominik,¹ N. Fukuda,² A. Giska,¹ R. Grzywacz,⁵ Y. Ichikawa,^{2,6} Z. Janas,¹ Ł. Janiak,⁷ G. Kamiński,^{4,8} K. Kawata,^{2,9} T. Kubo,² M. Madurga,⁵ C. Mazzocchi,¹ H. Nishibata,^{2,6} M. Pomorski,¹ Y. Shimizu,² N. Sokołowska,¹ D. Suzuki,² P. Szymkiewicz,^{4,10} A. Świercz,^{4,10} M. Tajima,² A. Takamine,² H. Takeda,² Y. Takeuchi,^{2,11} C. R. Thornsberry,⁵ H. Ueno,² H. Yamazaki,² R. Yokoyama,⁵ and K. Yoshida²

¹*Faculty of Physics, University of Warsaw, 02-093 Warszawa, Poland*

²*RIKEN Nishina Center, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

³*National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824, USA*

⁴*Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, 141980 Dubna, Russia*

⁵*Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37996, USA*

⁶*Department of Physics, Kyushu University, 744 Moto-oka, Nishi, Fukuoka, Fukuoka 819-0395, Japan*

⁷*National Centre for Nuclear Research, 05-400 Otwock, Świerk, Poland*

⁸*Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw, 02-093 Warsaw, Poland*

⁹*Center for Nuclear Study, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan*

¹⁰*AGH University of Science and Technology, Faculty of Physics and Applied Computer Science, 30-059 Krakow, Poland*

¹¹*Department of Advanced Sciences, Hosei University, 3-7-2 Kajino-cho, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan*

Dziękuję za uwagę!