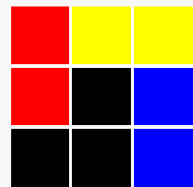
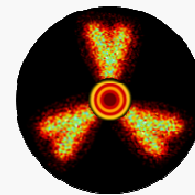
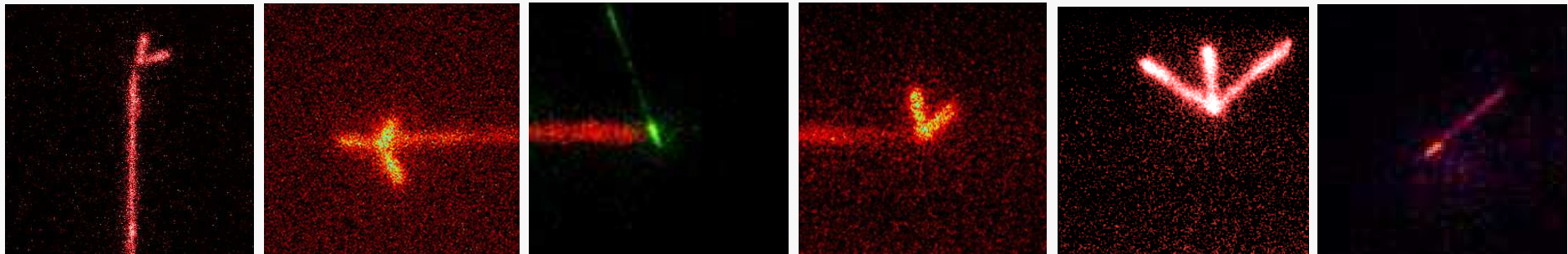


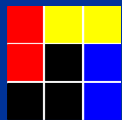
# Egzotyczne przemiany jądrowe na fotografiach z OTPC

Marek Pfützner

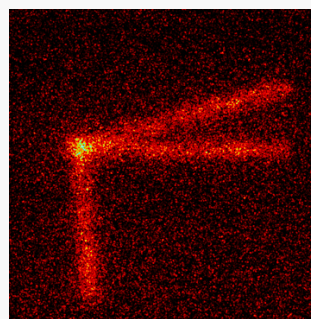
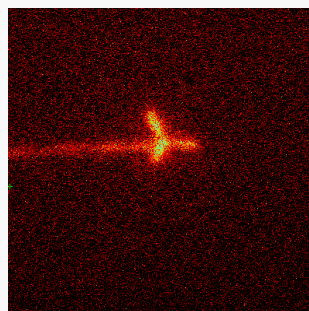
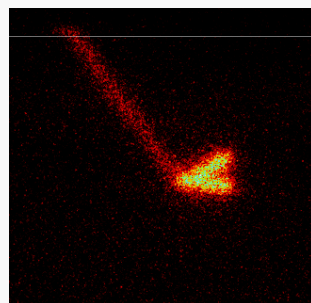
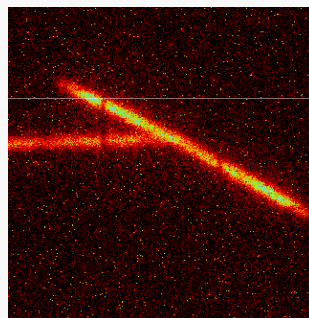
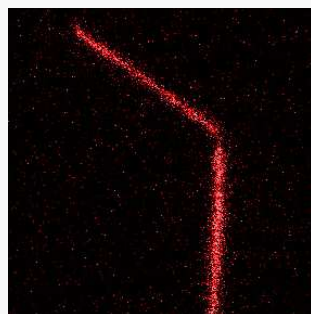
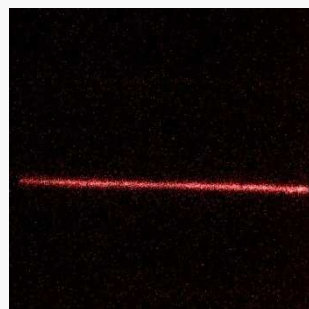


ZAKŁAD FIZYKI JĄDROWEJ  
UNIwersYTET WARSZAWSKI

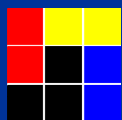




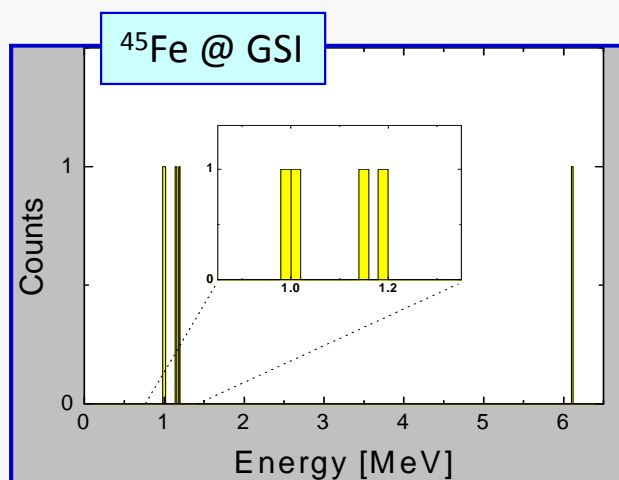
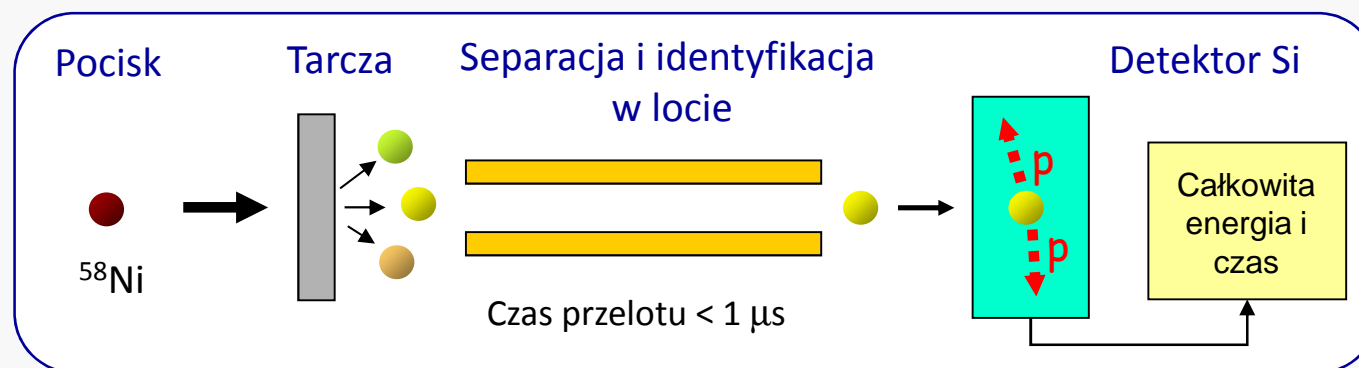
# Plan



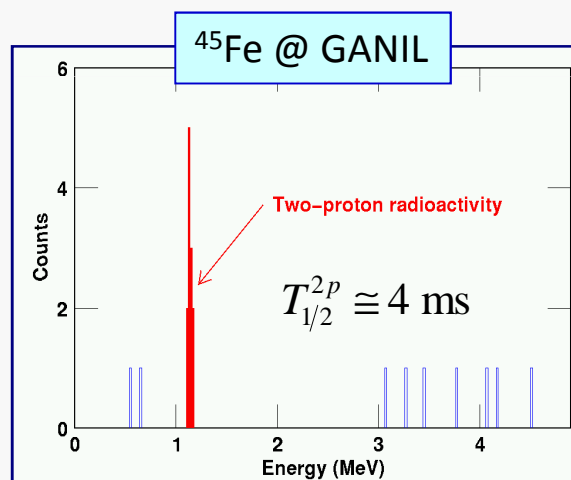
- Promieniotwórczość  $2p$  - początki
- Detektor OTPC
- Korelacje  $2p$  w  $^{45}\text{Fe}$
- Badanie  $^{48}\text{Ni}$
- Protony opóźnione: odkrycie  $\beta 3p$
- Rozpad  $^6\text{He}$  na  $\alpha$  i  $d$
- Podsumowanie



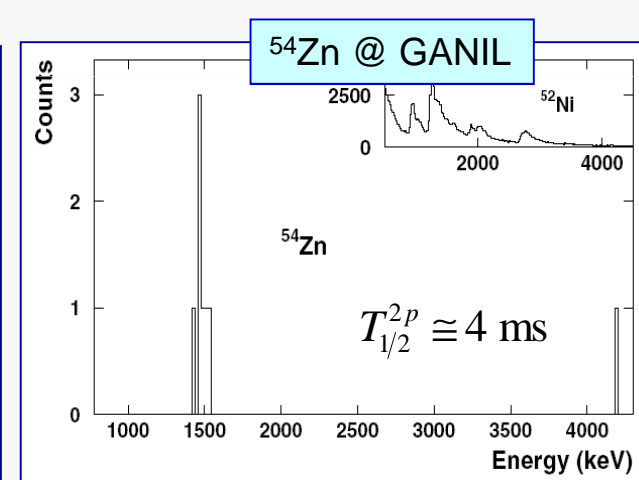
# Emisja $2p$ – pierwsze świadectwa



M. P. et al., EPJ A 14 (2002) 279

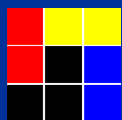


Giovinazzo et al., PRL 89 (02) 102501



Blank et al., PRL 94 (05) 232501

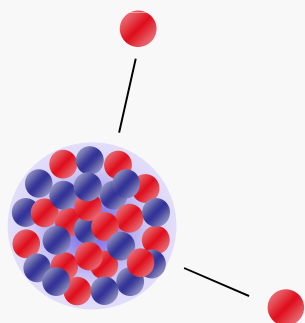
➤ Interpretacja podstawie porównania energii i czasu z modelami jądrowymi.  
Brak bezpośredniego dowodu na emisję dwóch protonów!



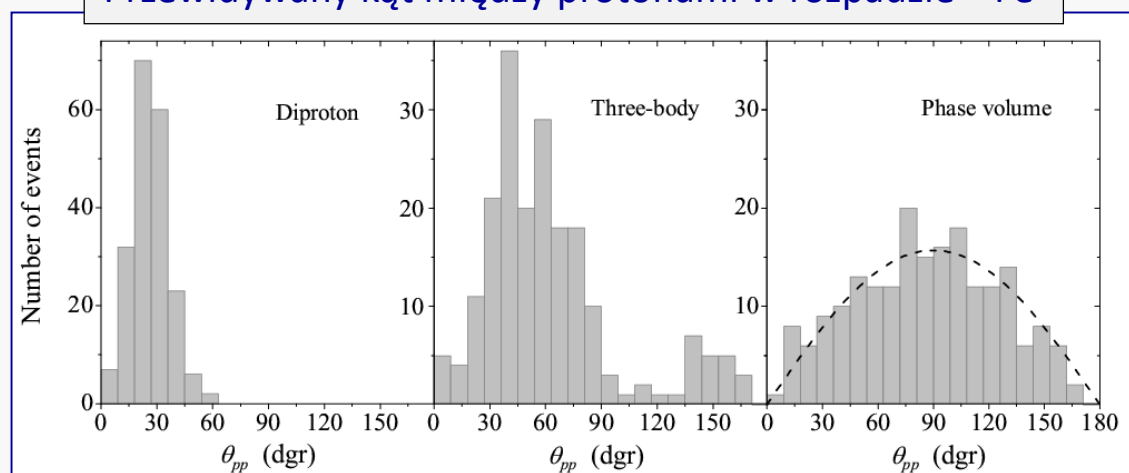
# Jaki jest mechanizm emisji 2p?

- Aby w pełni poznać proces emisji 2p, trzeba zbadać korelacje między pędami emitowanych protonów!
- Model 3-ciałowy Grigorenki i Zhukova przewiduje nietrywialny obraz tych korelacji

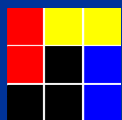
- **Cel:** zarejestrować oba protony oddzielnie, zmierzyć ich energie i wyznaczyć kąt między nimi.



Przewidywany kąt między protonami w rozpadzie  $^{45}\text{Fe}$



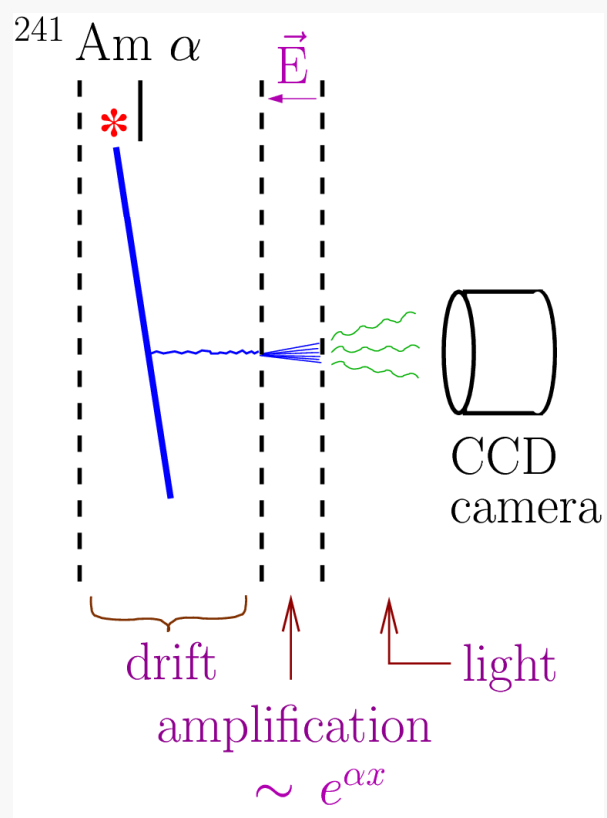
L. Grigorenko : symulacja dla 200 zdarzeń



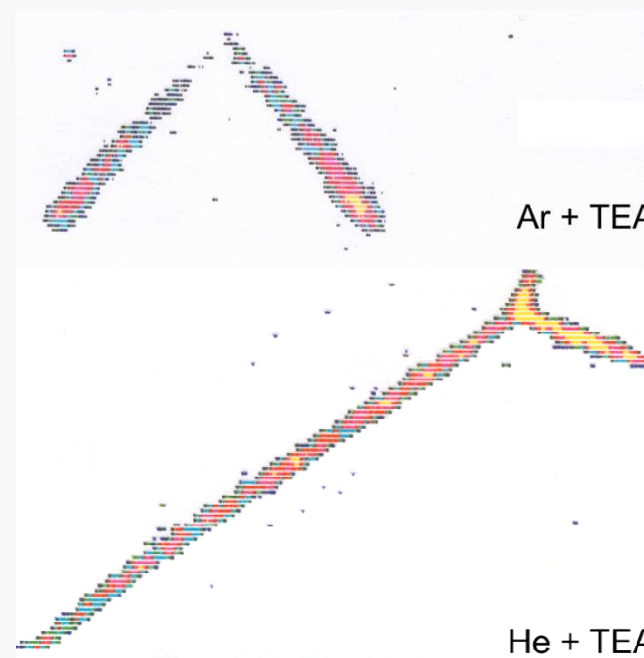
# Główna idea

G. Charpak, W. Dominik, J. P. Farbe, J. Gaudaen, F. Sauli, and M. Suzuki,  
“Studies of light emission by continuously sensitive avalanche chambers,”

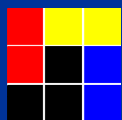
NIM A269 (1988) 142



Zdjęcia torów cząstek alfa

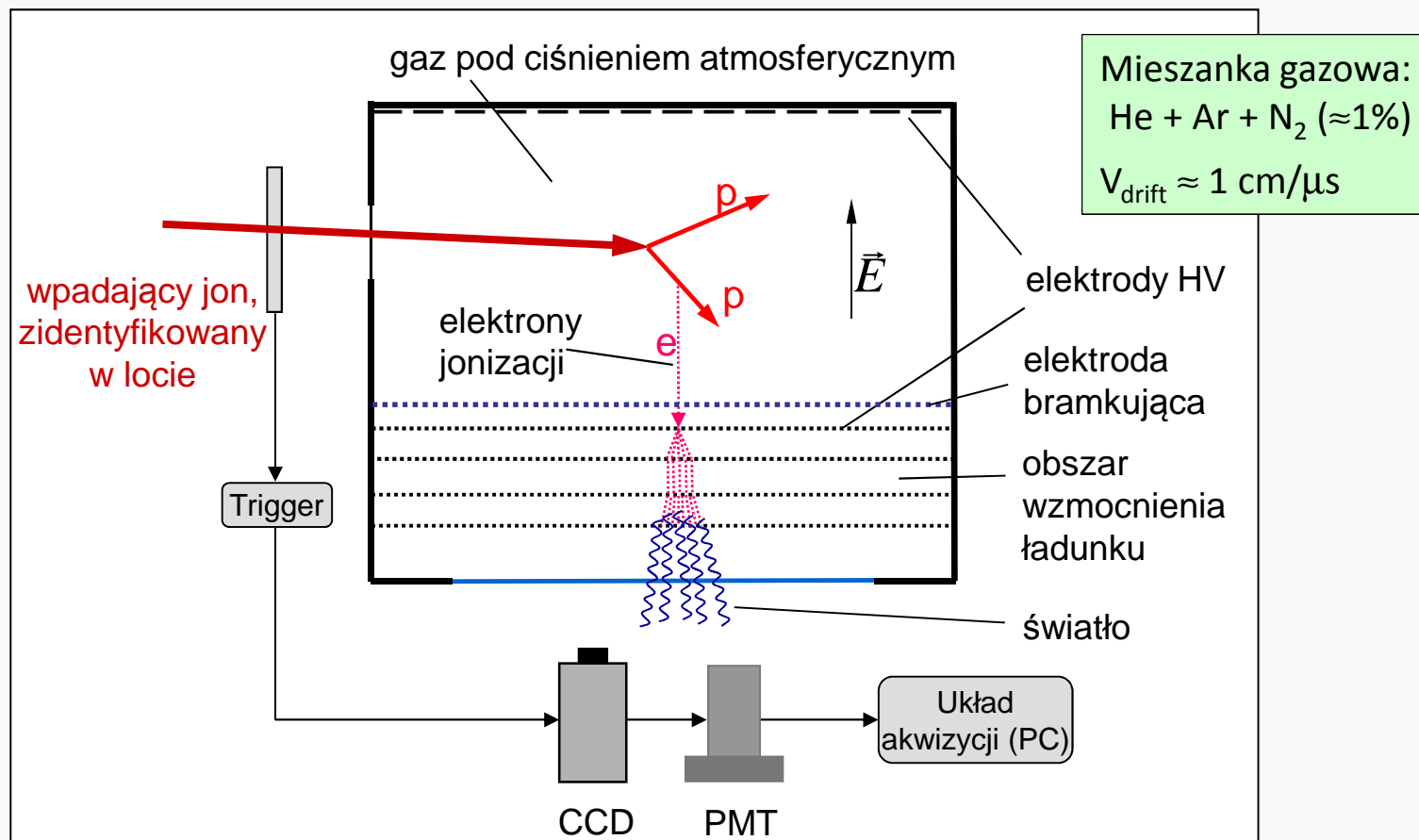


TEA = Triethylamine  $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$



# Komora dryfowa z odczytem optycznym

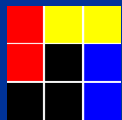
## ➤ OTPC: Optical Time Projection Chamber



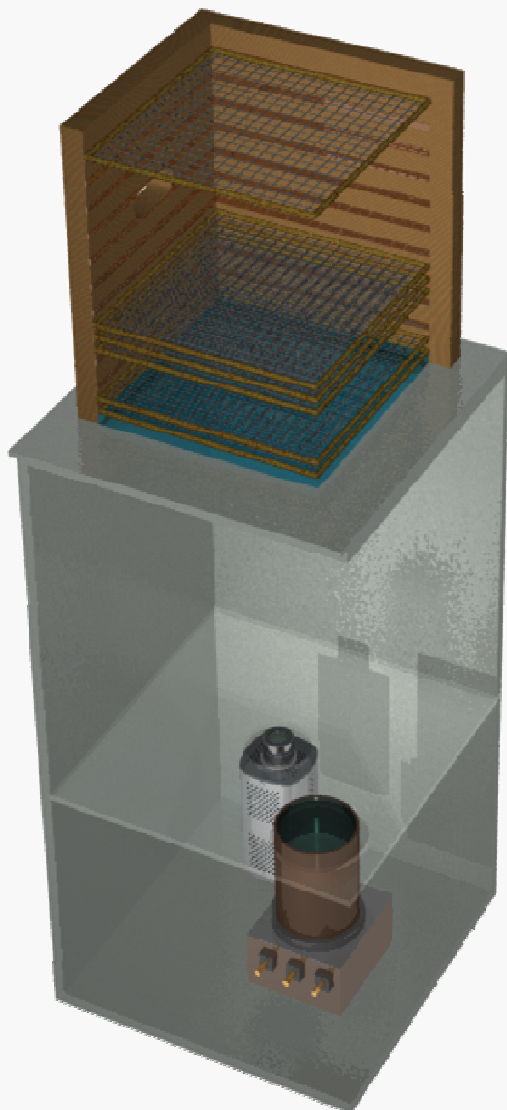
Ćwiok et al., IEEE TNS, 52 (2005) 2895

Miernik et al., NIM A581 (2007) 194

Pomorski et al., PRC90 (2014) 014311



# Schemat budowy

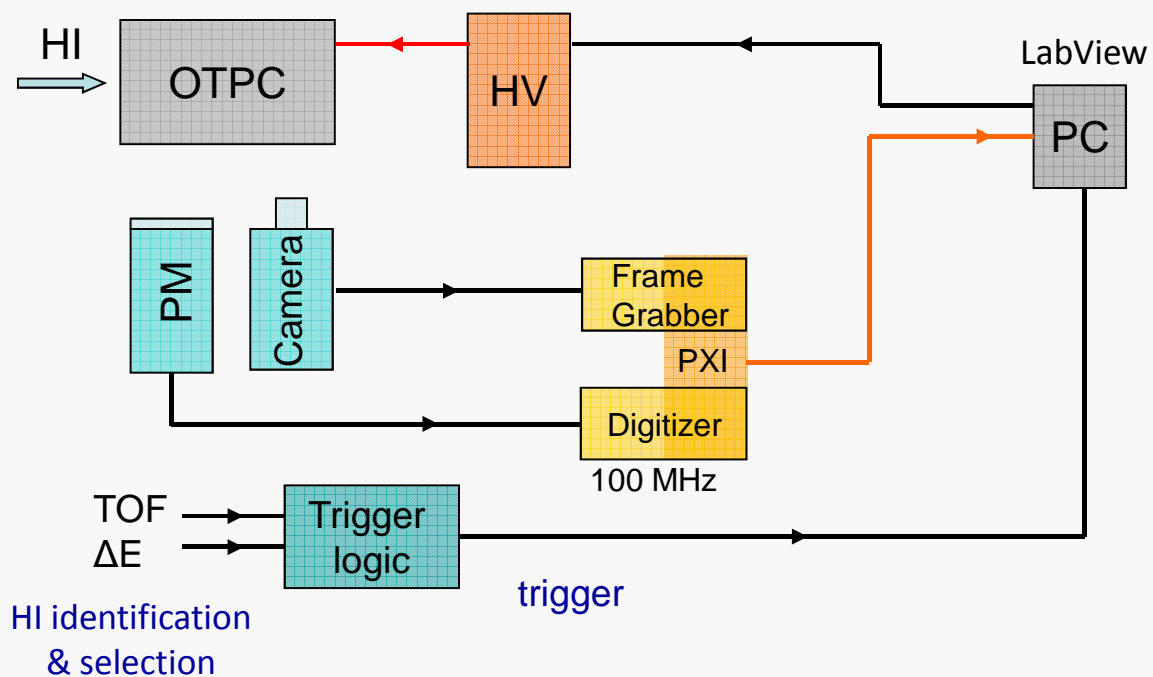


## CCD Texas Instruments

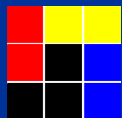
- 1000 × 1000 pix.
- 12-bits
- image ampl. (×2000)

## CCD Hamamatsu

- 512 × 512 pix.
- 16-bits
- image ampl. (×2000)



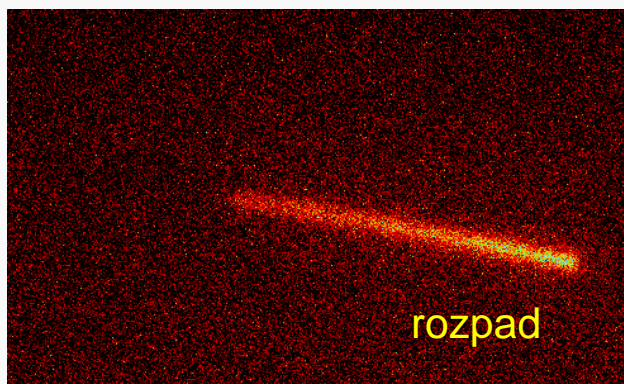
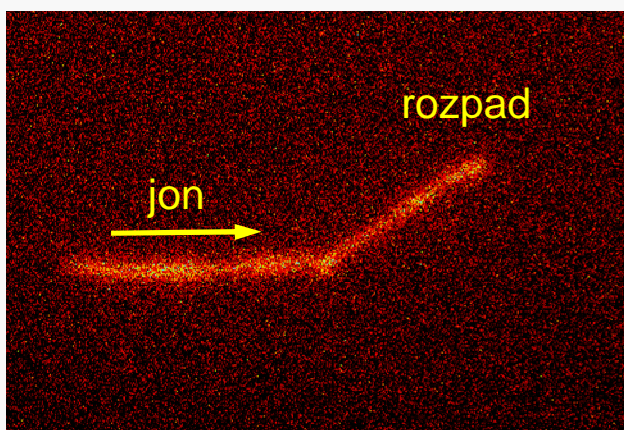




# Co rejestrujemy?

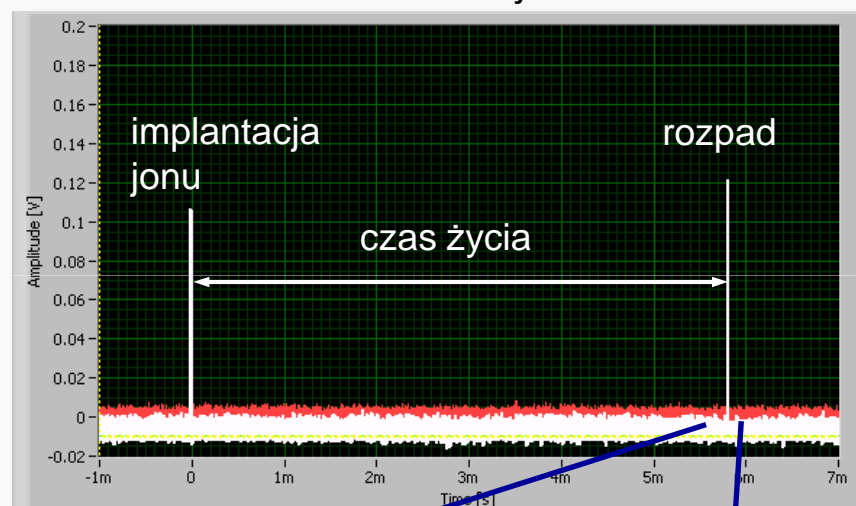
obraz CCD

tory jonów i emitowanych cząstek

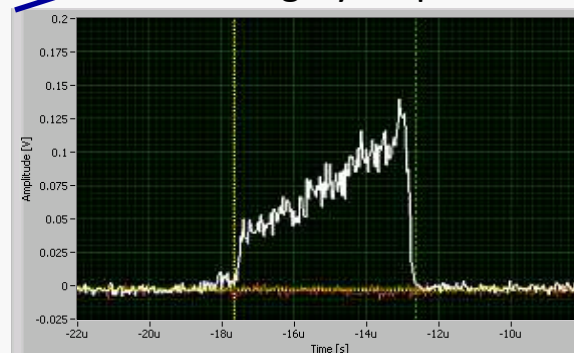


próbkowany sygnał z PMT

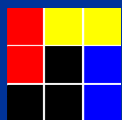
czasowa sekwencja zdarzeń



szczegóły rozpadu

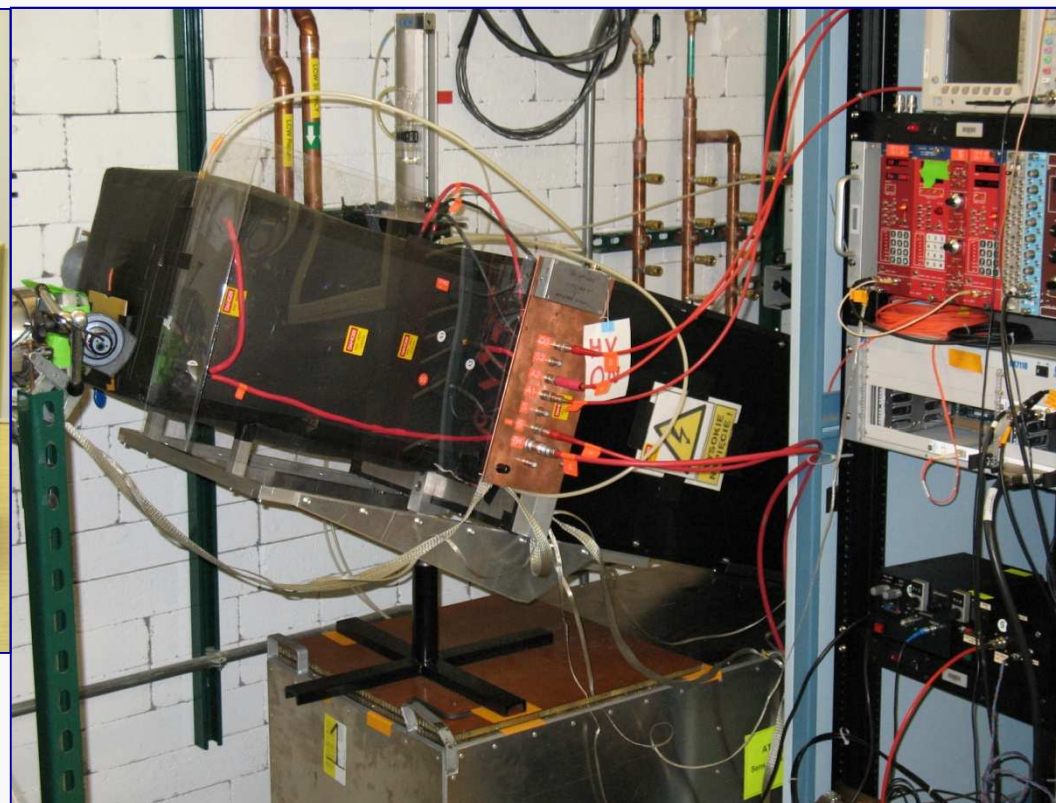
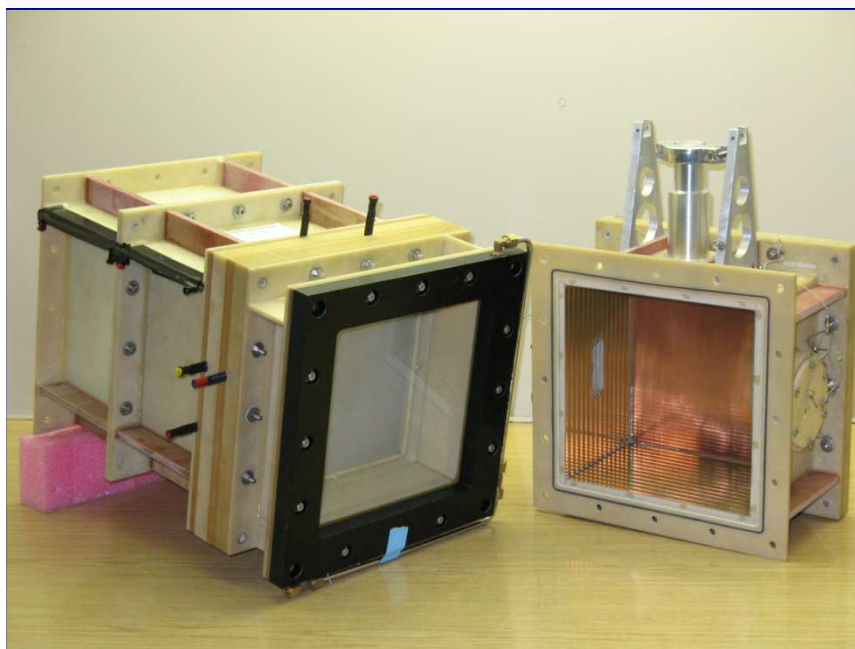






# Pierwsza wersja w NSCL/MSU

Luty 2007, National Superconducting Cyclotron Laboratory/Michigan State University



Mieszanka:

66% He + 32% Ar + 1% N<sub>2</sub> + 1% CH<sub>4</sub>

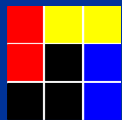
➤ zasięg protonów 550 keV ≈ 2.3 cm

➤ rozrzut jonów <sup>45</sup>Fe ≈ 50 cm

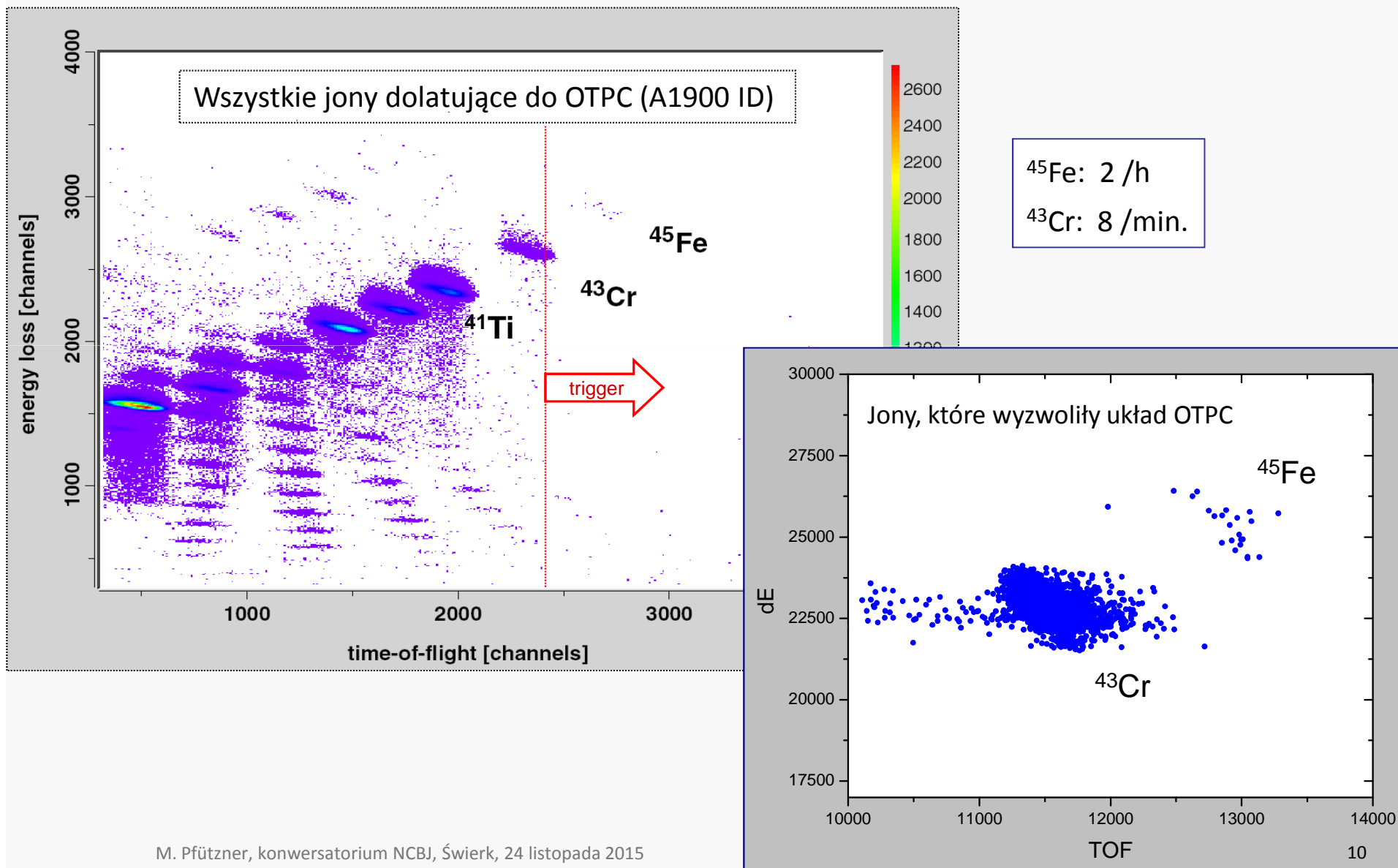
Objętość aktywna: 20×20×42 cm<sup>3</sup>

Reakcja: <sup>58</sup>Ni at 161 MeV/u + <sup>nat</sup>Ni → <sup>45</sup>Fe

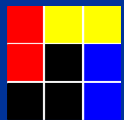
Separacja i identyfikacja w locie ( $\Delta E + TOF$ )  
w separatorze A1900 z dwoma degraderami



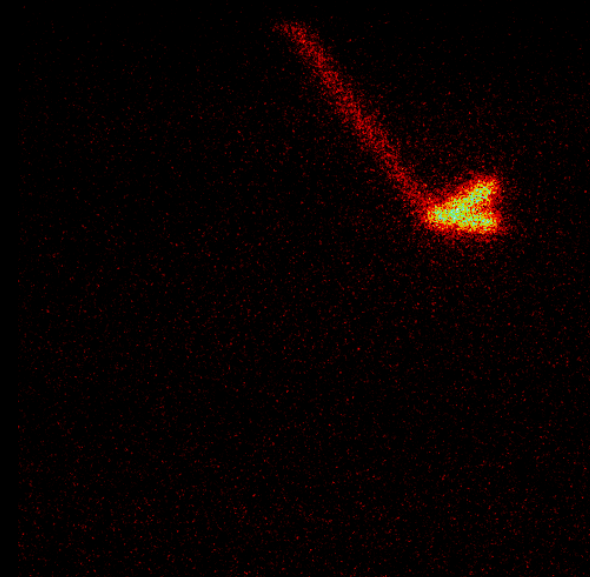
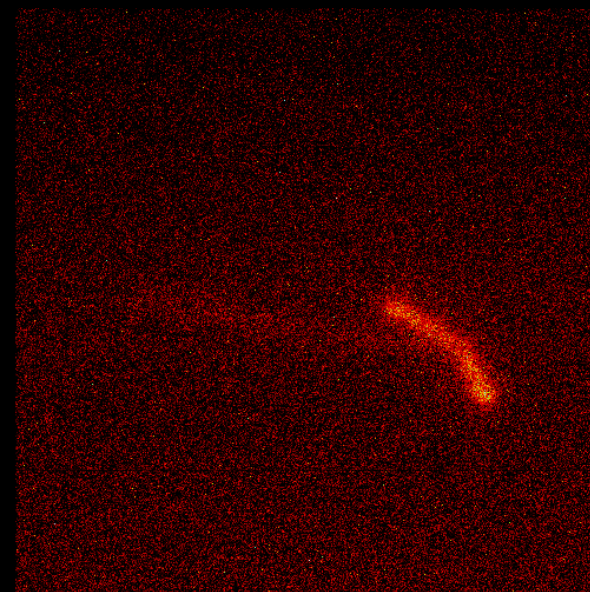
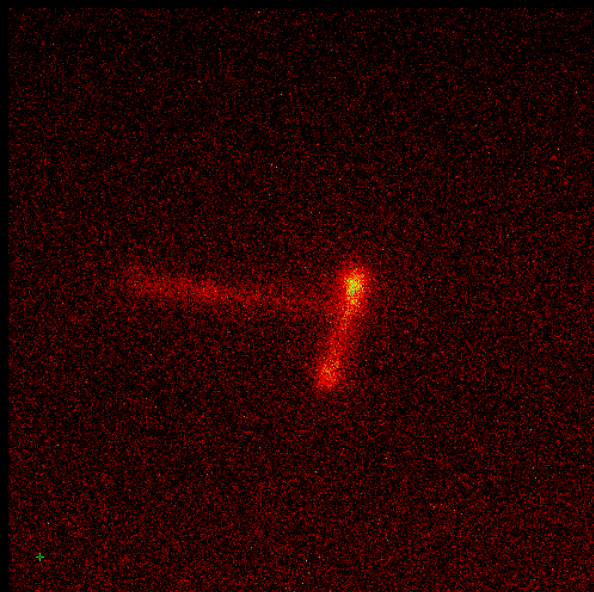
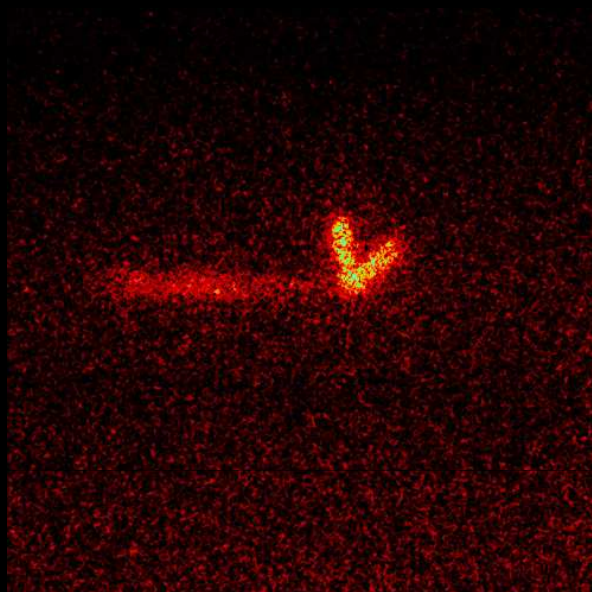
# Identyfikacja jonów w locie

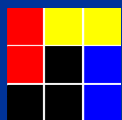




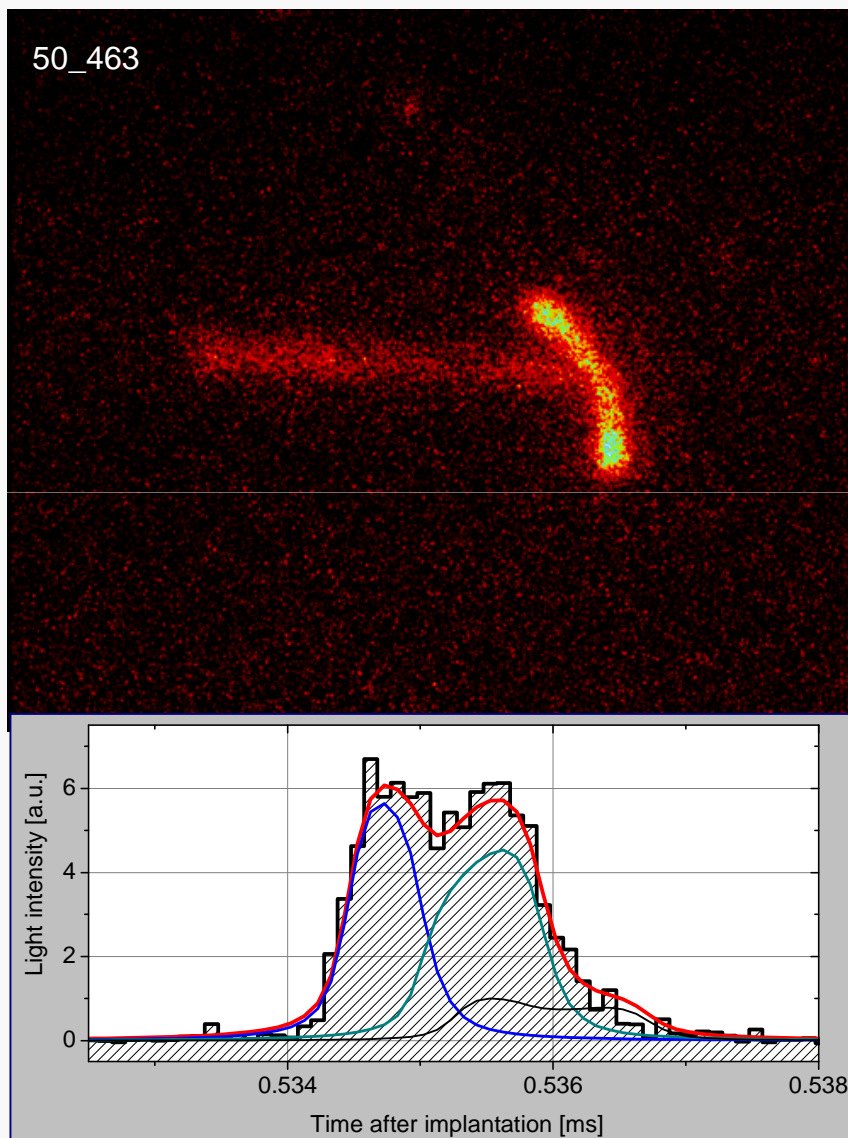


# Zdarzenia emisji $2p$ z $^{45}\text{Fe}$

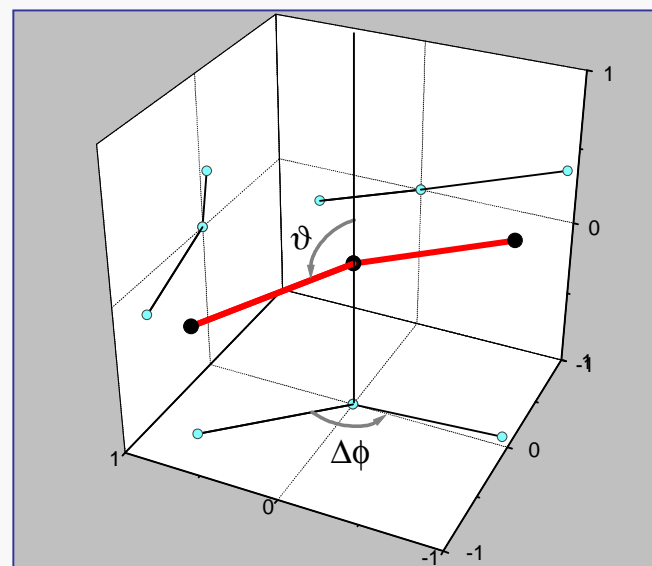




# Rekonstrukcja w 3D



- Łącząc informacje z CCD i PMT można zrekonstruować tory cząstek w przestrzeni

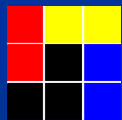


$$\vartheta_1 = (104 \pm 2)^\circ, \quad \vartheta_2 = (70 \pm 3)^\circ$$
$$\Delta\phi = (142 \pm 3)^\circ \rightarrow \theta_{pp} = (143 \pm 5)^\circ$$

- Udało się to zrobić dla 75 zdarzeń

Miernik et al., PRL 99 (07) 192501

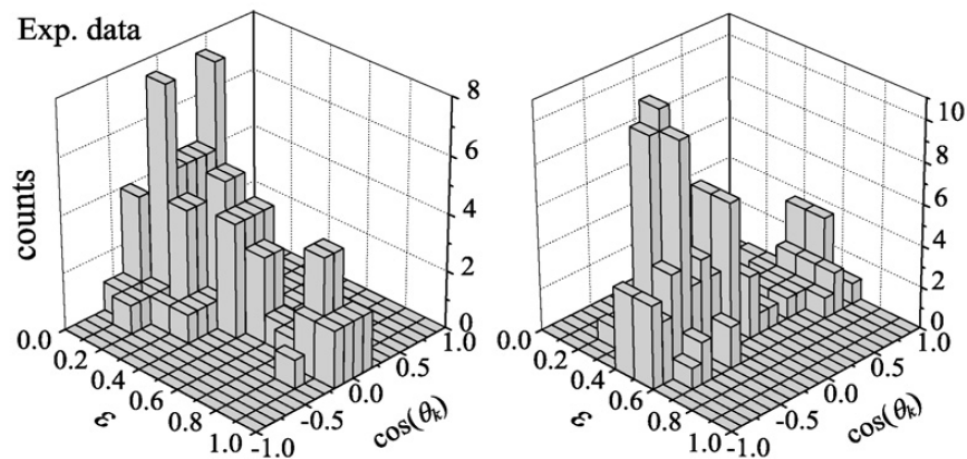
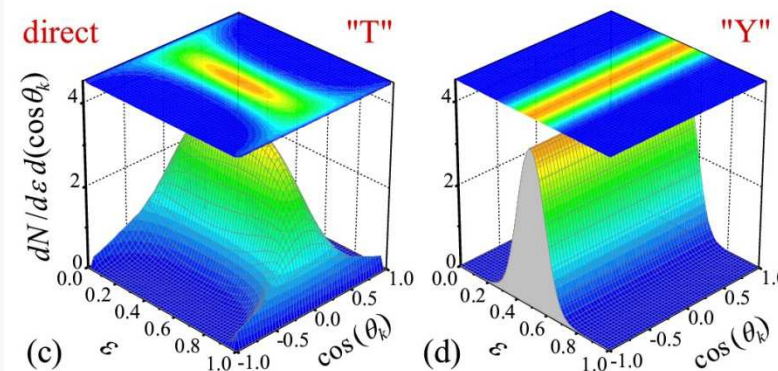
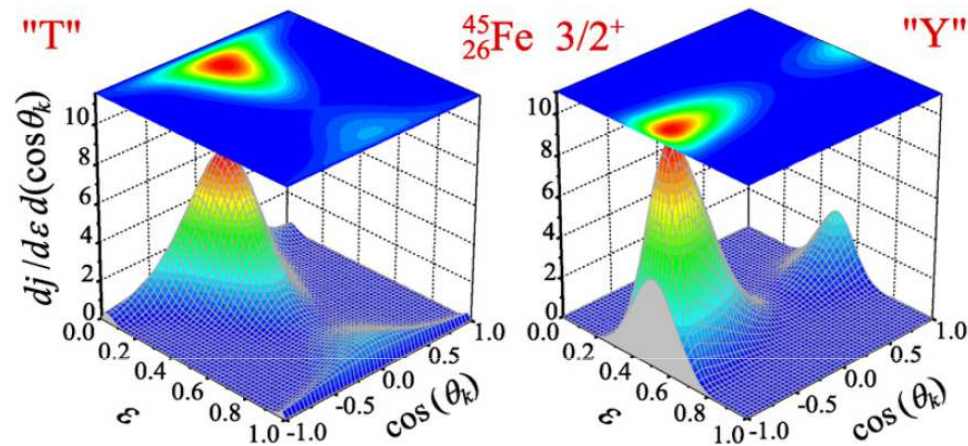
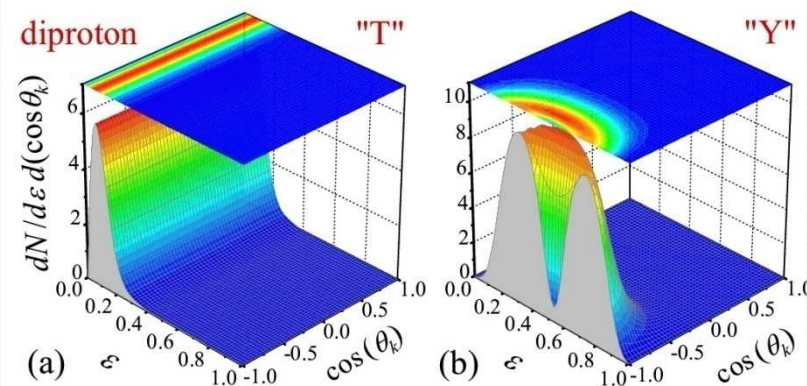




# Obraz korelacji $p$ - $p$ dla $^{45}\text{Fe}$

Model trójciałowy

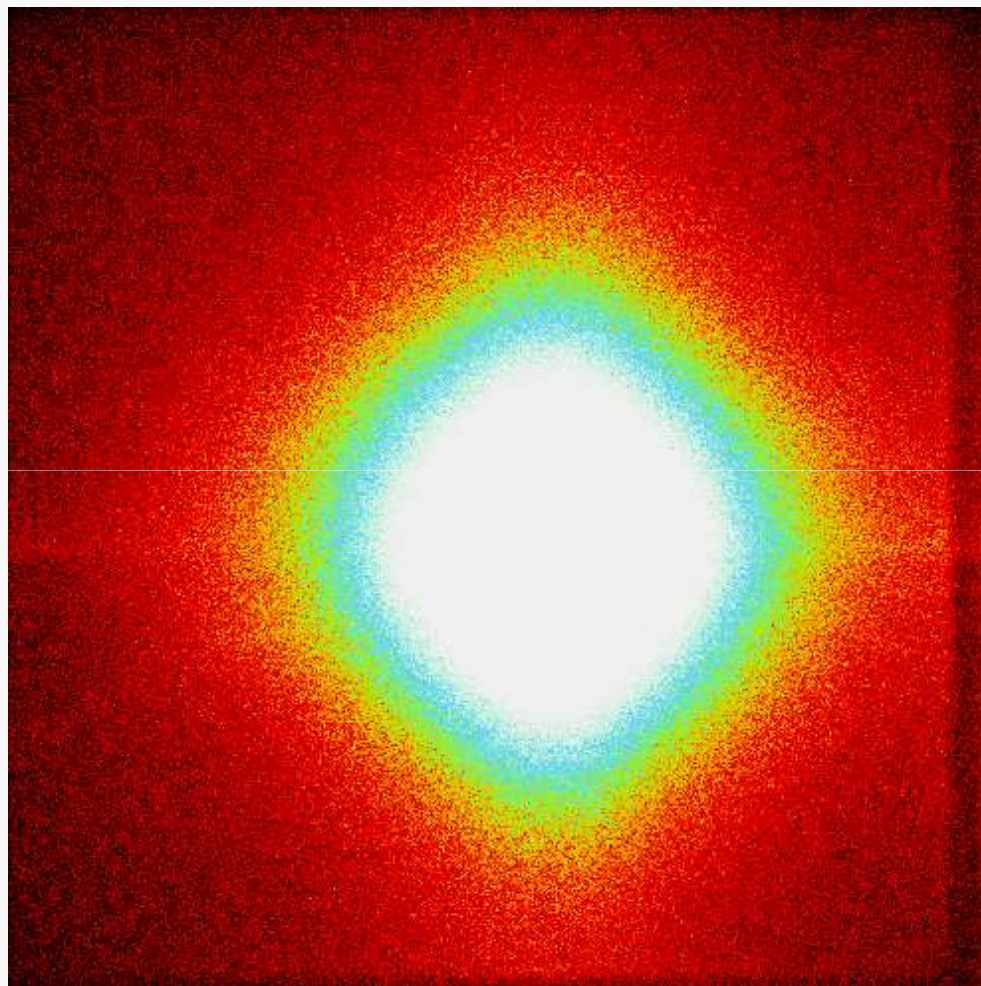
$W(p^2) = 24\%$



Grigorenko and Zhukov, Phys. Rev. C 68 (2003) 054005  
Grigorenko et al., PLB 677 (09) 30

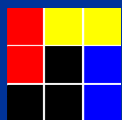


# Wyładowanie

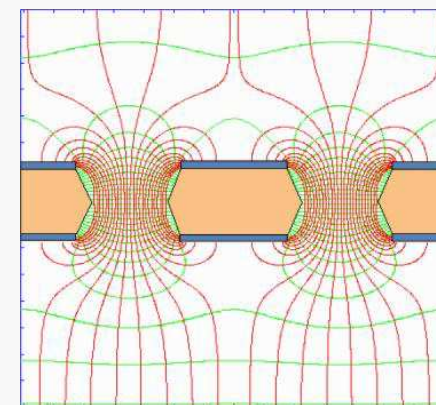
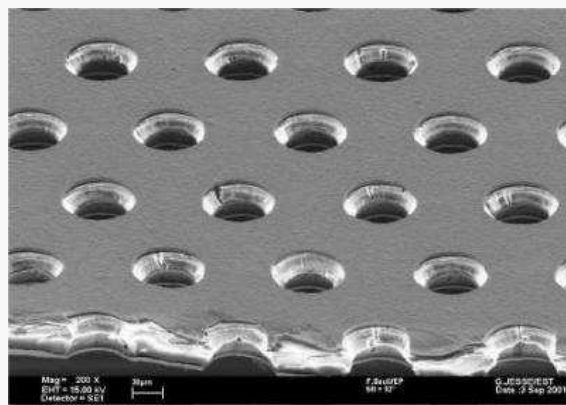
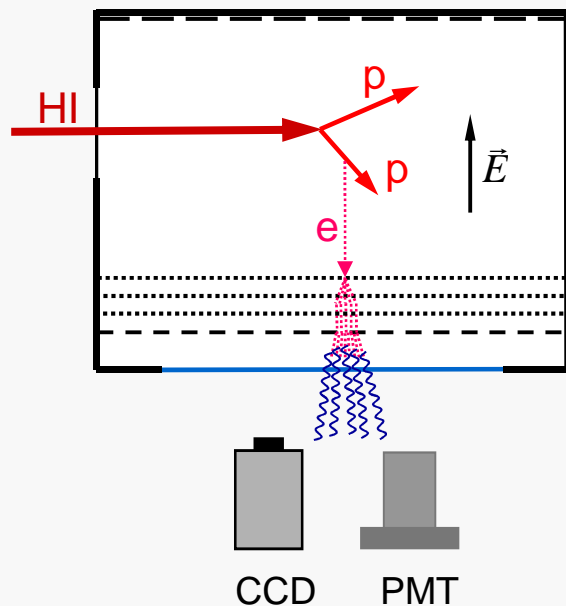


Rozbłyski bywają spektakularne ale są szkodliwe!



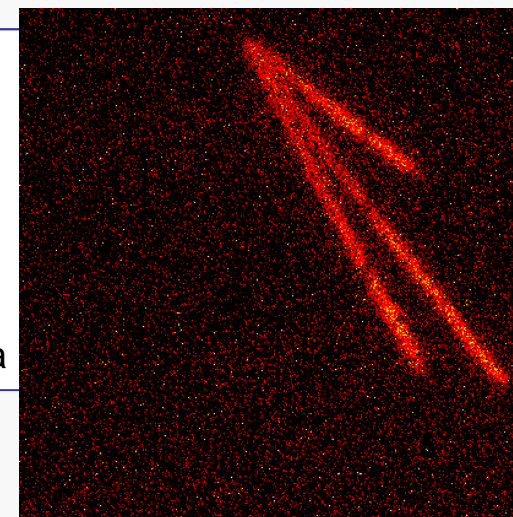


# Nowa, lepsza wersja detektora



- 'Naturalna' geometria (implantacja prostopadle do linii pola):
  - większa wydajność
  - brak wyładowań wywołanych jonami
  - mniejszy problem dyfuzji

- Pierwszy stopień wzmacnienia zastąpiony 3-4 foliami GEM
  - mniejsze napięcia
  - mniej wyładowań
  - większe wzmacnienie
  - większa rozpiętość dynamiczna

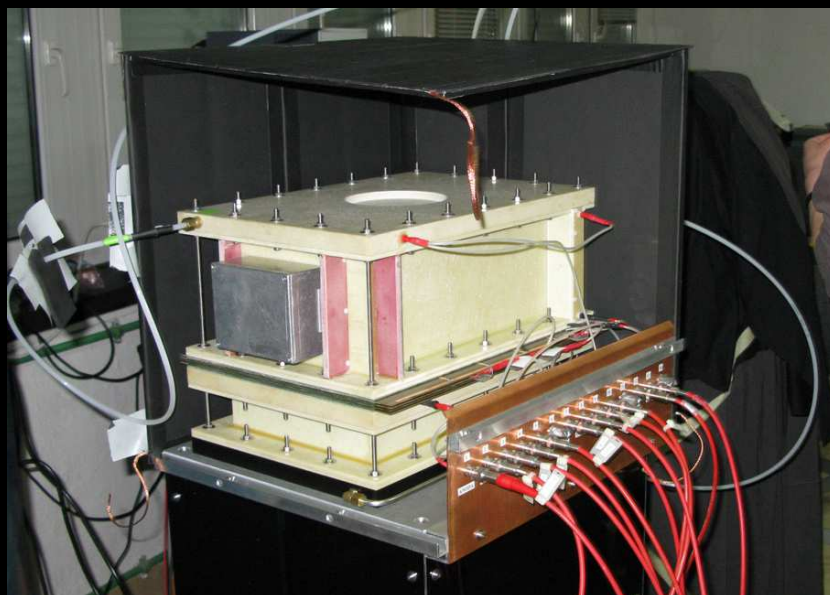
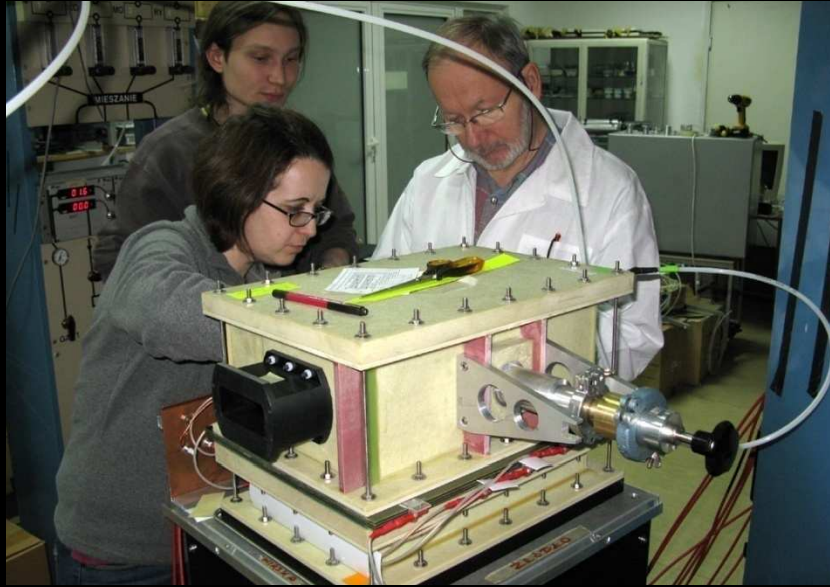


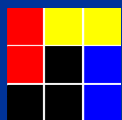
Tory cząstek  $\alpha$  ze źródła !





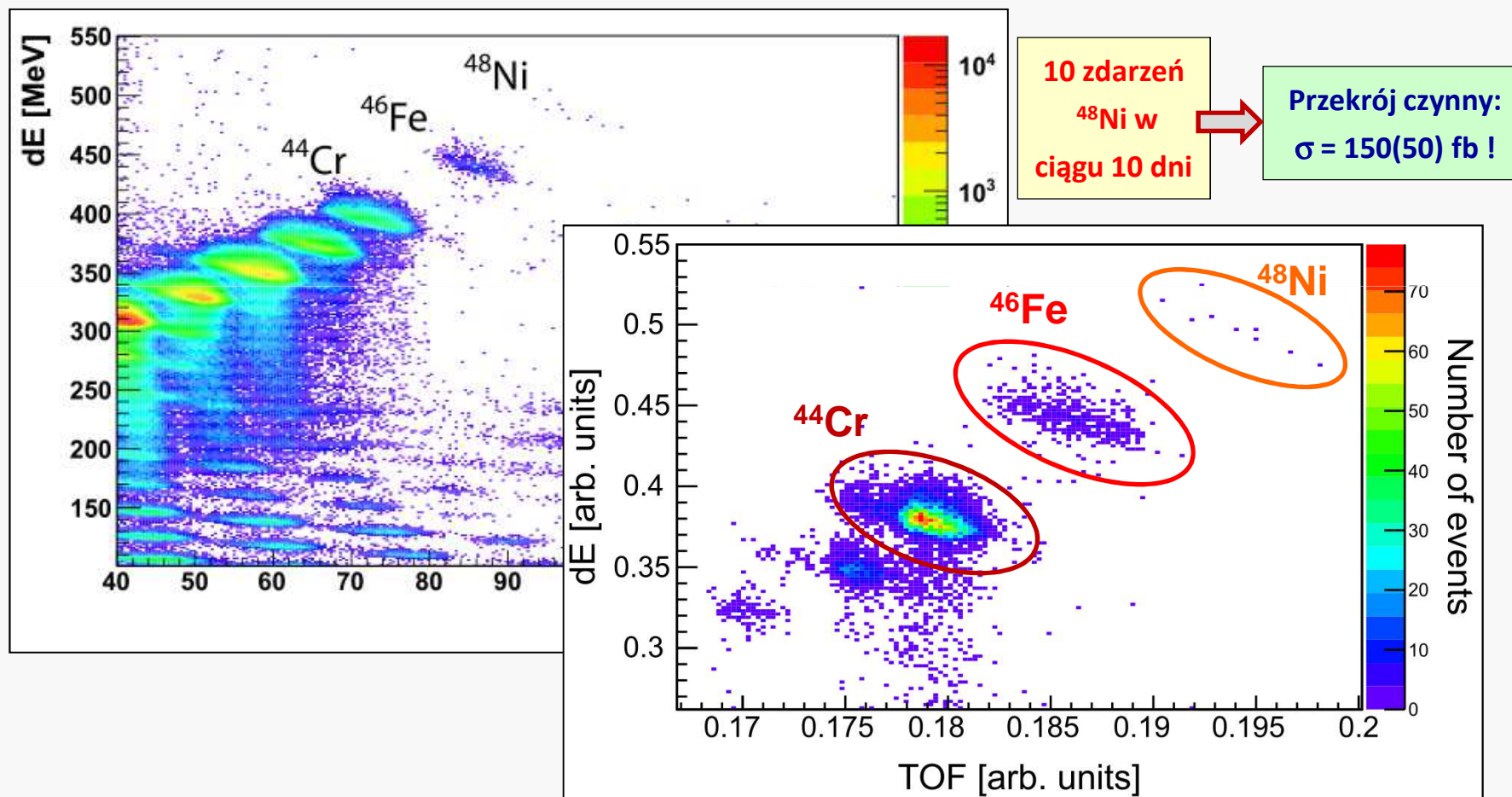
# OTPC 2.0



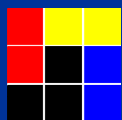


# Badanie $^{48}\text{Ni}$

➤ NSCL/MSU, marzec 2011:  $^{58}\text{Ni}$  @ 160 MeV/u +  $^{\text{nat}}\text{Ni}$  →  $^{48}\text{Ni}$

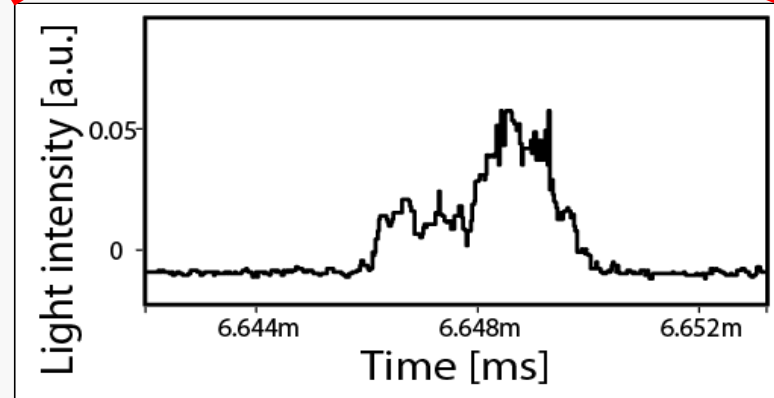
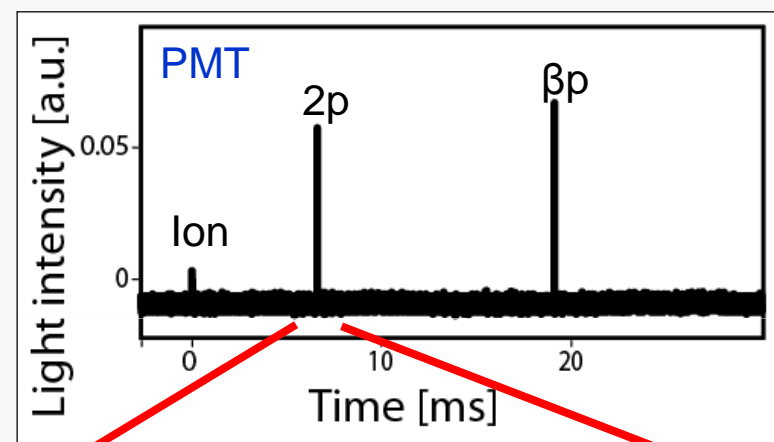
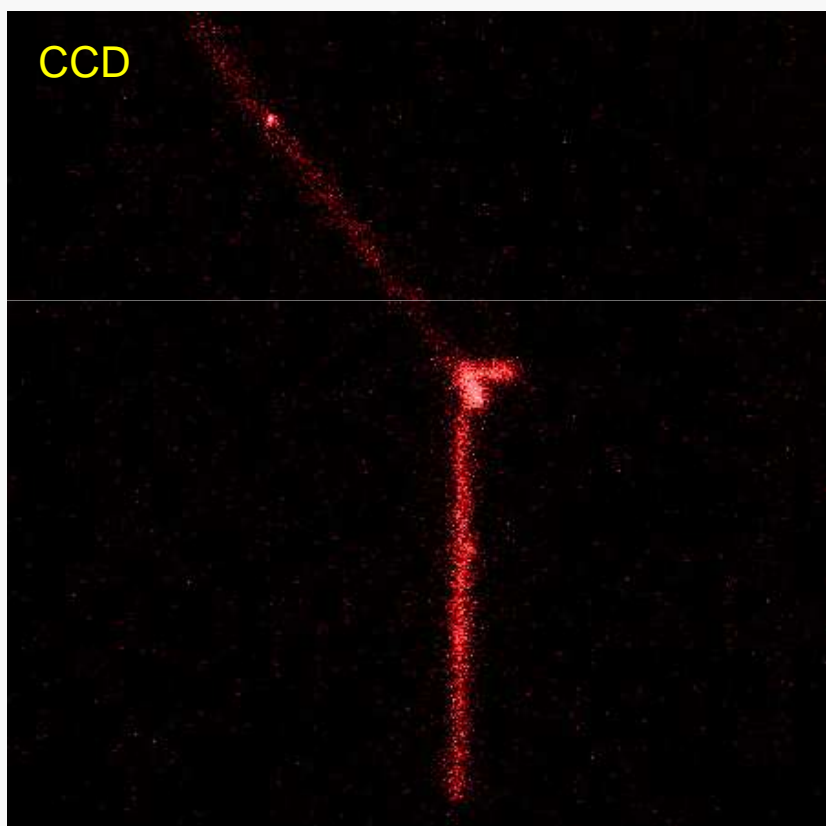


Pomorski et al., PRC 90 (14) 014311



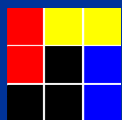
# Promieniotwórczość 2p $^{48}\text{Ni}$

➤ Pierwsza obserwacja emisji 2p z  $^{48}\text{Ni}$

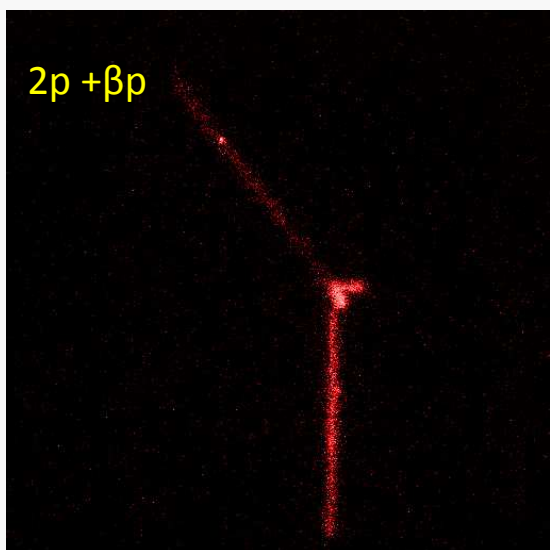
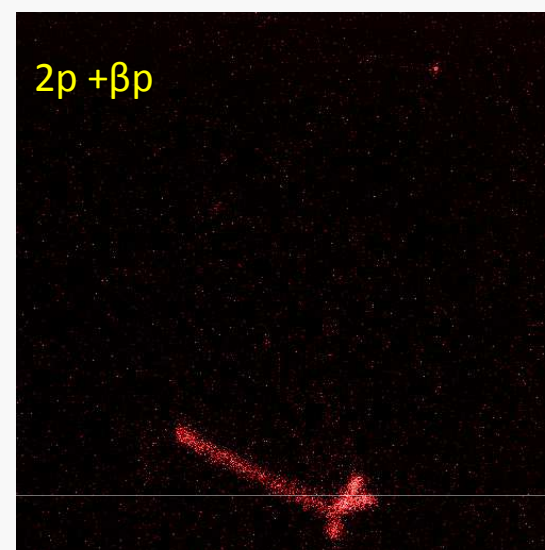
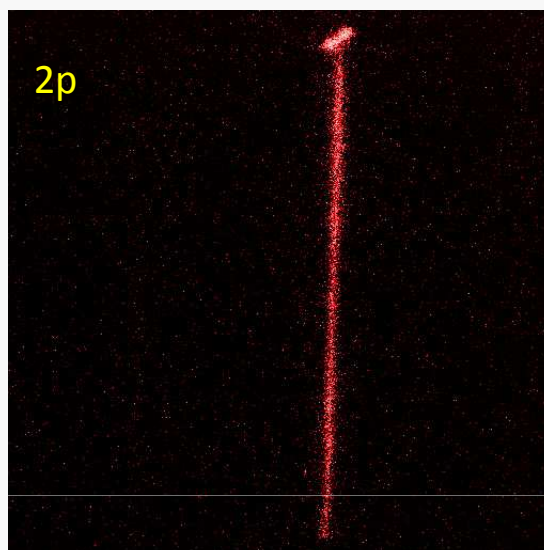
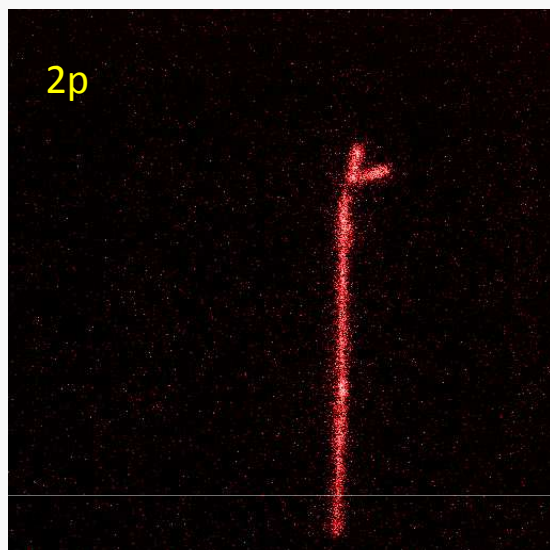


Pomorski et al., PRC 83 (2011) 061303(R)



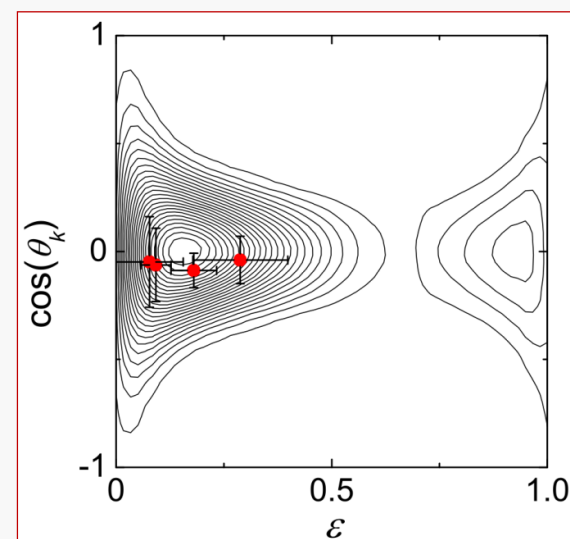


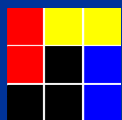
# Wszystkie zdarzenia $2p$ z $^{48}\text{Ni}$



Four 2p events  
of  $^{48}\text{Ni}$

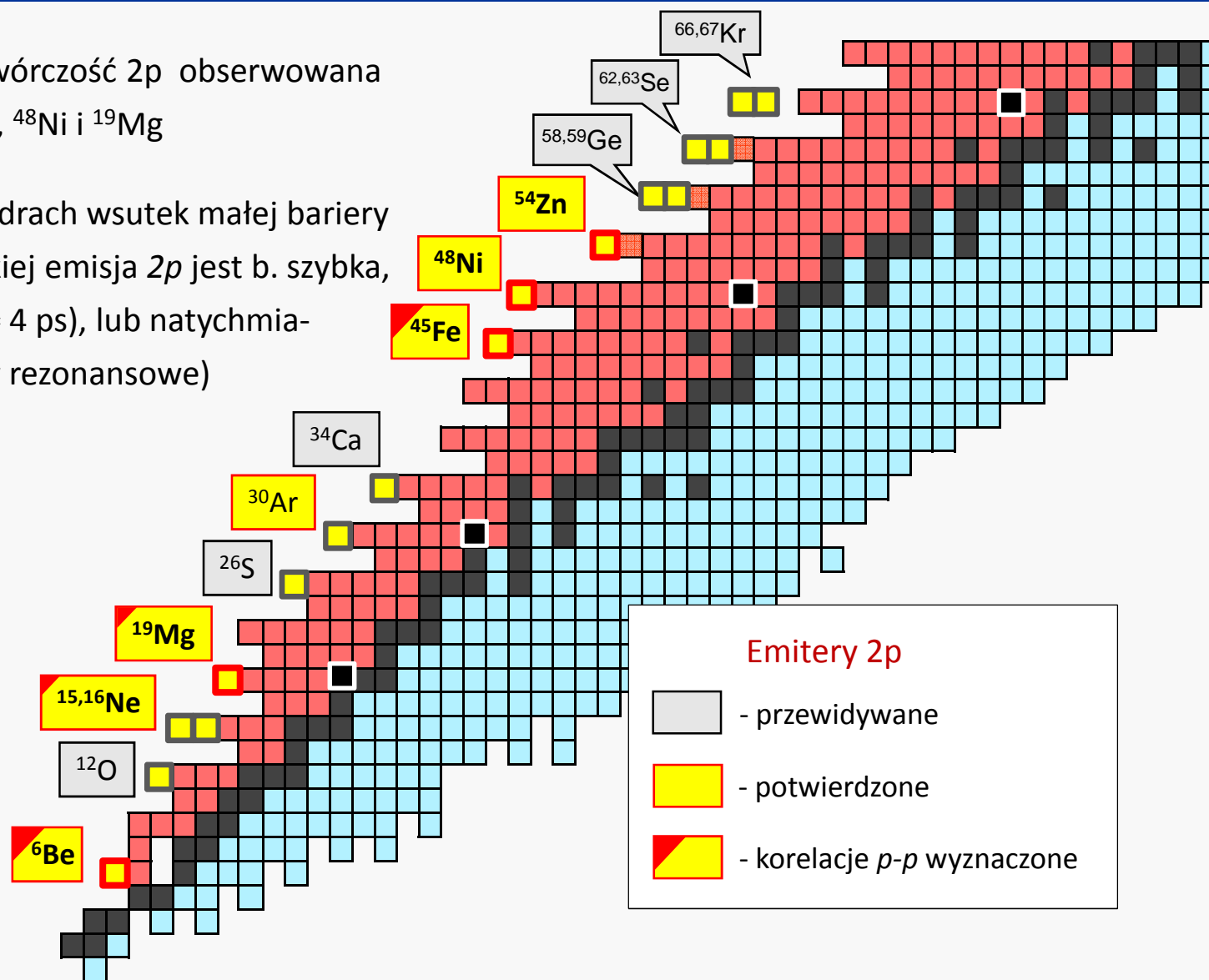
$Q_{2p} = 1.29(4)$  MeV

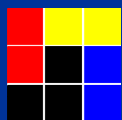




# Stan badań nad emisją 2p

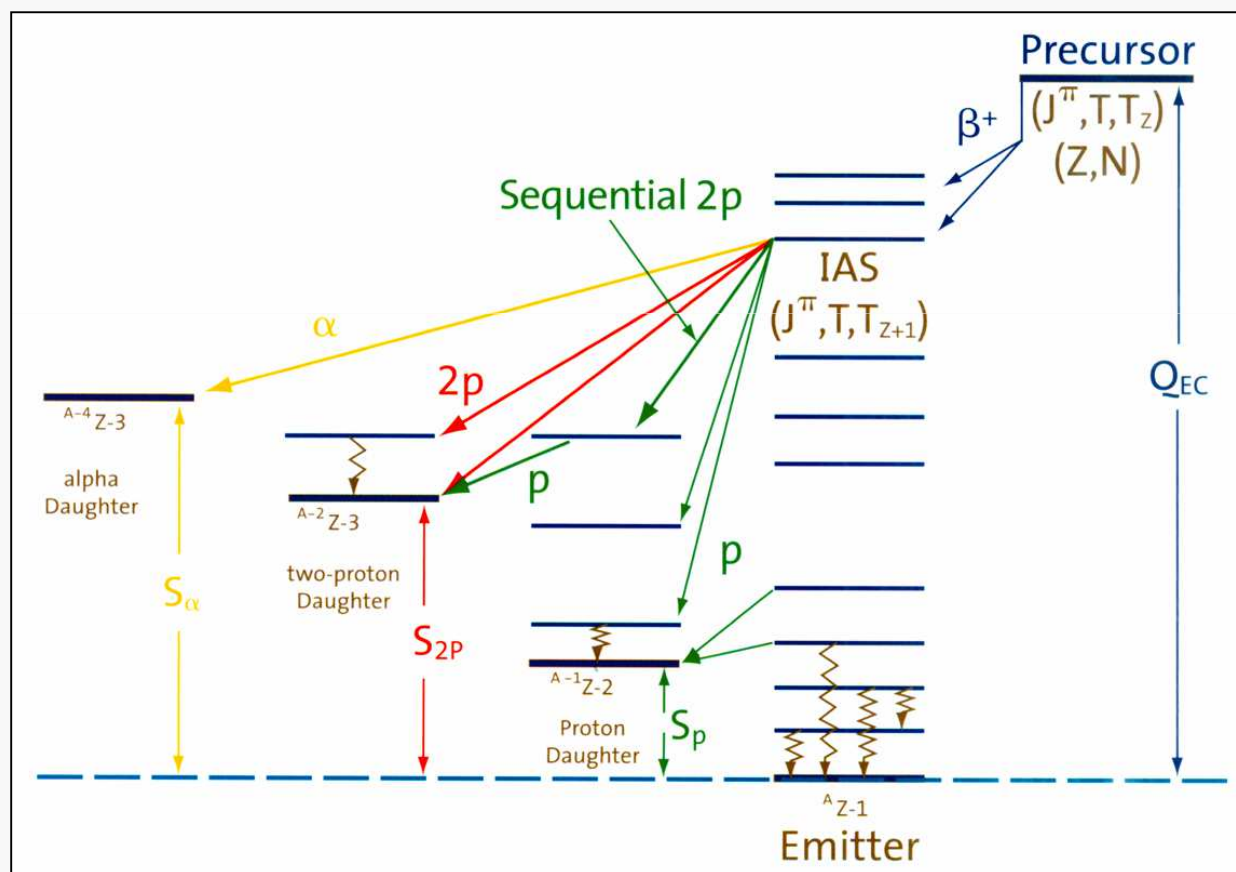
- Promieniotwórczość 2p obserwowana w  $^{45}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Zn}$ ,  $^{48}\text{Ni}$  i  $^{19}\text{Mg}$
- W lekkich jądrach wsutek małej bariery kulombowskiej emisja 2p jest b. szybka, ( $T_{1/2}(^{19}\text{Mg}) \approx 4$  ps), lub natychmiastowa (stany rezonansowe)



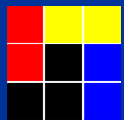


# Emisja cząstek opóźnionych

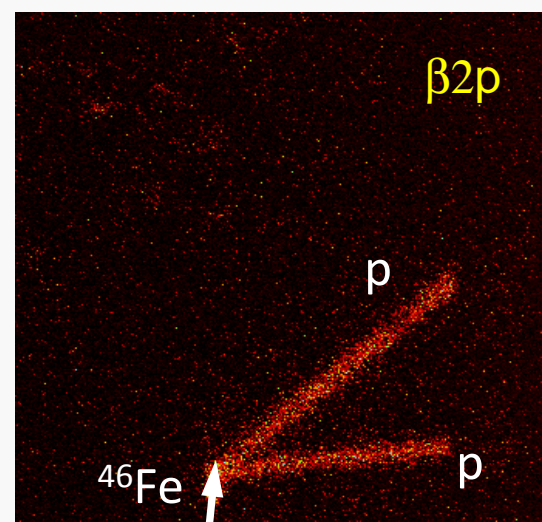
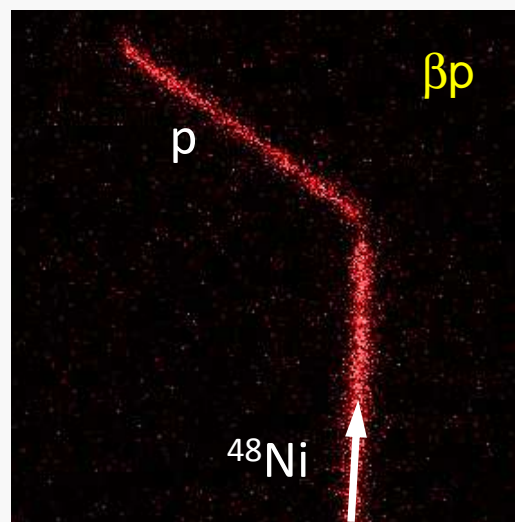
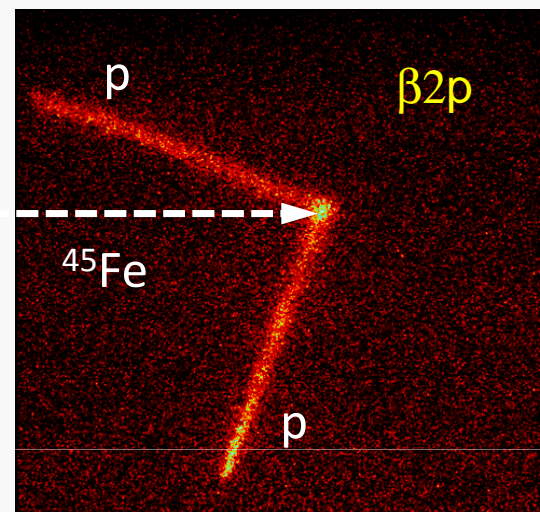
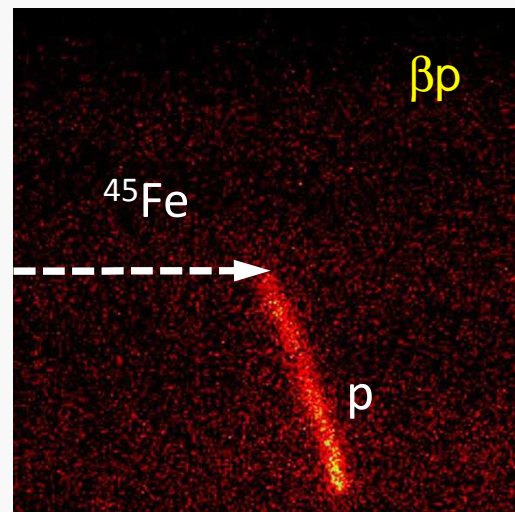
- Nuklidy dalekie od trwałości mają bardzo duże energie przemiany  $\beta$ !  
Przejścia  $\beta$  zasilają stany o dużej energii, powyżej progu na separację cząstek.



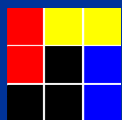
Blank and Borge, Progress in Part. Nucl. Phys. 60 (2008) 403



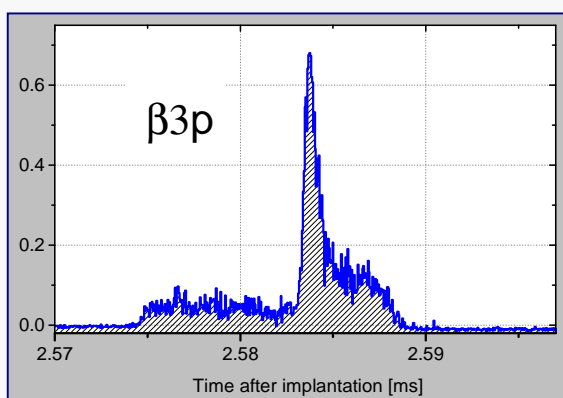
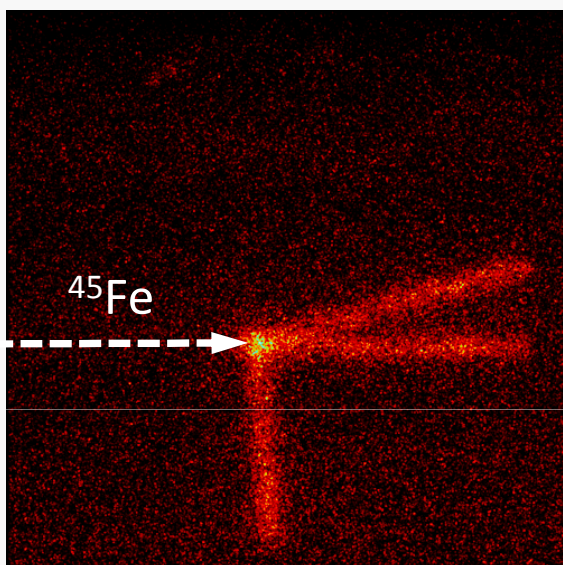
# Opóźnione protony



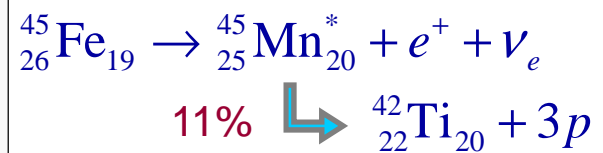




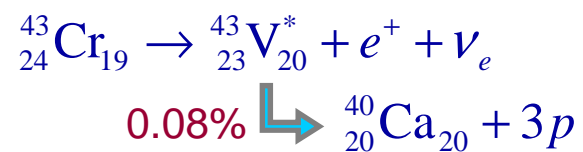
# Odkrycie opóźnionej emisji 3p



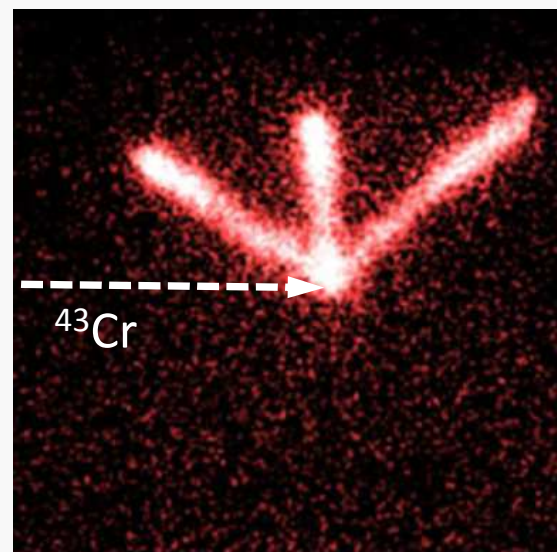
Miernik et al., PRC 76 (07) 041304(R)



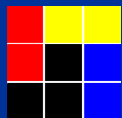
125 rozpadów  ${}^{45}\text{Fe}$   
38 rozpadów  $\beta$   
4 przypadki  $\beta 3p$



$\approx 40\,000$  zdarzeń  ${}^{43}\text{Cr}$   
12  $\beta 3p$

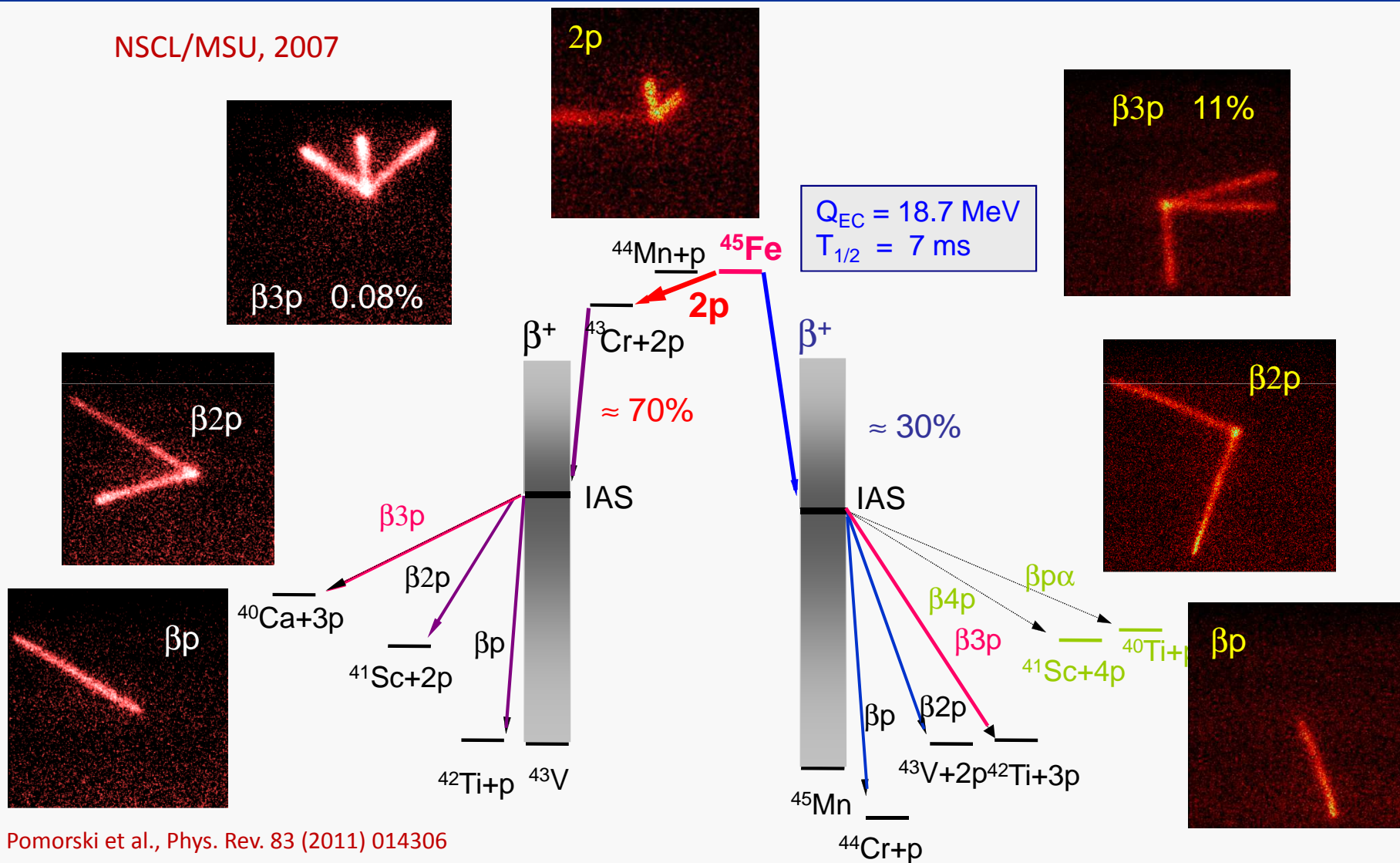


Pomorski et al., PRC 83 (11) 014306(R)



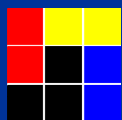
# Rozpady $^{45}\text{Fe}$ i $^{43}\text{Cr}$

NSCL/MSU, 2007



Pomorski et al., Phys. Rev. 83 (2011) 014306

Miernik et al., PRL 99 (07) 192501



# $\beta 3p$ w $^{31}\text{Ar}$ ?

PHYSICAL REVIEW C

VOLUME 45, NUMBER 1

JANUARY 1992

## Decay modes of $^{31}\text{Ar}$ and first observation of $\beta$ -delayed three-proton radioactivity

D. Bazin,\* R. Del Moral, J. P. Dufour, A. Fleury, F. Hubert, and M. S. Pravikoff

Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan, Le Haut Vigneau 33175 Gradignan CEDEX, France

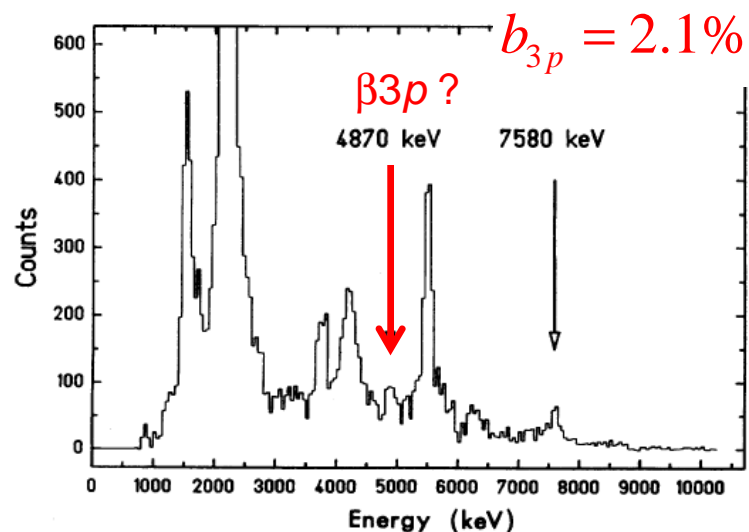
PHYSICAL REVIEW C

VOLUME 59, NUMBER 4

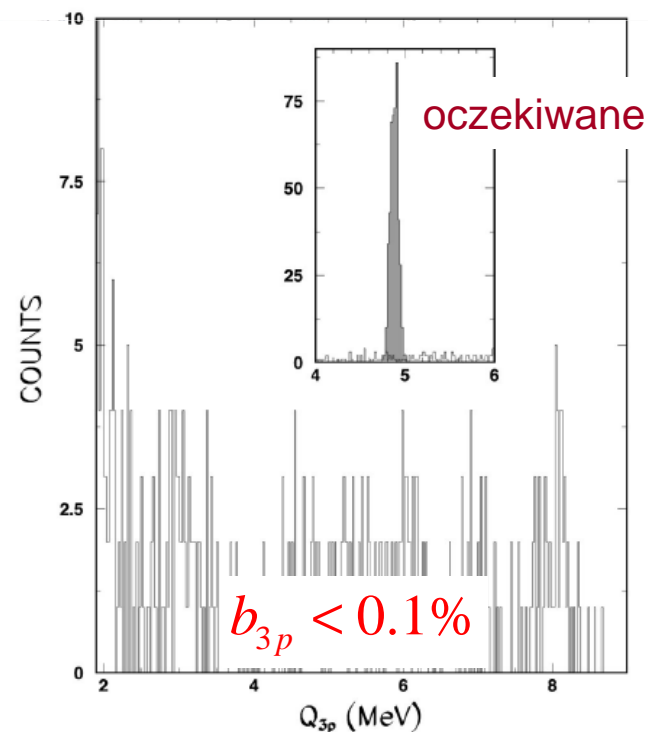
APRIL 1999

## $^{31}\text{Ar}$ examined: New limit on the $\beta$ -delayed three-proton branch

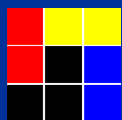
H. O. U. Fynbo,<sup>1</sup> L. Axelsson,<sup>2</sup> J. Äystö,<sup>3</sup> M. J. G. Borge,<sup>4</sup> L. M. Fraile,<sup>4</sup> A. Honk  
A. Jokinen,<sup>5</sup> B. Jonson,<sup>2</sup> I. Martel,<sup>3,7</sup> I. Mukha,<sup>1,7</sup> T. Nilsson,<sup>2,8</sup> G. Nyman,<sup>2</sup> M. Oin  
M. H. Smedberg,<sup>2</sup> O. Tengblad,<sup>4</sup> F. Wenander,<sup>2</sup> and the ISOLDE



M. Pfützner, konsersatorium NCBJ, Świerk, 24 listopada 2015



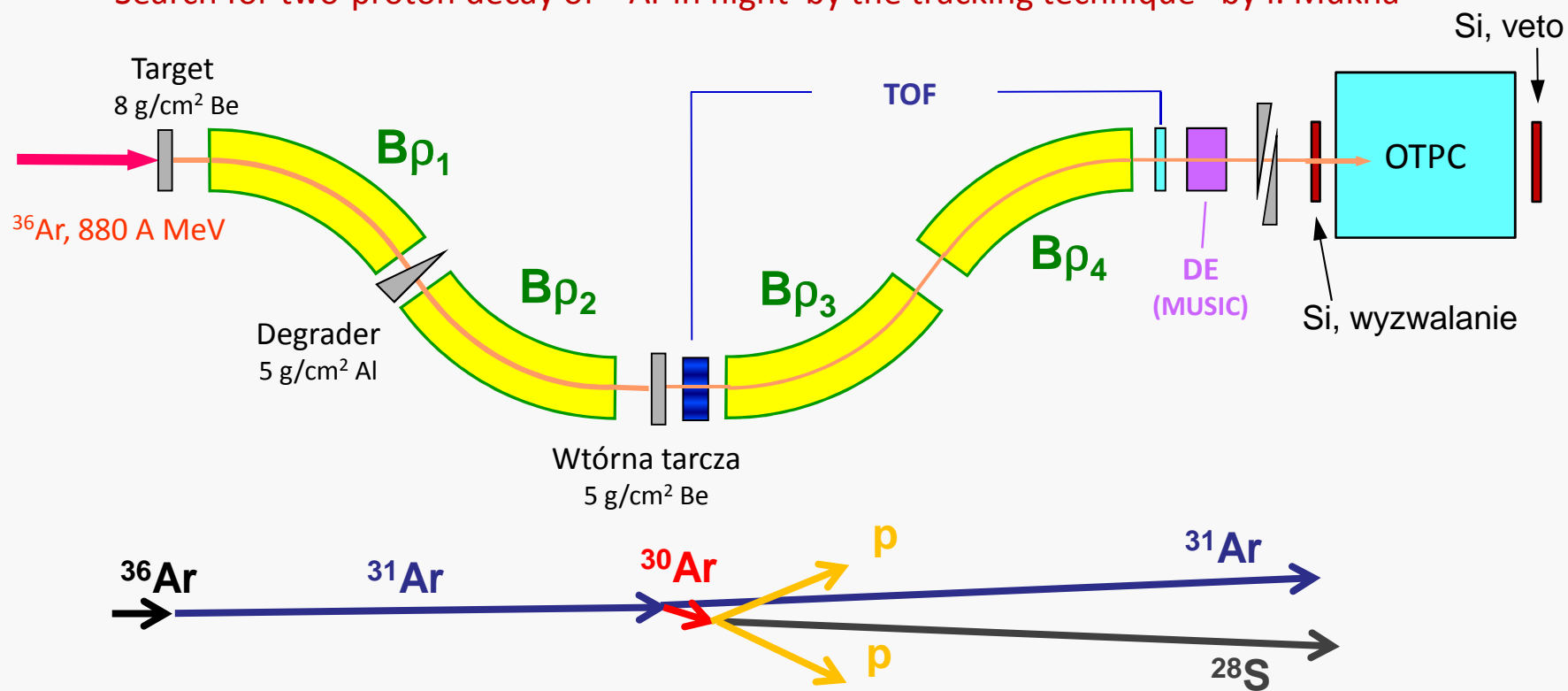
25



# $^{31}\text{Ar}$ na separatorze FRS

➤ Eksperyment w GSI-FRS, sierpień 2012

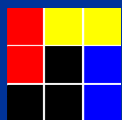
”Search for two-proton decay of  $^{30}\text{Ar}$  in flight by the tracking technique” by I. Mukha



Mukha et al., PRL 115 (2015) 202501

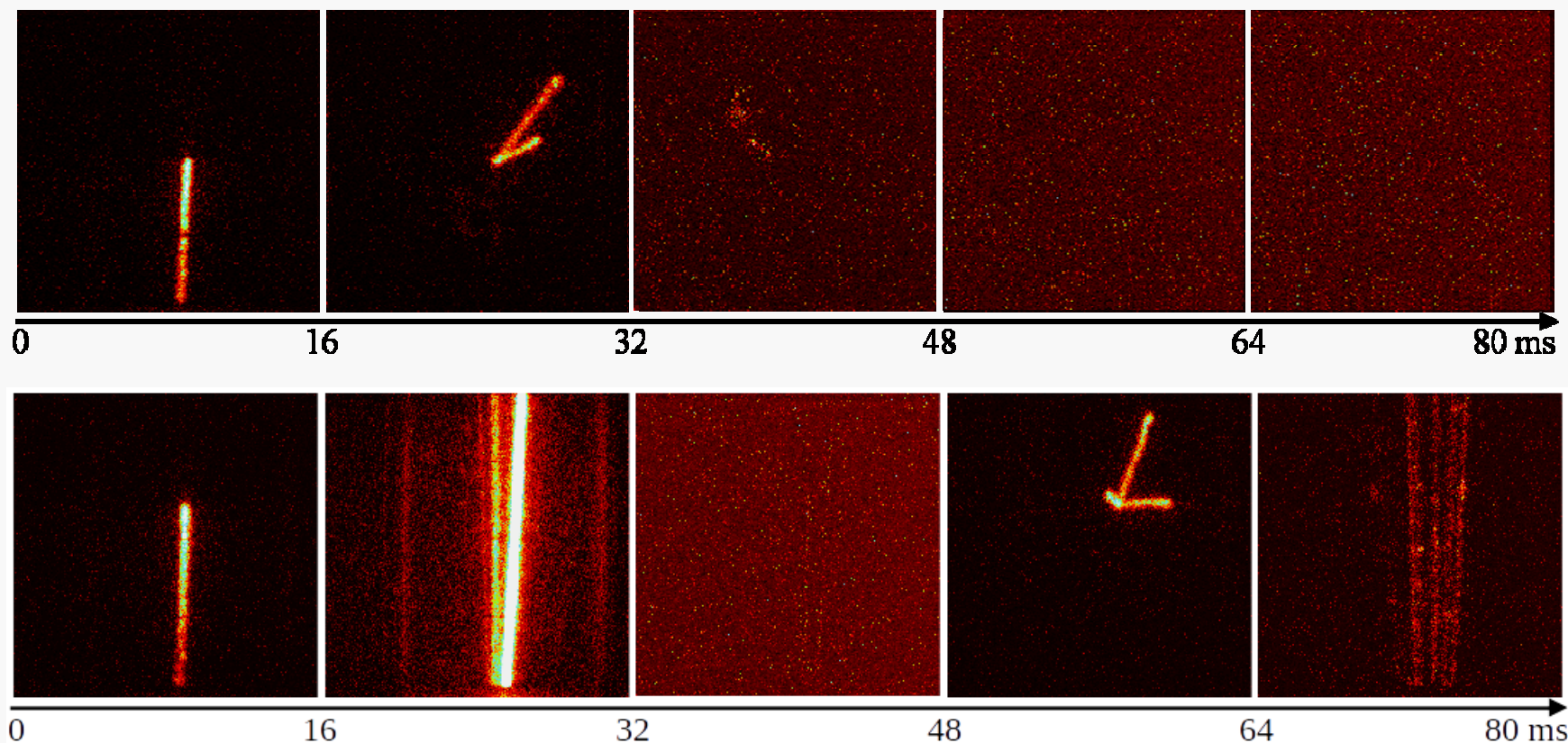
➤ Wiele jonów  $^{31}\text{Ar}$  dolatuje na koniec separatora  
Zatrzymujemy je w OTPC i badamy ich rozpad





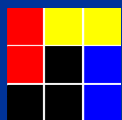
# Tak, $\beta 3p$ w $^{31}\text{Ar}$ !

- Nowy tryb akwizycji – seria krótkich ekspozycji („filmik”)

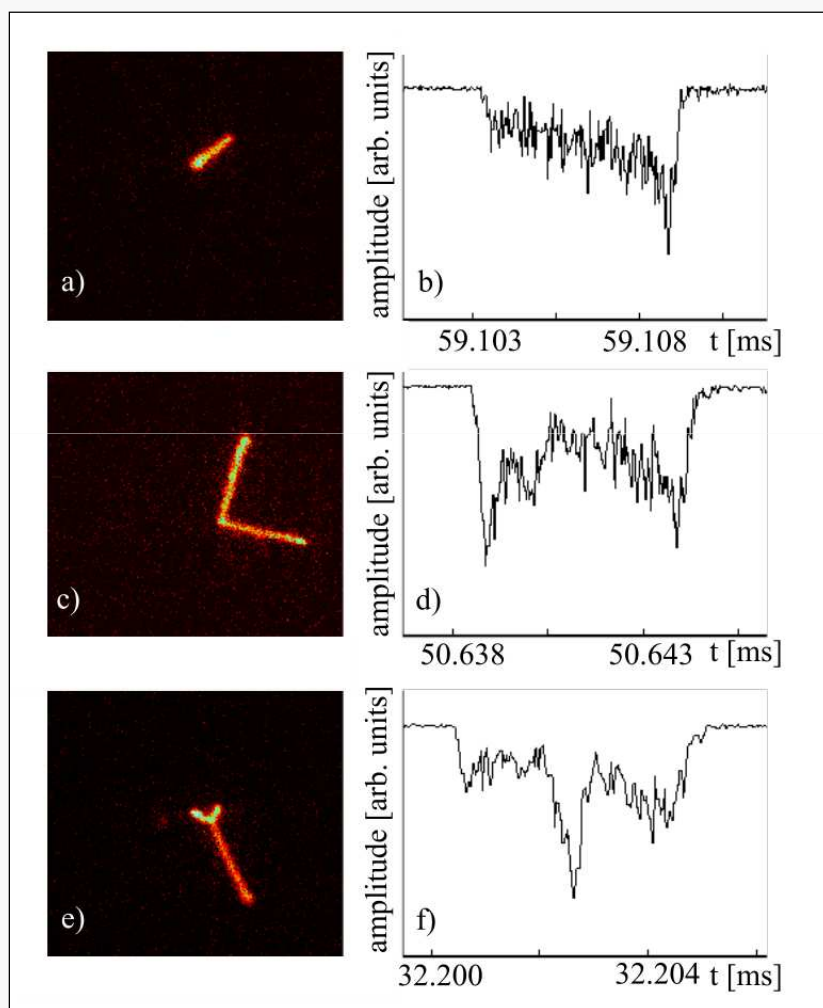


- Selekcja zdarzeń: w pierwszej klatce tylko dobrze zatrzymany jon  $^{31}\text{Ar}$

} 21 000 „filmików”,  
wszystkie przejrane indywidualnie  
przez **Olę Lis (Ciemny)**



# $\beta 3p$ w $^{31}\text{Ar}$



Lis et al., PRC 91, 064309 (2015)

➤ 13 zdarzeń rozpadu  $\beta 3p$   $^{31}\text{Ar}$

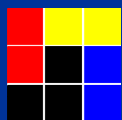
TABLE I. The total branching ratios for the observed decays of  $^{31}\text{Ar}$ . The given uncertainties are statistical.

Channel	Events	Branching [%]
$\beta 0p$	5984	22.6(3) <sup>a</sup>
$\beta 1p$	13157	68.3(3)
$\beta 2p$	1729	9.0(2)
$\beta 3p$	13	0.07(2)

Znane są tylko 3 przypadki przemiany  $\beta 3p$ :

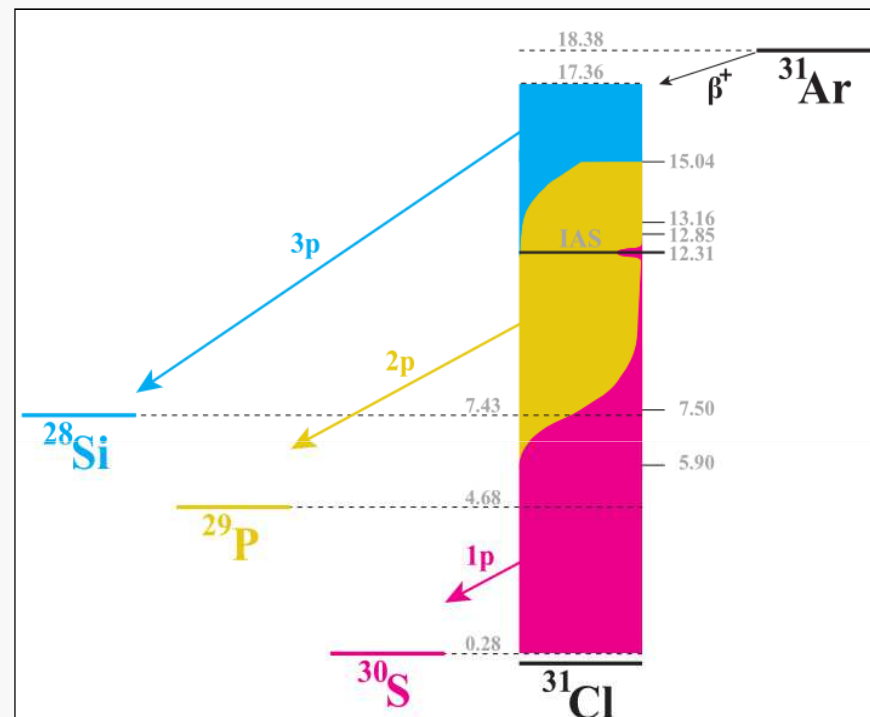
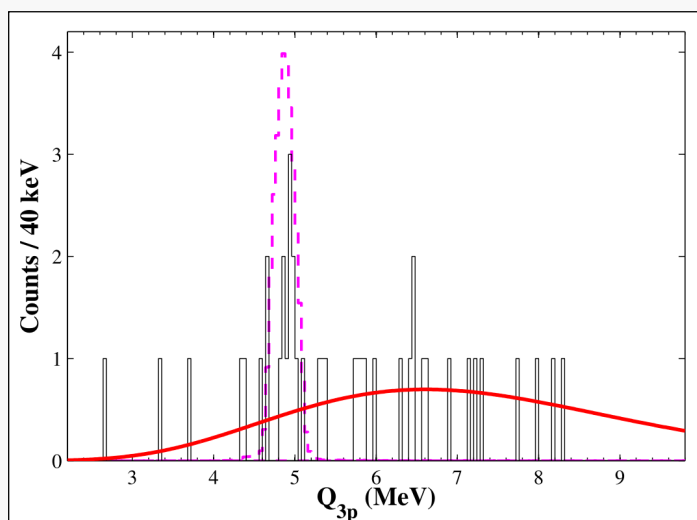
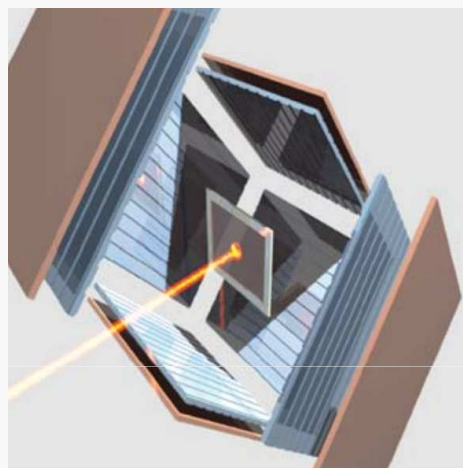
- $^{45}\text{Fe}$  (Miernik et al., PRC76, 2007)
- $^{43}\text{Cr}$  (Pomorski et al., PRC83, 2011)
- $^{31}\text{Ar}$  (Lis et al., PRC, 2015)

Wszystkie odkryte przy pomocy OTPC!



# Potwierdzenie $\beta 3p$ w $^{31}\text{Ar}$

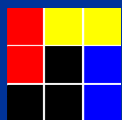
- Kanał  $\beta 3p$  w  $^{31}\text{Ar}$  potwierdzony w ISOLDE przy użyciu Si Cube



Koldste et al., PRC 89 (2014) 064315

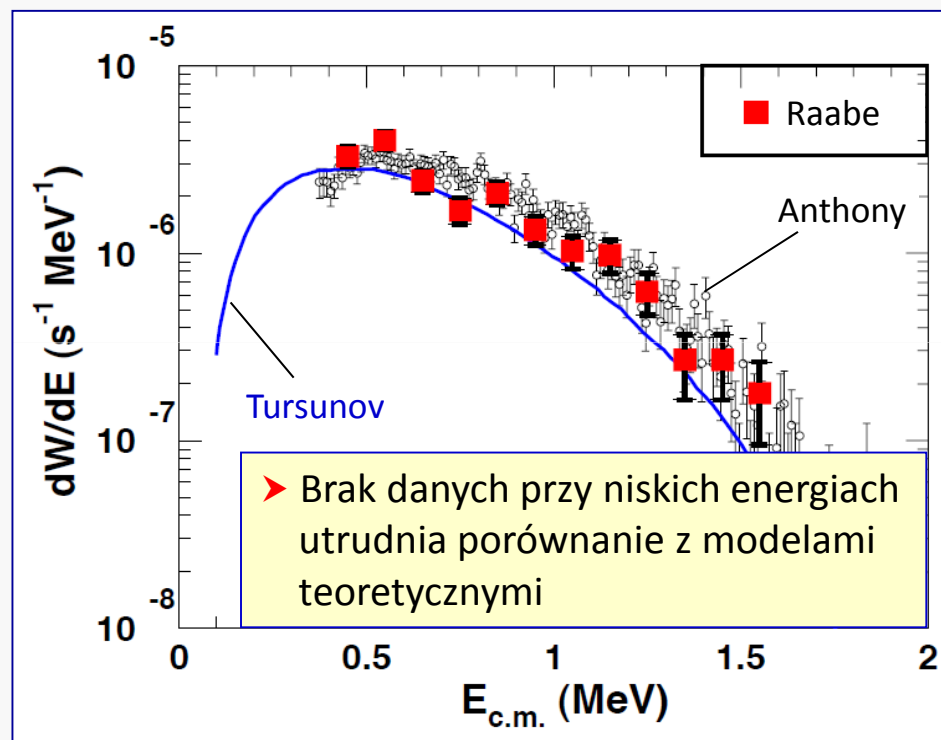
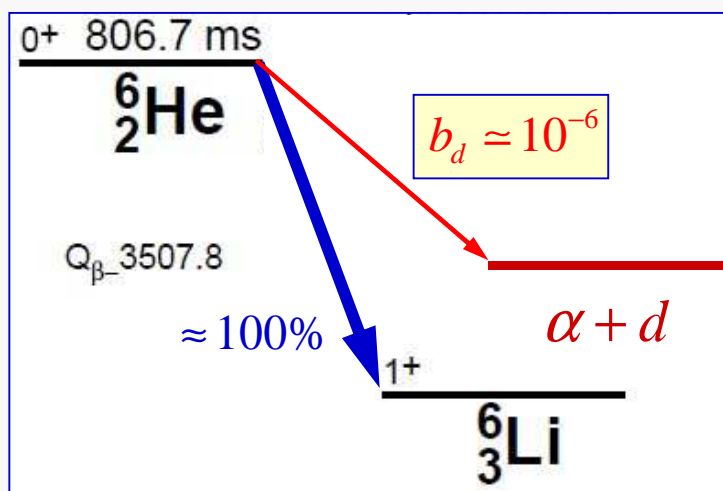
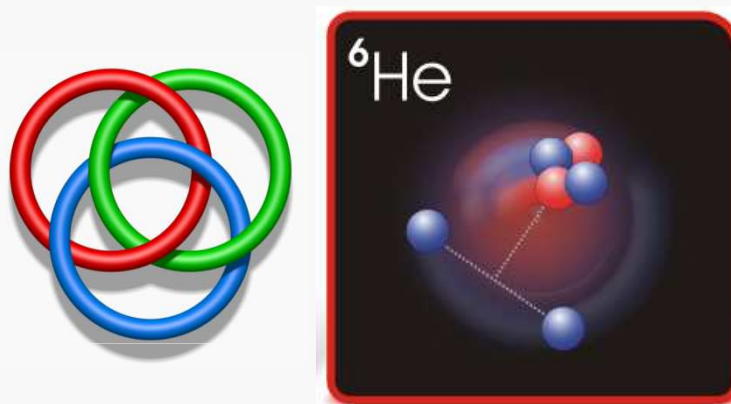
- ➔ Oszacowany branching  $\beta 3p$ : 0.08(4)%
- ➔ Przemiana  $\beta 3p$  odpowiedzialna za 30% całkowitego nasilenia Gamowa-Tellera w  $^{31}\text{Ar}$ !





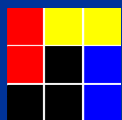
# Badanie halo $2n$ w ${}^6\text{He}$

➤  ${}^6\text{He}$  z bardzo małym prawdopodobieństwem rozpada się na  $\alpha + d$



➤ Z powodu silnego tła elektronów  $\beta$  pomiar widma poniżej  $E_{\text{CM}} \cong 400 \text{ keV}$  był niemożliwy

R. Raabe et al., Phys. Rev. C80 (2009) 054307



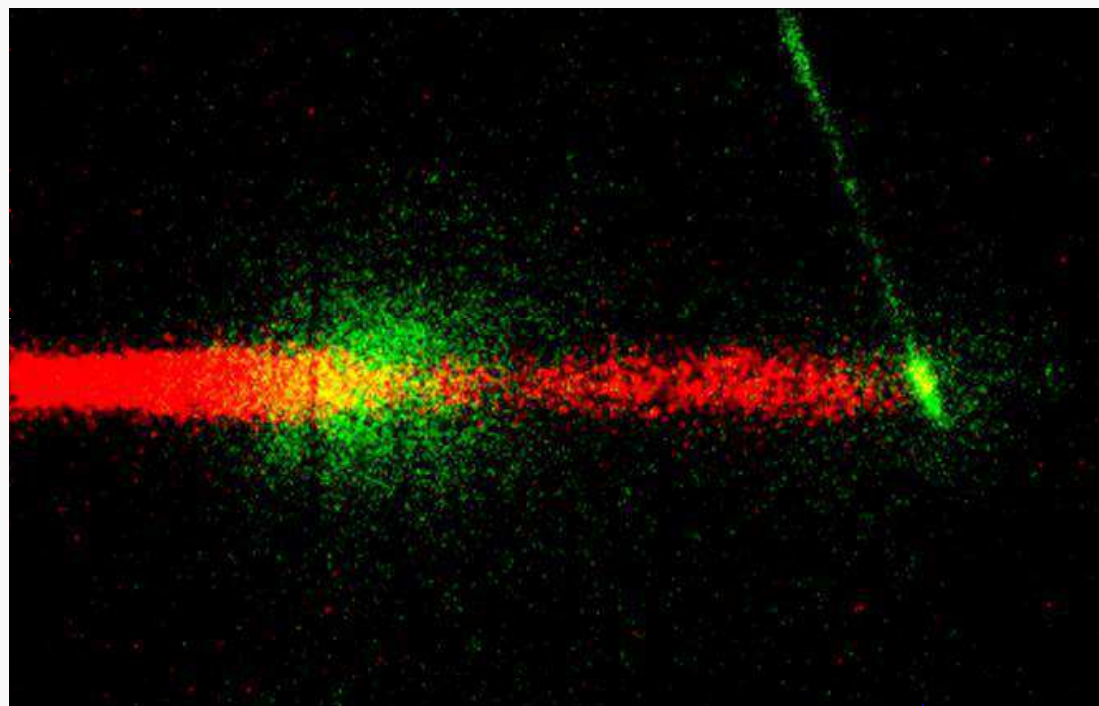
# ${}^6\text{He}$ w OTPC

➤ Eksperyment w CERN-ISOLDE, sierpień 2012

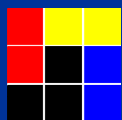
Paczka zawierająca ok.  $10^4$  jonów  ${}^6\text{He}$ , przyspieszonych do 3 MeV/u przez REX-ISOLDE, jest zatrzymywana w OTPC (czerwone)



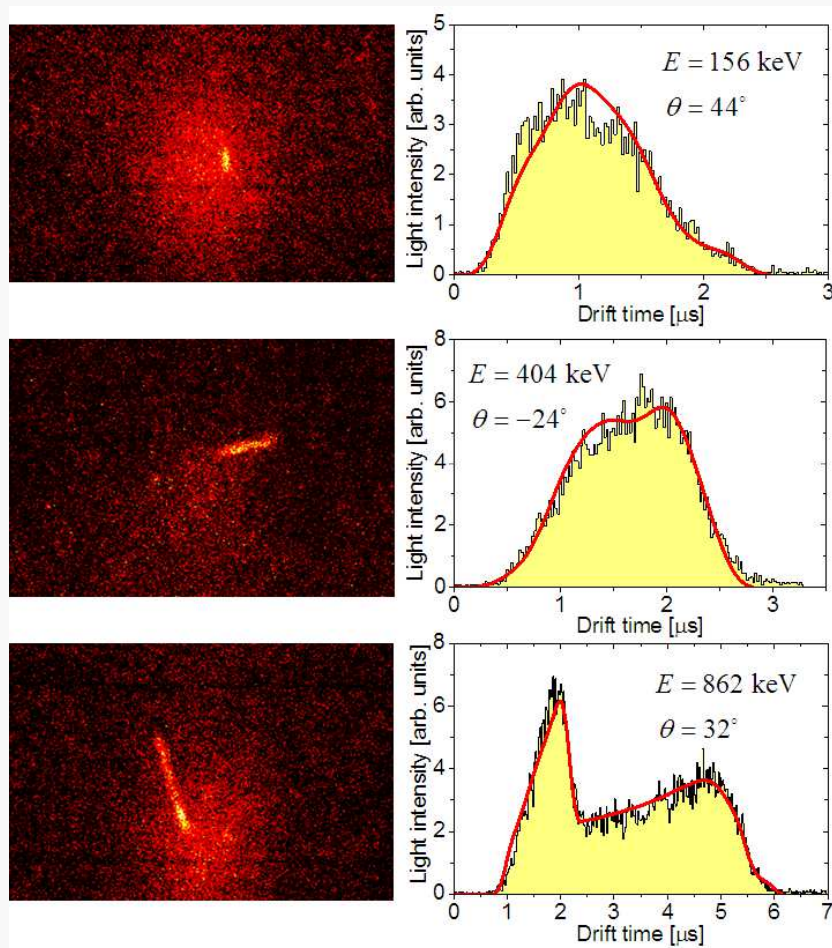
Po implantacji rozpoczynamy ekspozycję 650 ms w oczekiwaniu na rozpady. Światło od wielu elektronów widoczne jest jako rozmaszana chmura. Widać też jeden rozpad  ${}^6\text{He} \rightarrow \alpha + d$  (zielone)



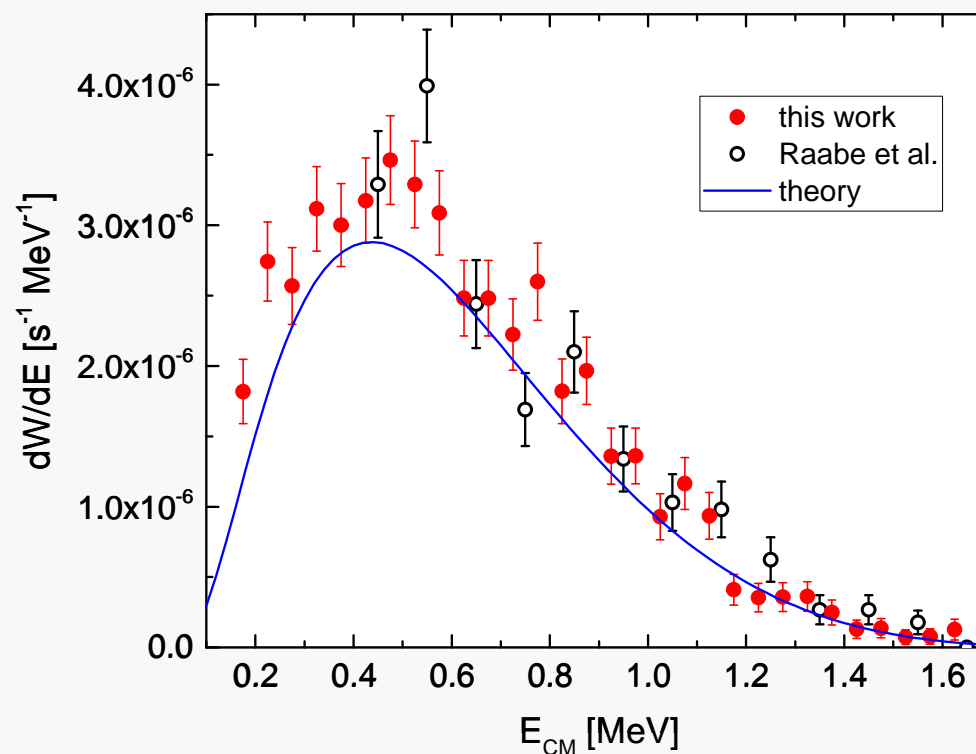
Różnica w głębokości implantacji odpowiada stracie energii  ${}^6\text{He}$  w pasku 5  $\mu\text{m}$  Cu + 2  $\mu\text{m}$  Au na oknie wejściowym



# Widmo $\alpha + d$



Udało się zrekonstruować 1650 zdarzeń

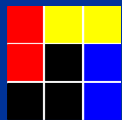


Raabe et al., PRC 80 (09) 054307

theory: Tursunov, Baye, Descouvemont, PRC73 (06) 014303

→ 70% całkowitej intensywności w ujawnionej po raz pierwszy niskoenergetycznej części widma

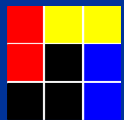
M.P. et al., PRC92 (2015) 014316



# Podsumowanie

- Detektor OTPC zbudowaliśmy z myślą o badaniu promieniotwórczości  $2p$  (korelacje  $p-p$ ).
- Zabadzaliśmy dokładnie emisję  $2p$   $^{45}\text{Fe}$  i odkryliśmy trzyciałowy charakter tej przemiany. Odkryliśmy emisję  $2p$  w  $^{48}\text{Ni}$ . Planujemy badanie korelacji  $p-p$  w  $^{54}\text{Zn}$ .
- OTPC okazał się doskonałym instrumentem do badania innych rzadkich procesów z emisją cząstek naładowanych. Jego energetyczna zdolność rozdzielcza jest gorsza niż detektorów Si, ale pozwala mierzyć współczynniki rozgałęzienia z większą dokładnością i nie jest czuły na tło elektronów  $\beta$ .
- Po raz pierwszy zaobserwowaliśmy nowe kanały rozpadu, jak  $\beta 3p$  ( $^{45}\text{Fe}$ ,  $^{43}\text{Cr}$ ,  $^{31}\text{Ar}$ ), czy  $\beta 2p$  w  $^{46}\text{Fe}$  (obserwacja jednego zdarzenia!).
- Zmierzyliśmy widmo deuteronów opóźnionych z  $^6\text{He}$ .
- Uzyskaliśmy nowe informacje o rozpadzie  $\beta$   $^8\text{He}$  (doktorat S. Mianowskiego na ukończeniu).
- Uzyskaliśmy pierwsze informacje o rozpadzie  $\beta$   $^{60}\text{Ge}$  (A. Ciemny w trakcie analizy).





Dziękuję!

