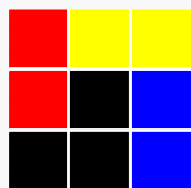
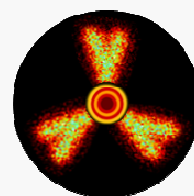
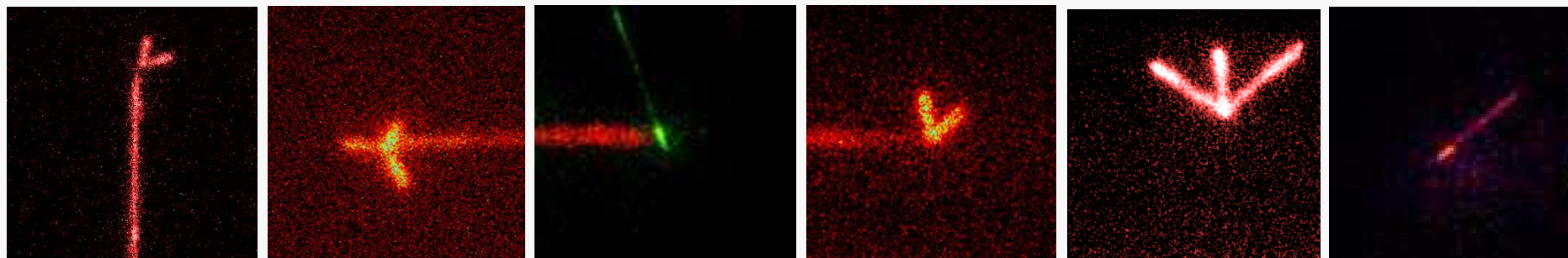


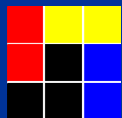
Egzotyczne przemiany jądrowe na fotografiach z OTPC

Marek Pfützner

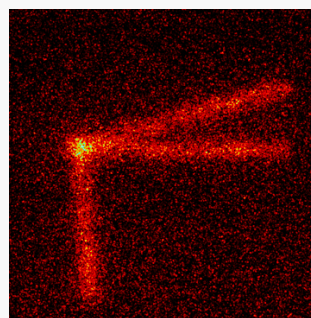
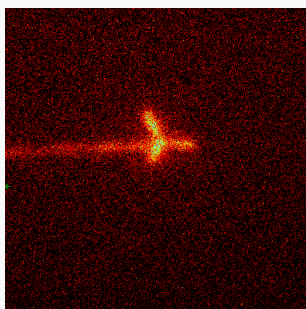
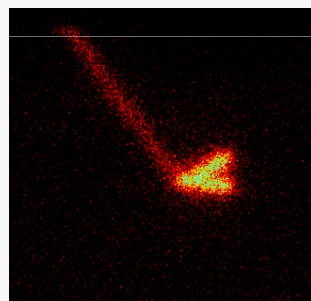
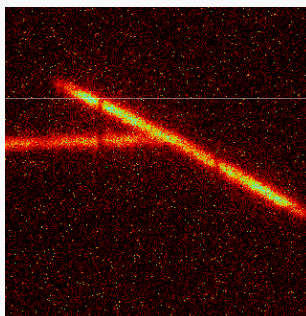
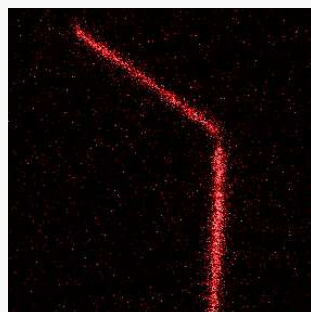
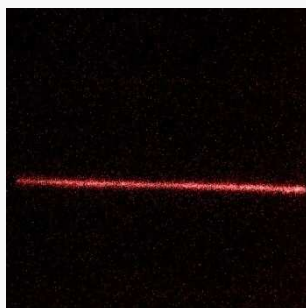


ZAKŁAD FIZYKI JĄDROWEJ
UNIwersYTET WARSZAWSKI

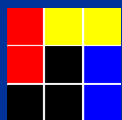




Plan

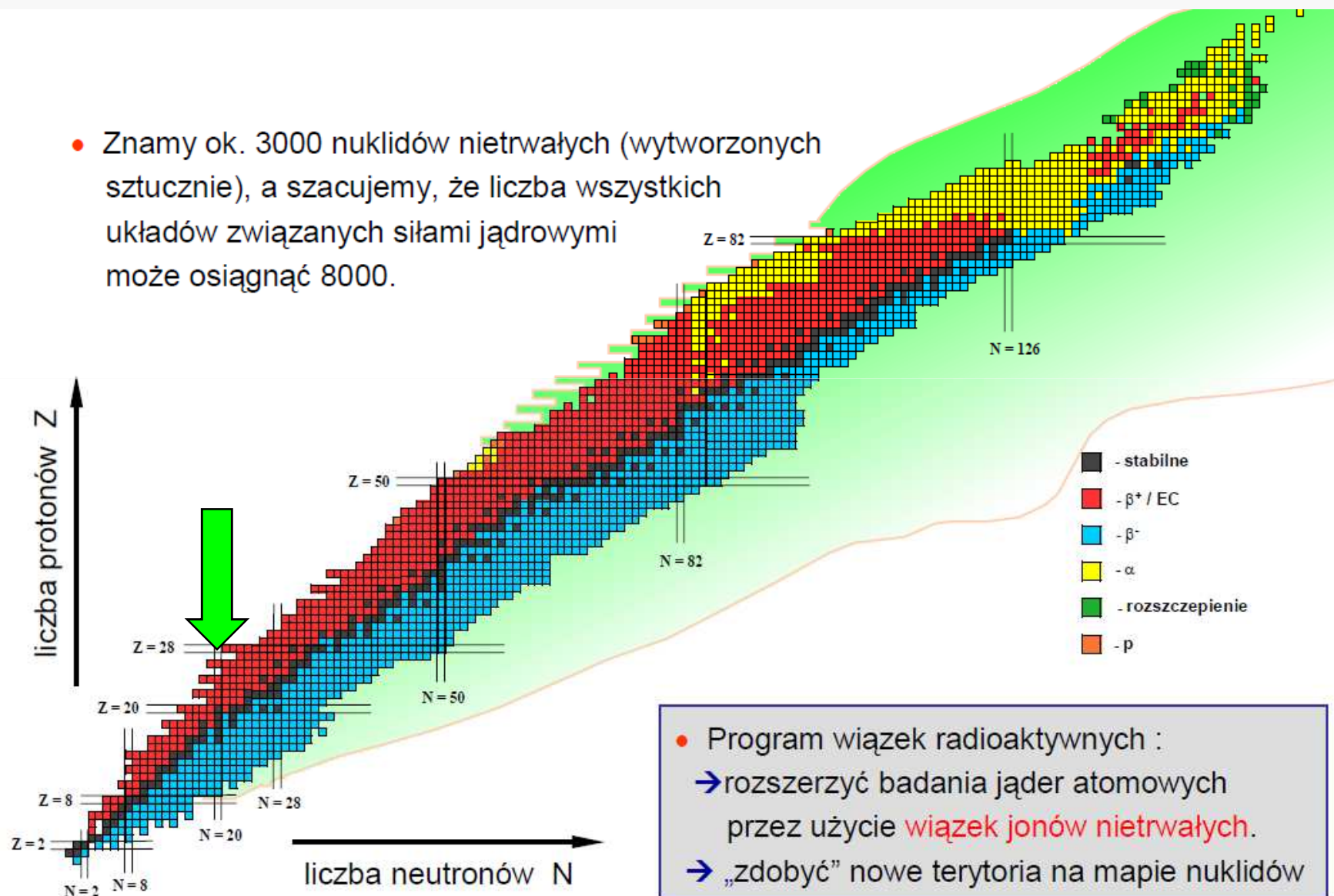


- Wstęp – trochę o metodzie
- Odkrycie $2p$
- Detektor OTPC
- Badanie ^{45}Fe i ^{48}Ni
- Protony opóźnione: odkrycie $\beta 3p$
- Rozpad ^6He na α i d
- Podsumowanie

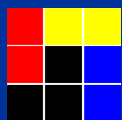


Nuklidy nietrwałe

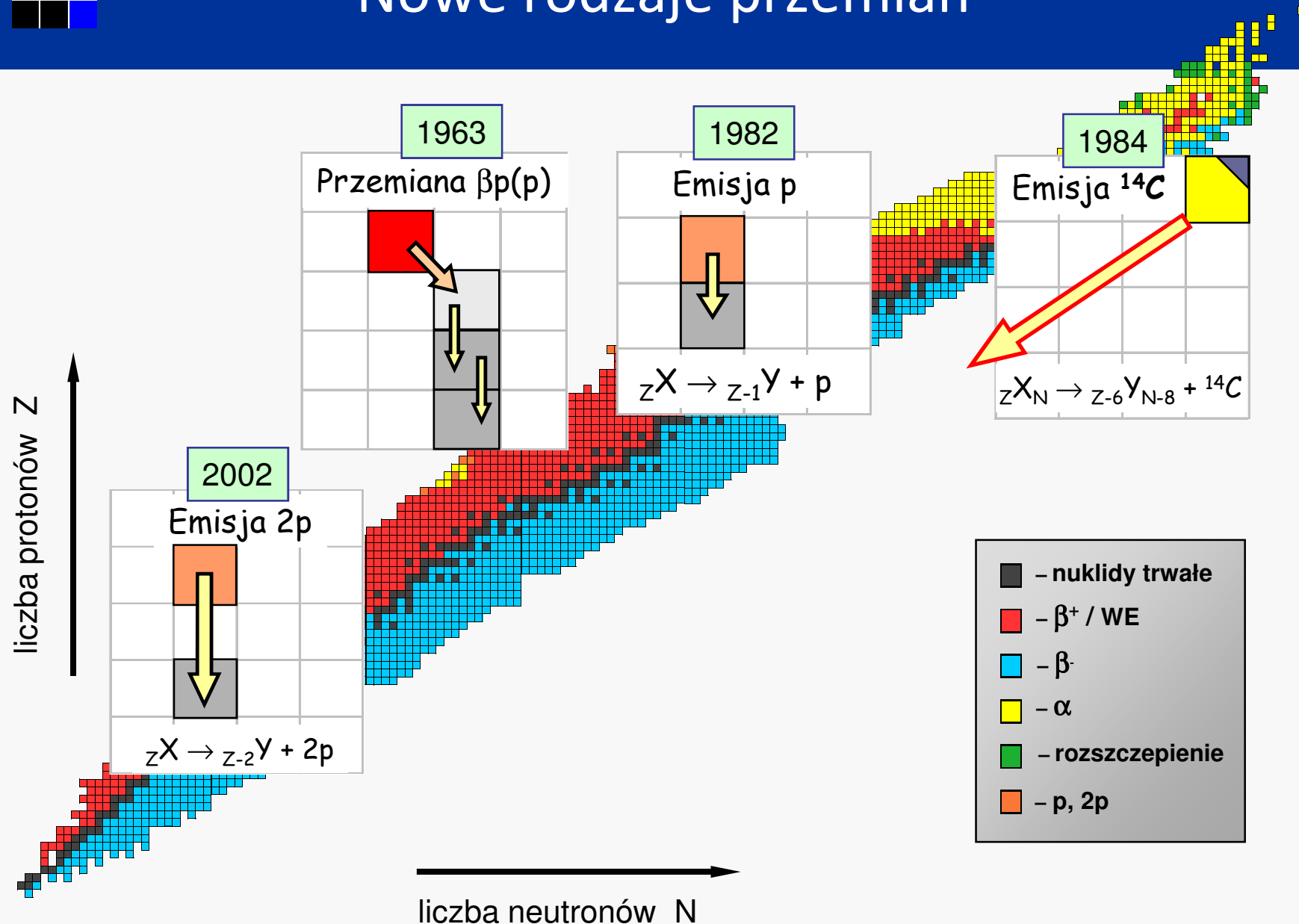
- Znamy ok. 3000 nuklidów nietrwałych (wytworzonych sztucznie), a szacujemy, że liczba wszystkich układów związanych siłami jądrowymi może osiągnąć 8000.

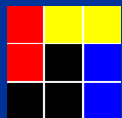


- Program wiązek radioaktywnych :
 - rozszerzyć badania jąder atomowych przez użycie **wiązek jonów nietrwałych**.
 - „zdobyć” nowe terytoria na mapie nuklidów

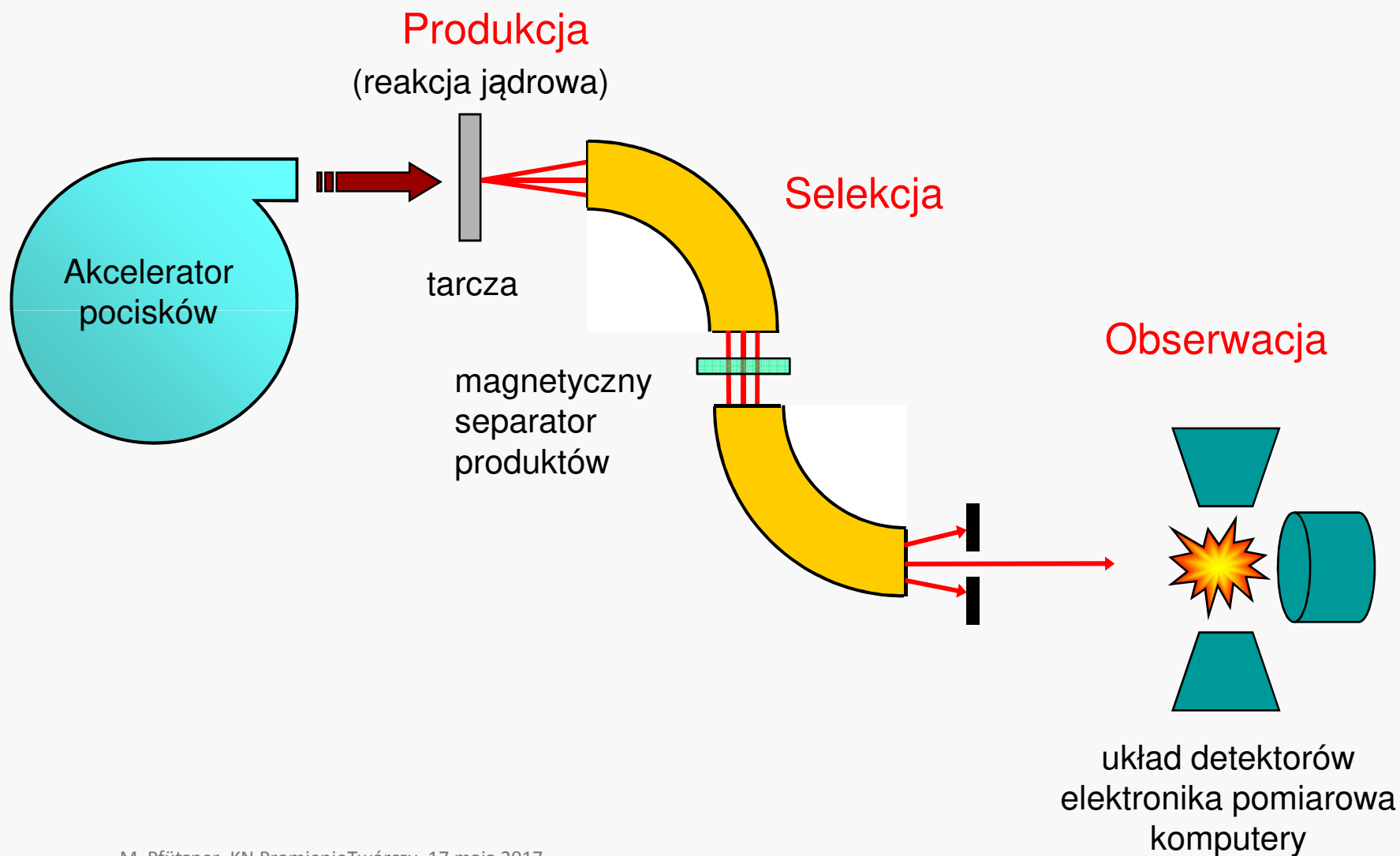


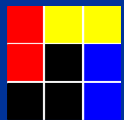
Nowe rodzaje przemian



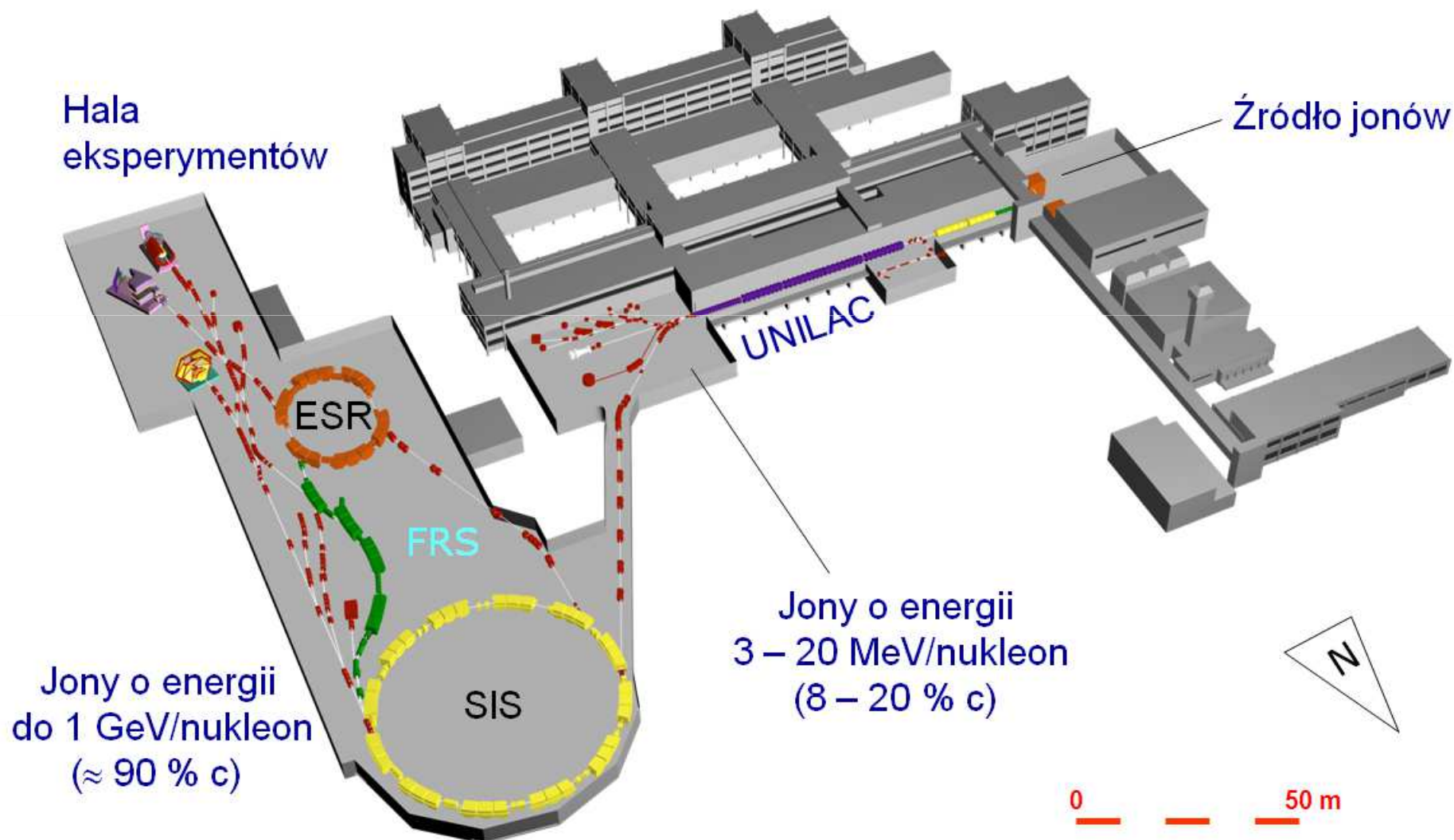


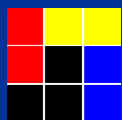
Schemat eksperymentu



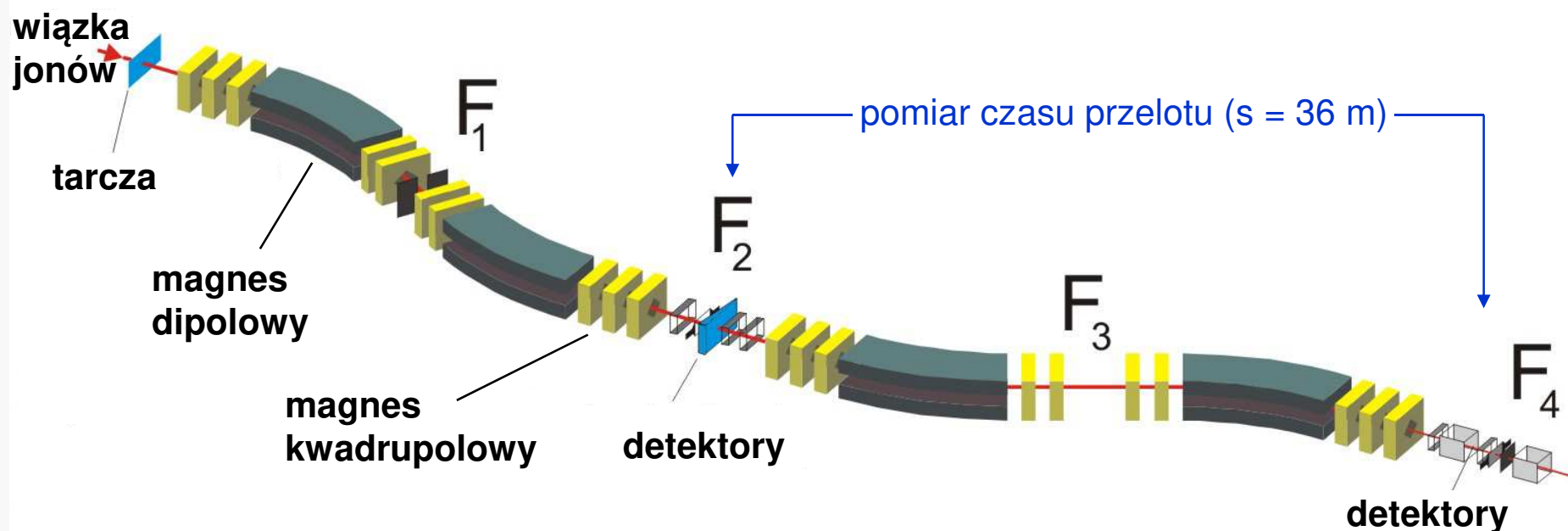


Przykład: GSI Darmstadt

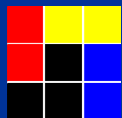




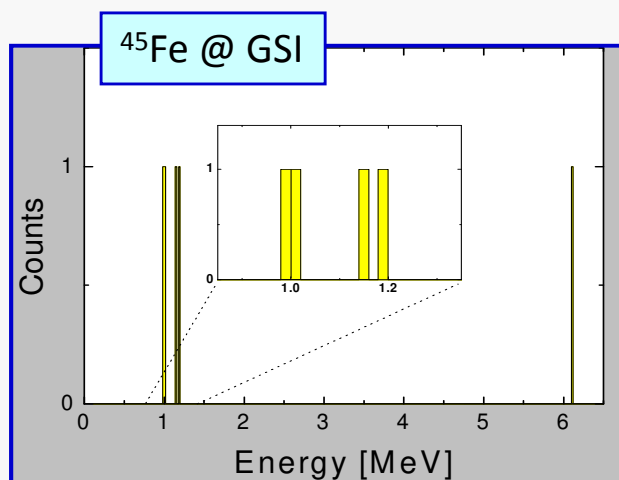
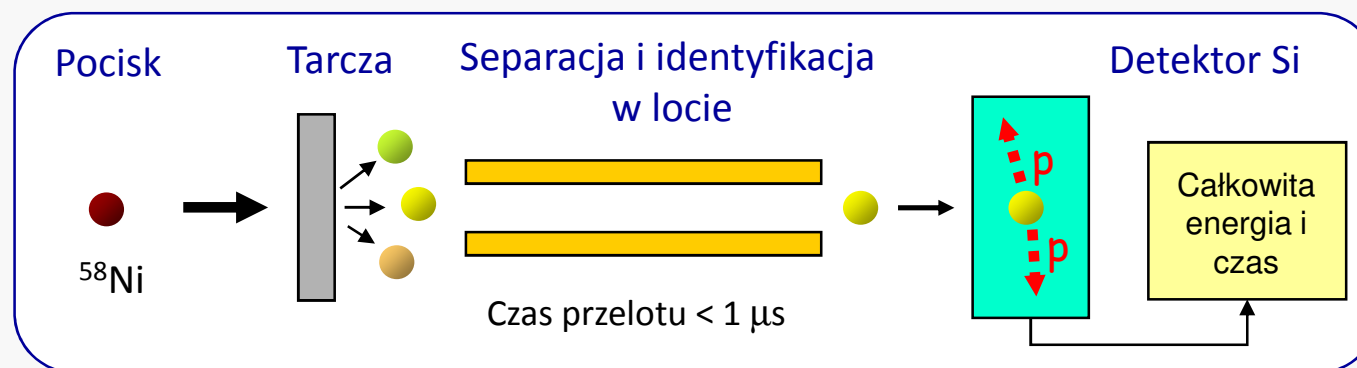
FRS : separator fragmentów w GSI



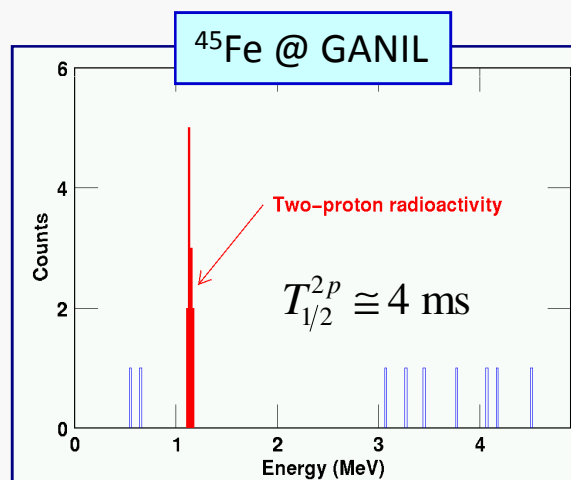
Czas przelotu jonu $\rightarrow v$
Tor lotu + pole B $\rightarrow B\rho$ } $\rightarrow A/q \approx A/Z$
Strata energii ΔE w komorze jonizacyjnej $\rightarrow Z$



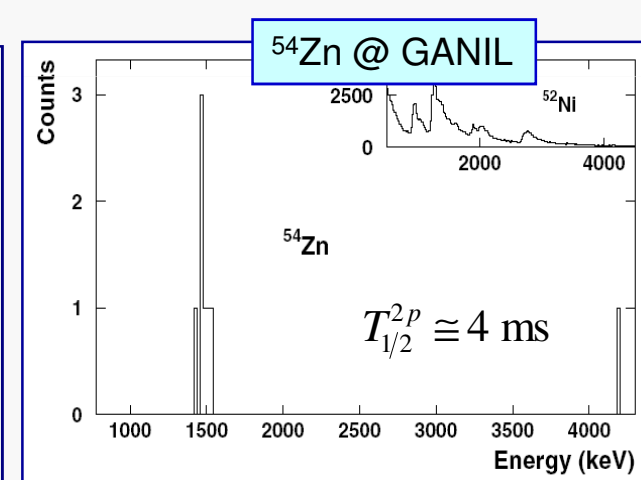
Emisja $2p$ – pierwsze świadectwa



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

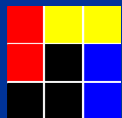


Giovinazzo et al., PRL 89 (02) 102501



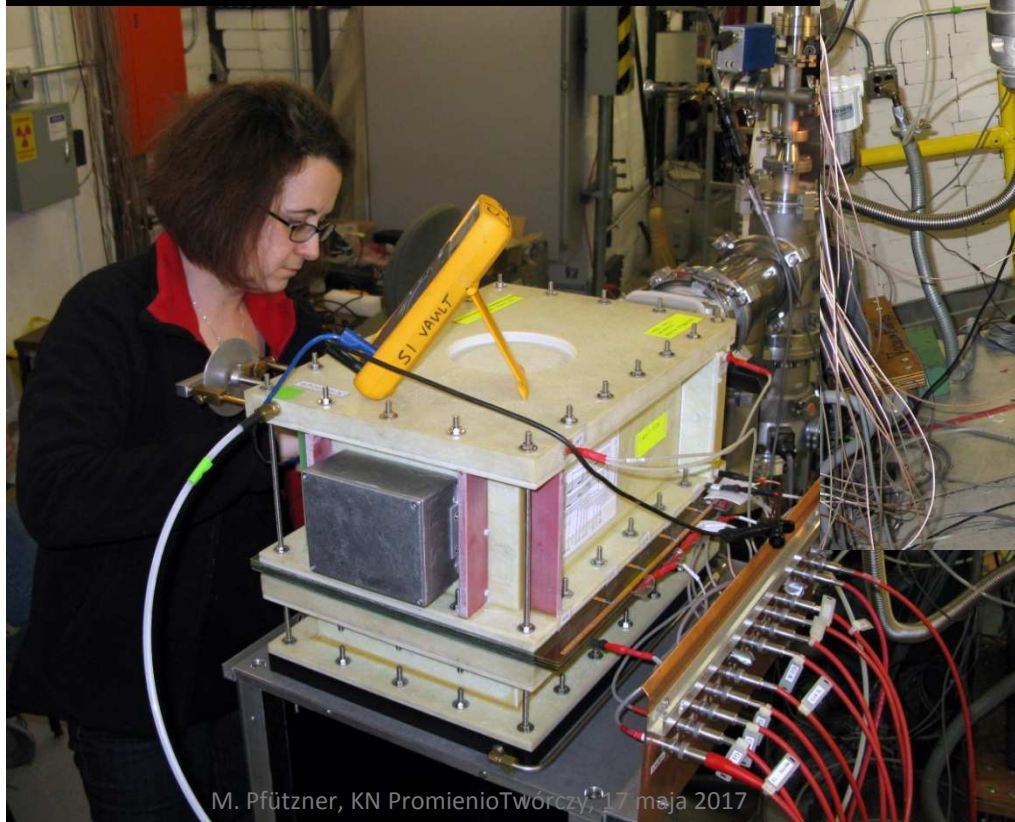
Blank et al., PRL 94 (05) 232501

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

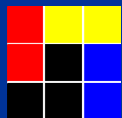


Nowy typ detektora

Nowatorski detektor zaprojektowany
i skonstruowany w IFD WF UW.
Rejestruje tory cząstek naładowanych
metodą fotografii cyfrowej

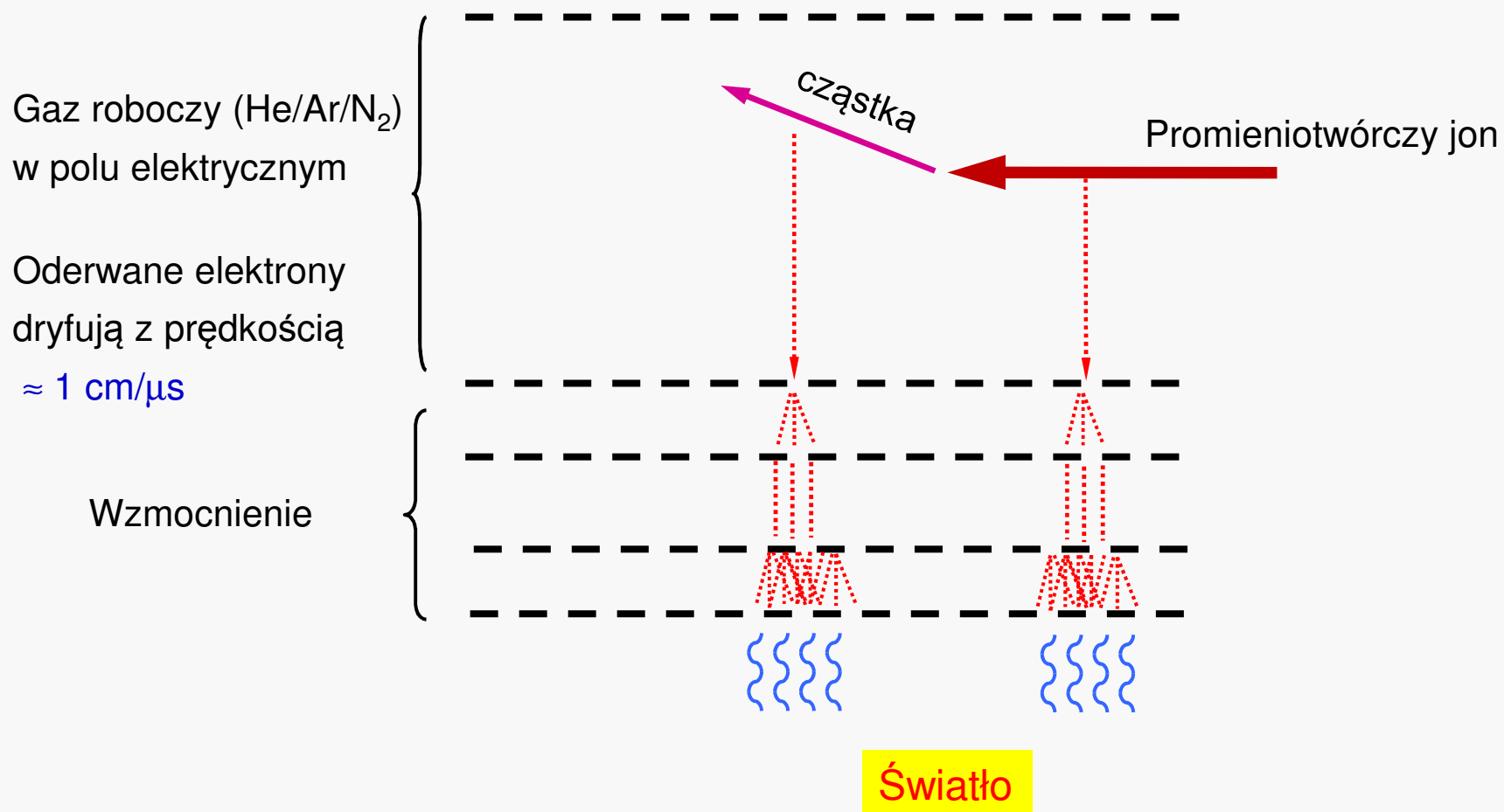


OTPC – Optical Time Projection Chamber



Zasada działania

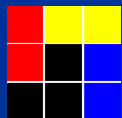
Komora jonizacyjna z projekcją czasu i z odczytem optycznym (OTPC)





- ## CCD Hamamatsu

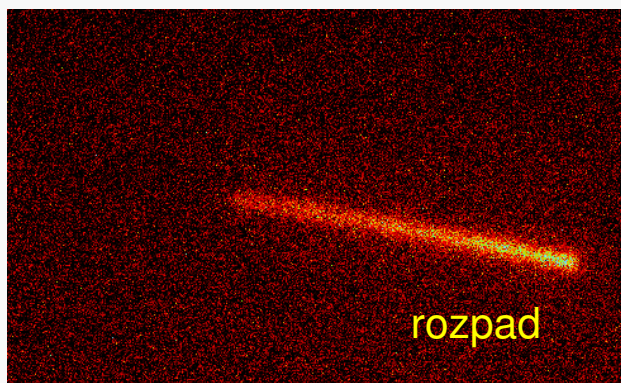
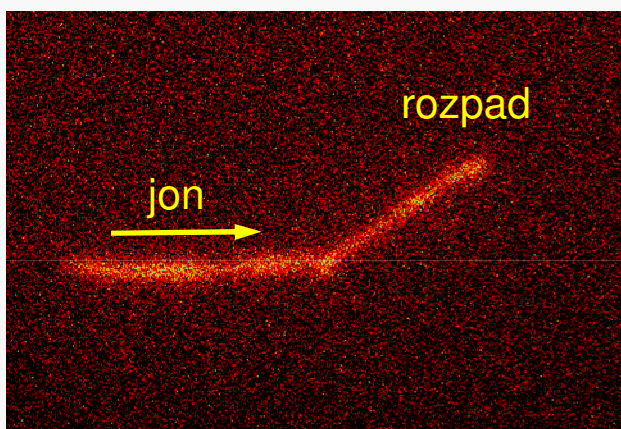
-
- The diagram illustrates the HI identification and selection system. It features several interconnected components:
- HI**: Input signal, represented by a green arrow pointing to the **OTPC**.
 - OTPC**: On-Time Processing Card, a grey grid box.
 - HV**: High Voltage unit, an orange grid box.
 - PC**: Personal Computer, a grey grid box.
 - PM**: Photomultiplier, a light blue grid box.
 - Camera**: A light blue box with a camera icon.
 - Frame Grabber**: A yellow grid box.
 - Digitizer**: A yellow grid box.
 - Trigger logic**: A light blue grid box.
 - LabView**: Software running on the PC, indicated by the text "LabView" above the PC box.
 - PXI**: Peripheral Component Interconnect, indicated by the text "PXI" above the connection between the Frame Grabber and the PC.
 - 100 MHz**: Frequency specification, indicated by the text "100 MHz" below the Digitizer box.
- The connections are as follows:
- The **HI** signal is input to the **OTPC**.
 - The **OTPC** is connected to the **HV** unit.
 - The **HV** unit is connected to the **PC**.
 - The **PM** is connected to the **Digitizer**.
 - The **Camera** is connected to the **Frame Grabber**.
 - The **Frame Grabber** is connected to the **PC** via a **PXI** interface.
 - The **Digitizer** is connected to the **PC**.
 - The **Trigger logic** receives inputs from **TOF** and $\Delta E.$
 - The **Trigger logic** outputs a **trigger** signal to the **PC**.
 - The **PC** is connected to the **OTPC** via a red line, likely representing a feedback or control signal.



Co rejestrujemy?

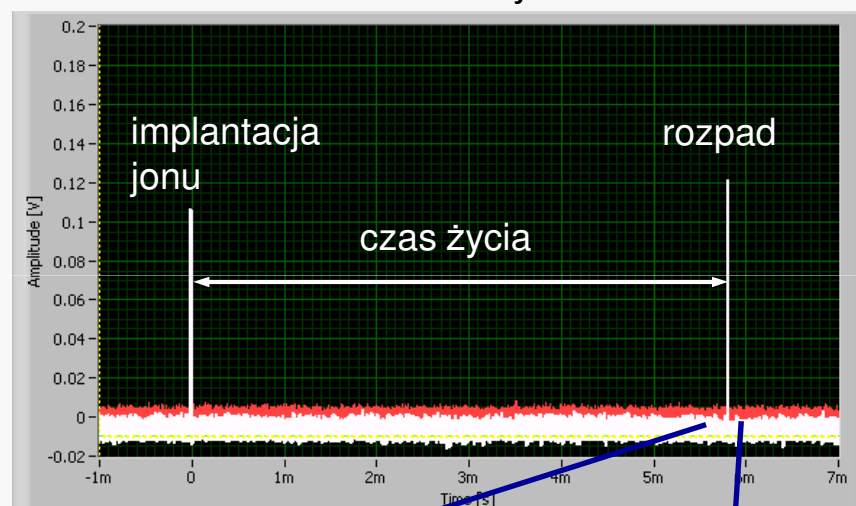
obraz CCD

tory jonu i emitowanych cząstek

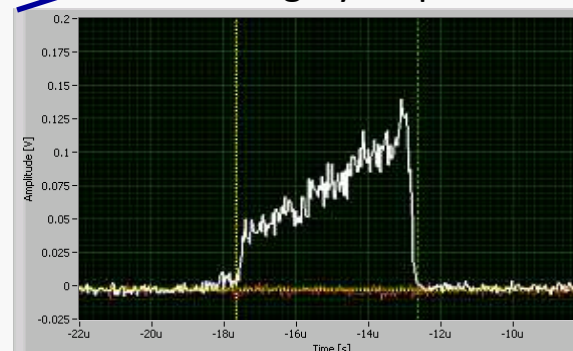


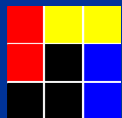
próbkowany sygnał z PMT

czasowa sekwencja zdarzeń

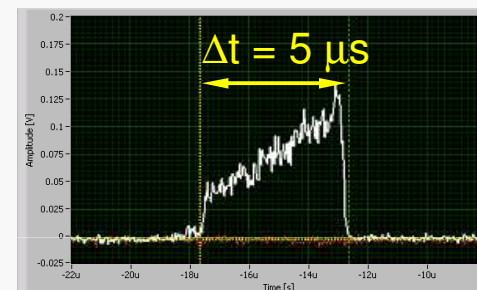
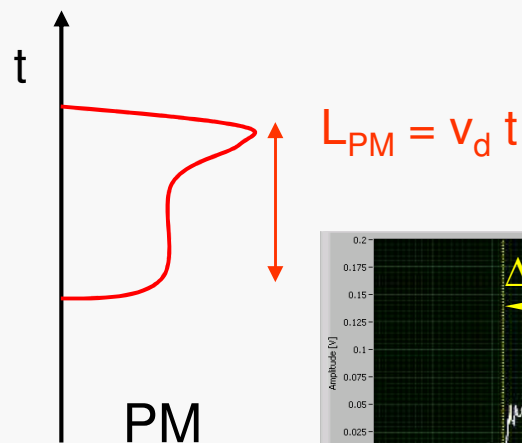
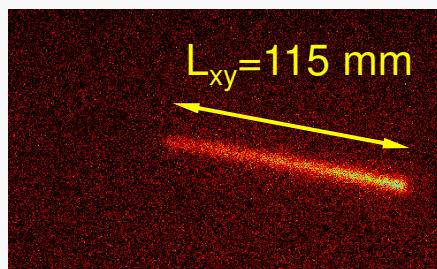
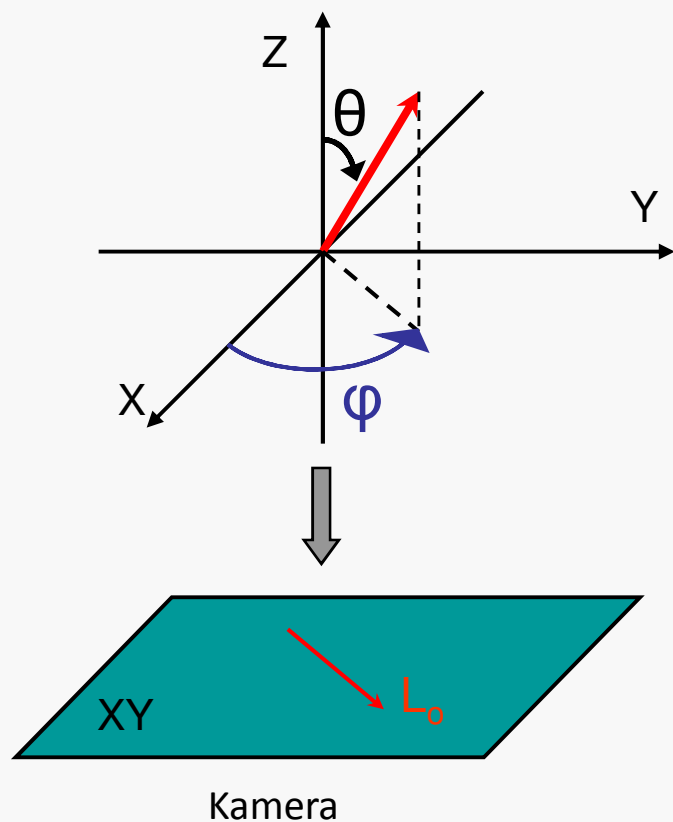


szczegóły rozpadu





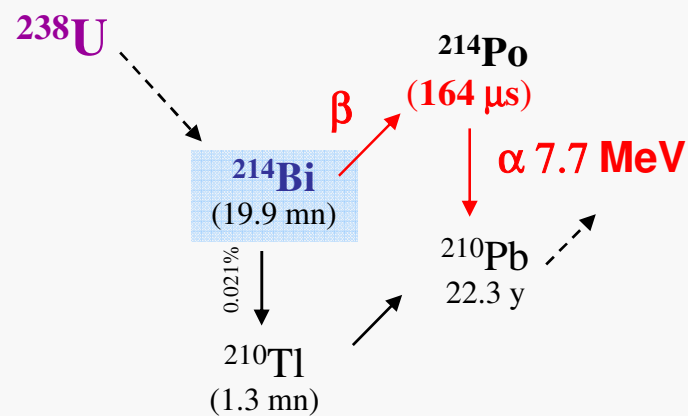
Zasada rekonstrukcji

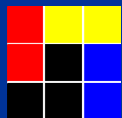


$$L = \sqrt{115^2 + (5 \cdot 10)^2} = 125 \text{ mm}$$

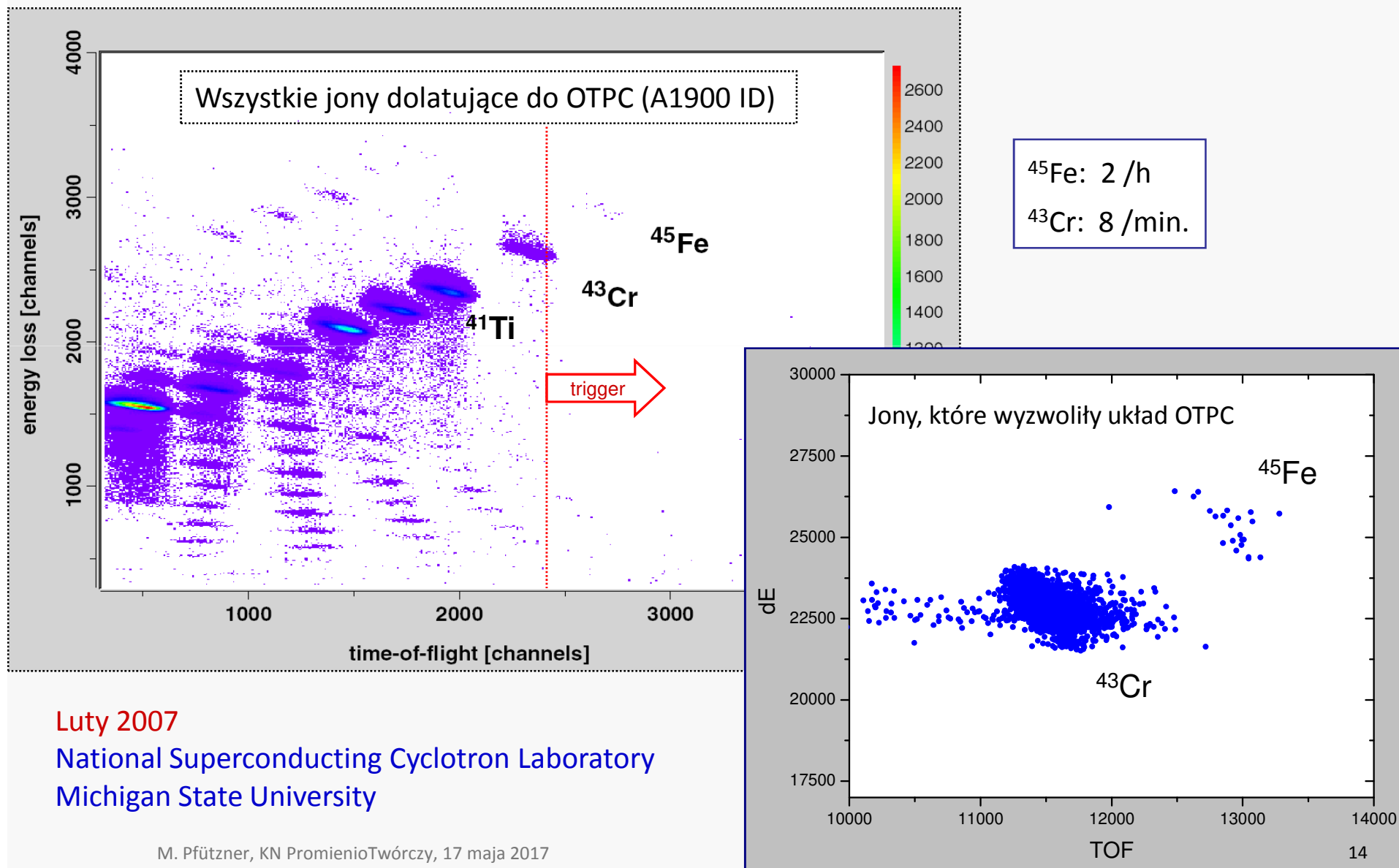
$$\Leftrightarrow E_{\alpha} = 7.8 \text{ MeV}$$

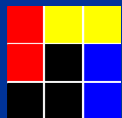
→ rozpad α ^{214}Po



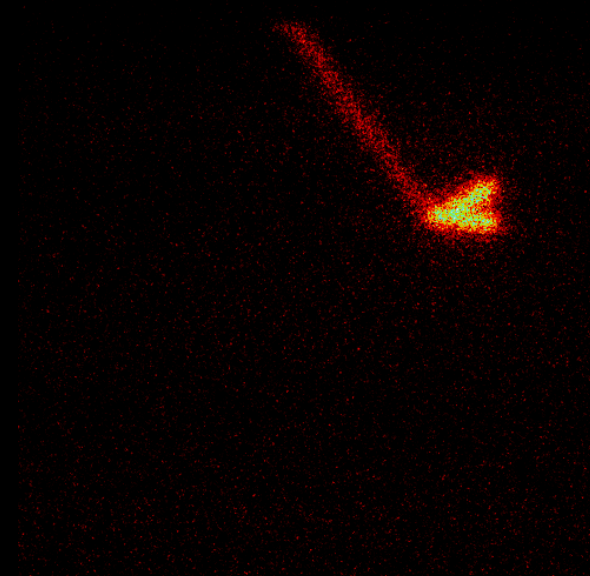
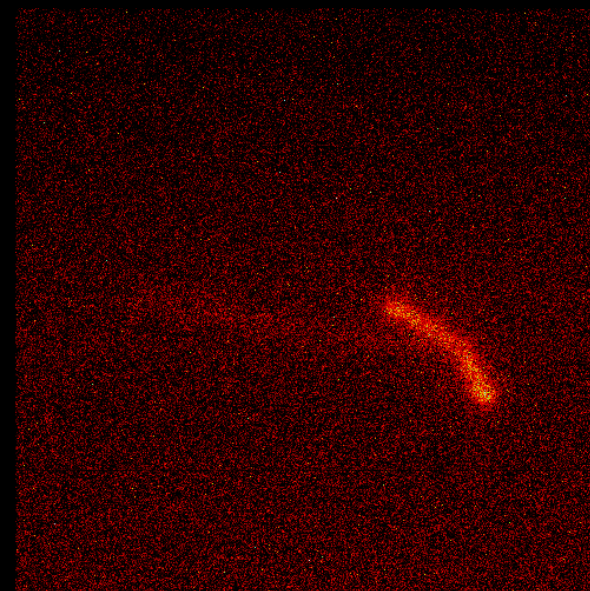
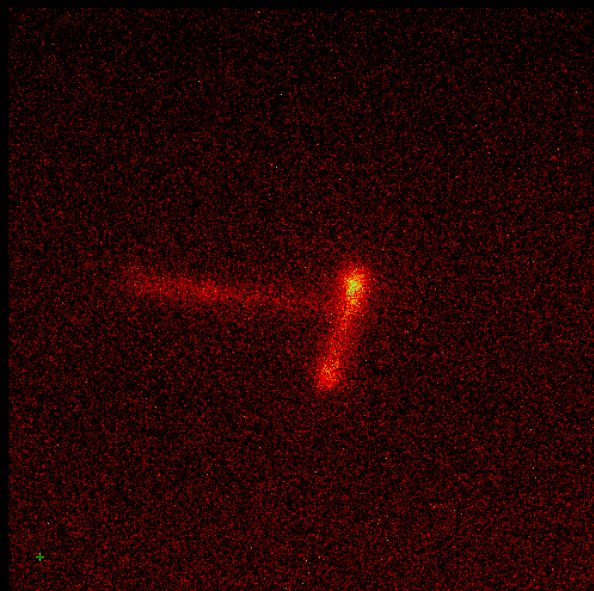
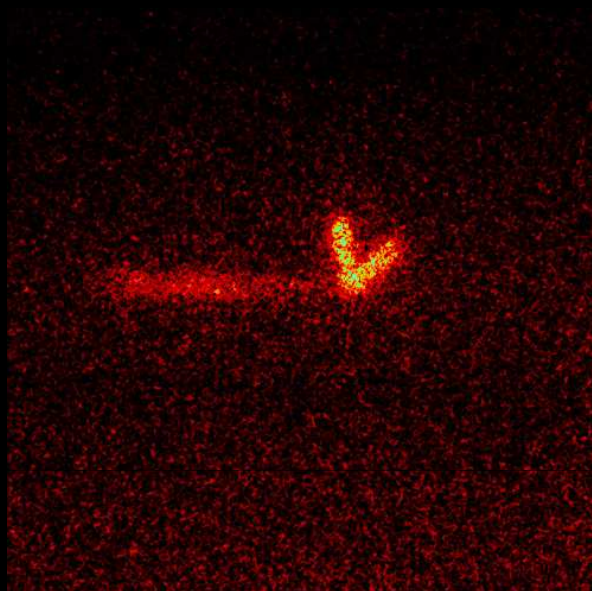


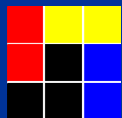
Badanie ^{45}Fe w NSCL/MSU



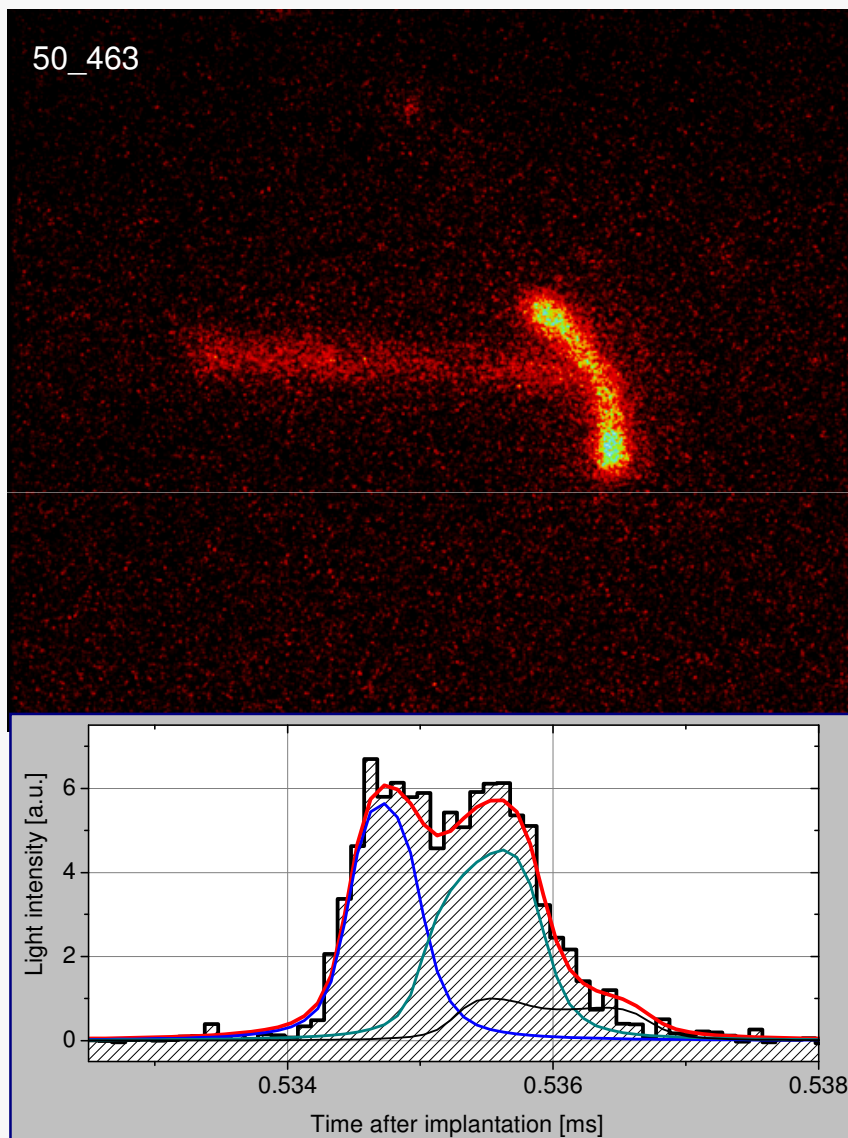


Zdarzenia emisji $2p$ z ^{45}Fe

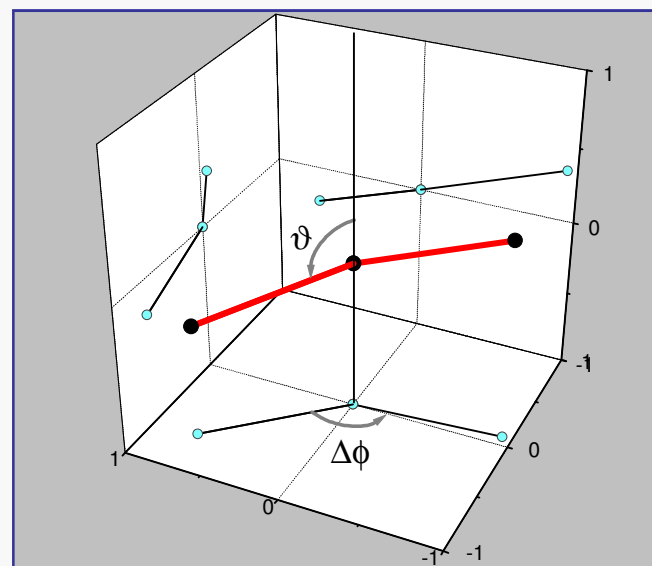




Rekonstrukcja w 3D



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

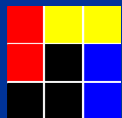


$$\vartheta_1 = (104 \pm 2)^\circ, \quad \vartheta_1 = (70 \pm 3)^\circ$$

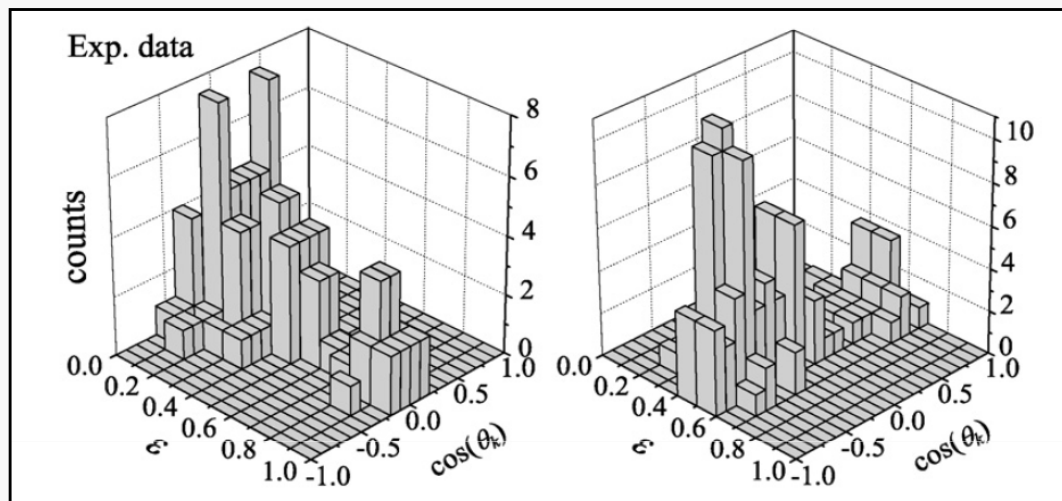
$$\Delta\phi = (142 \pm 3)^\circ \rightarrow \theta_{pp} = (143 \pm 5)^\circ$$

- Udało się to zrobić dla 75 zdarzeń

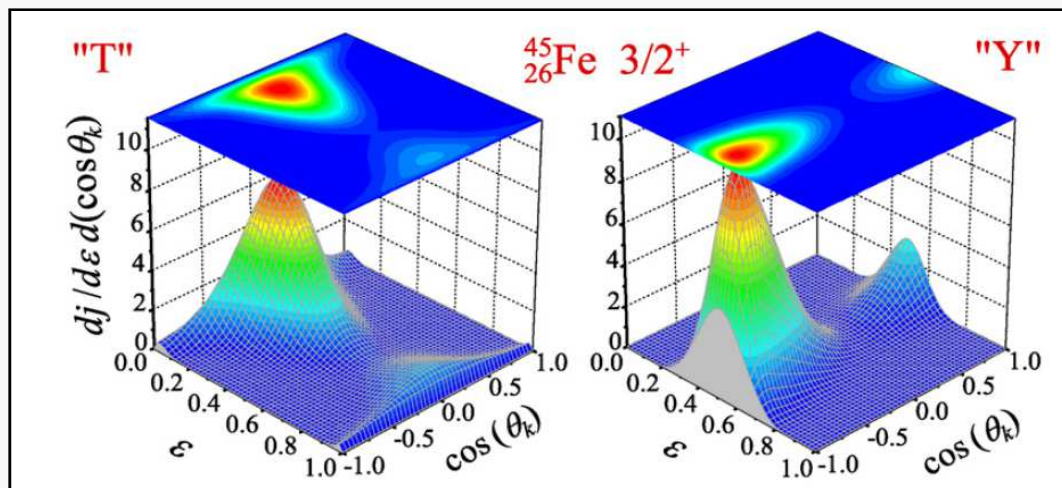
Miernik et al., PRL 99 (07) 192501



Korelacje między protonami z ^{45}Fe



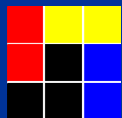
- Rozkład energii i kątów między protonami jest nietypowy i wskazuje na 3-ciałowy charakter emisji.



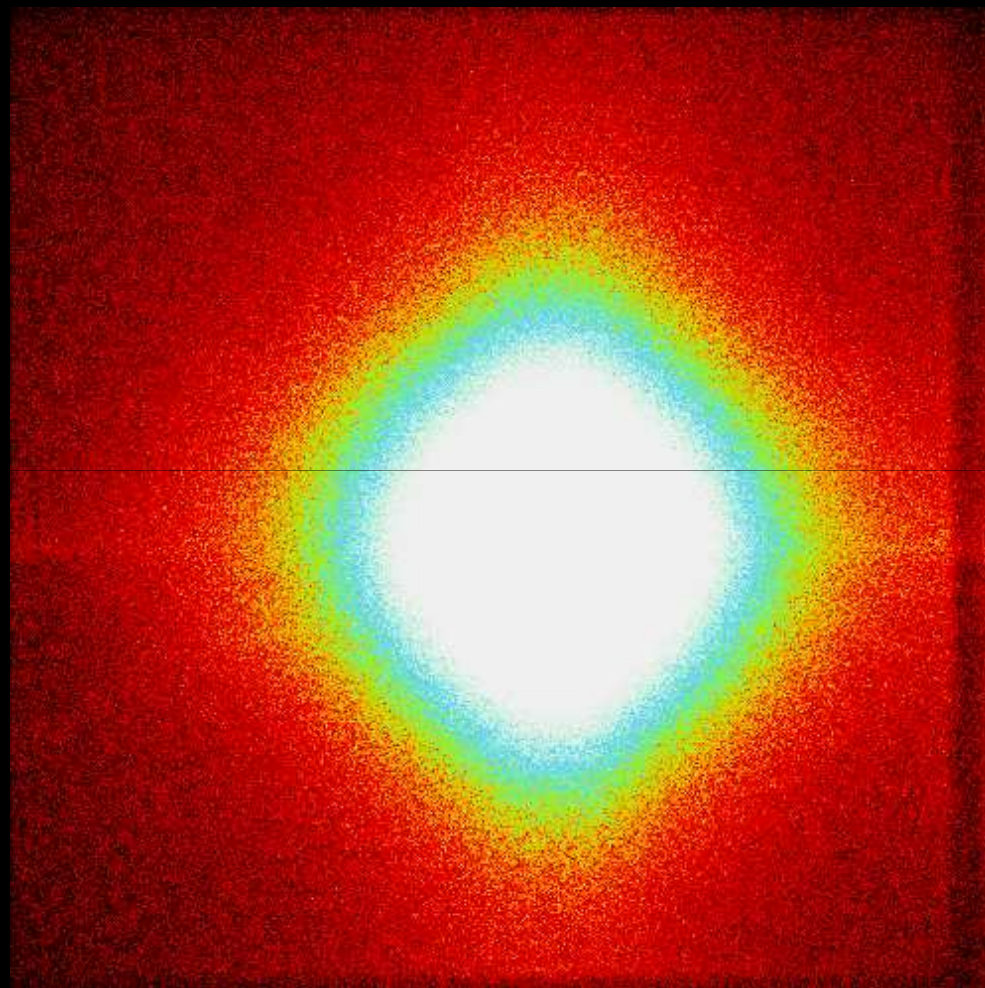
- Dobra zgodność z modelem teoretycznym opracowanym przez L. Grigorenko

Miernik *et al.*, PRL 99 (07) 192501 Grigorenko *et al.*, PLB 677 (2009) 30

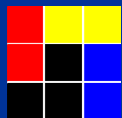
MP, Karny, Grigorenko, Riisager, RMP 84 (12) 567



Wyładowanie

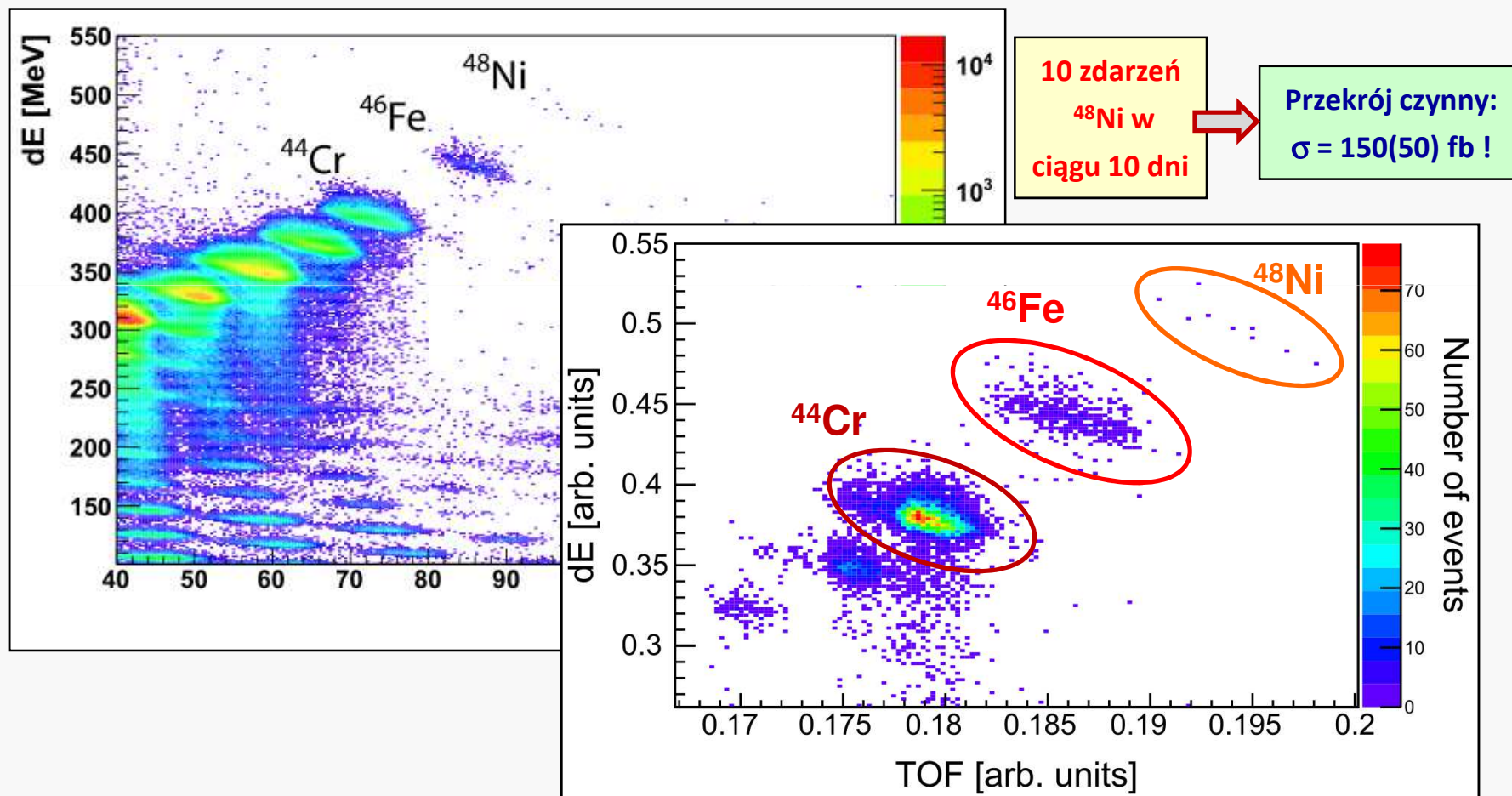


Rozbłyski bywają spektakularne ale są szkodliwe!



Badanie ^{48}Ni

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

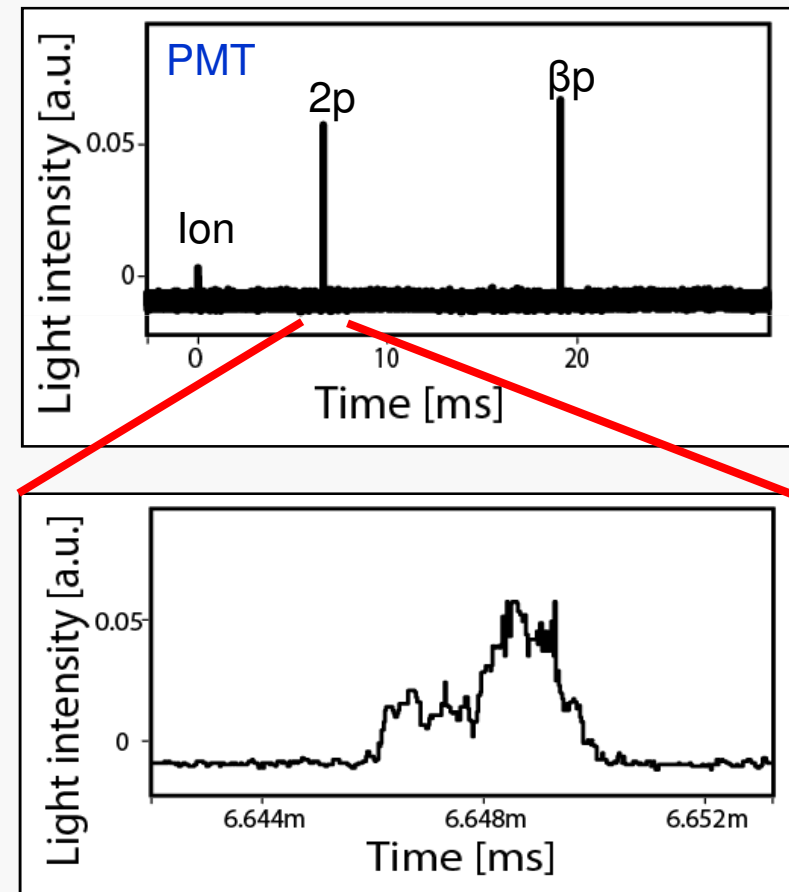
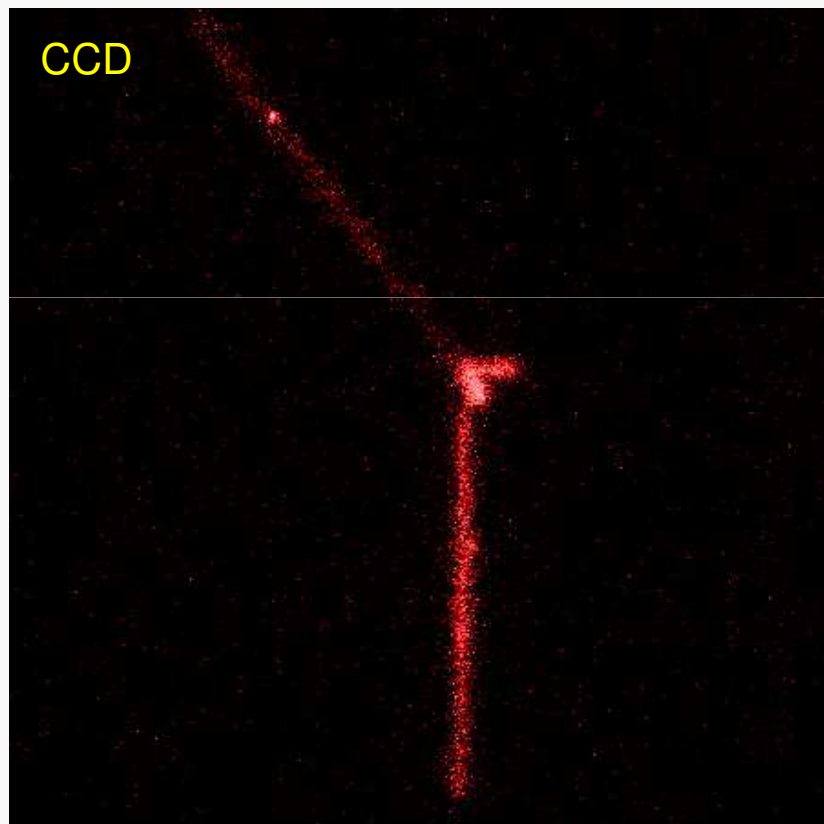


Pomorski et al., PRC 90 (14) 014311

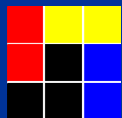


Promieniotwórczość $2p$ ^{48}Ni

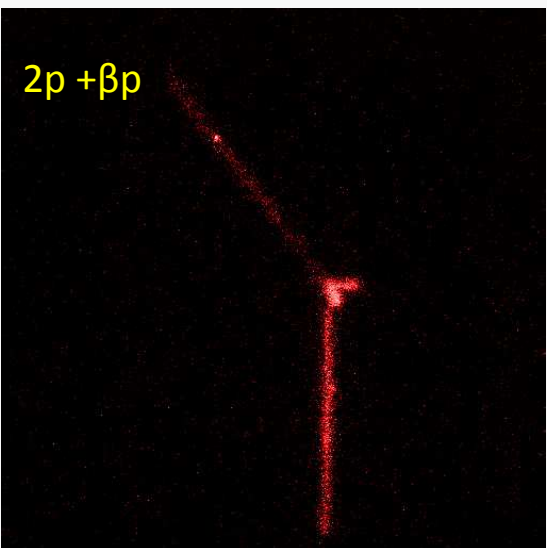
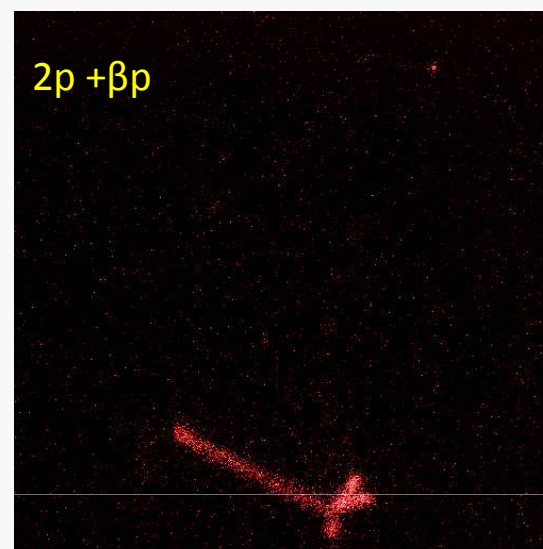
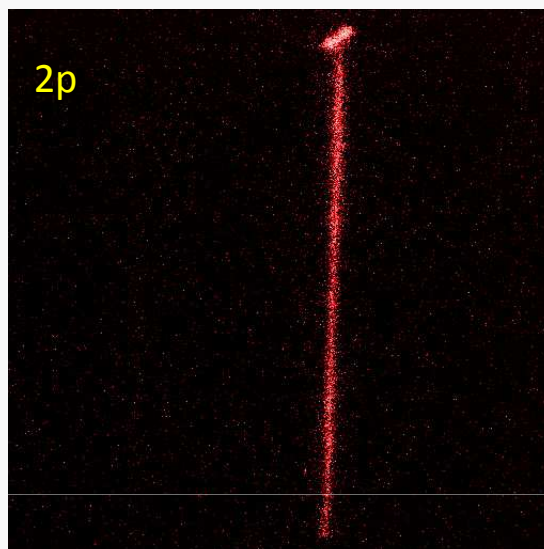
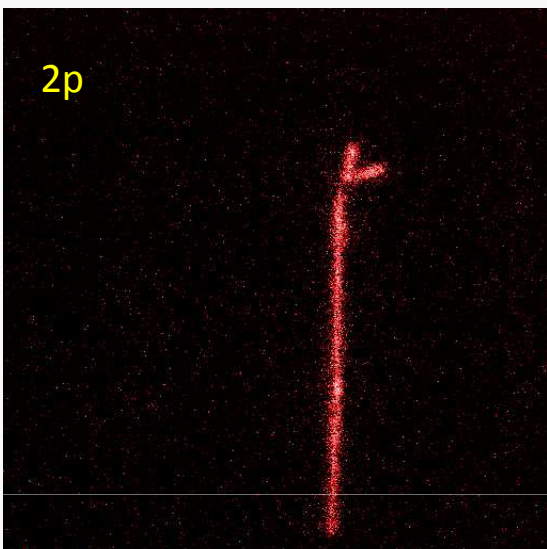
➤ Pierwsza obserwacja emisji $2p$ z ^{48}Ni



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

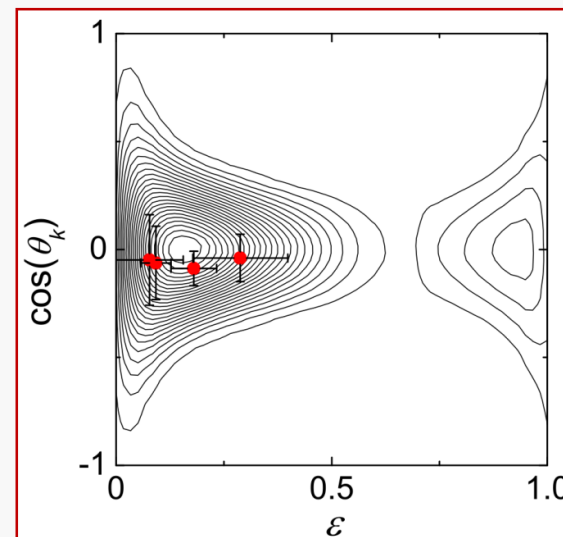


Wszystkie zdarzenia $2p$ z ^{48}Ni

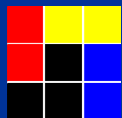


Four 2p events
of ^{48}Ni

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

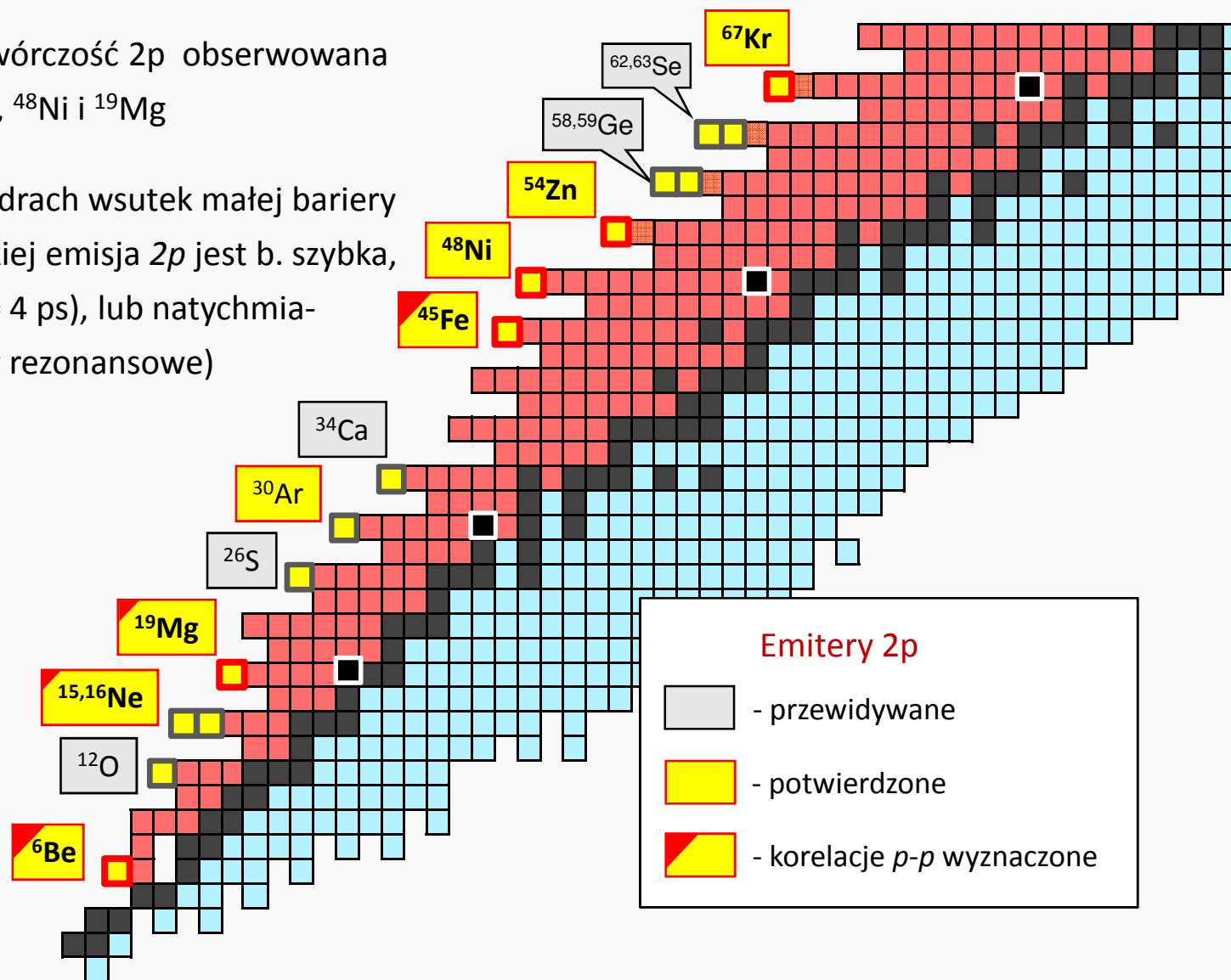


Pomorski et al., PRC 90 (14) 014311



Stan badań nad emisją 2p

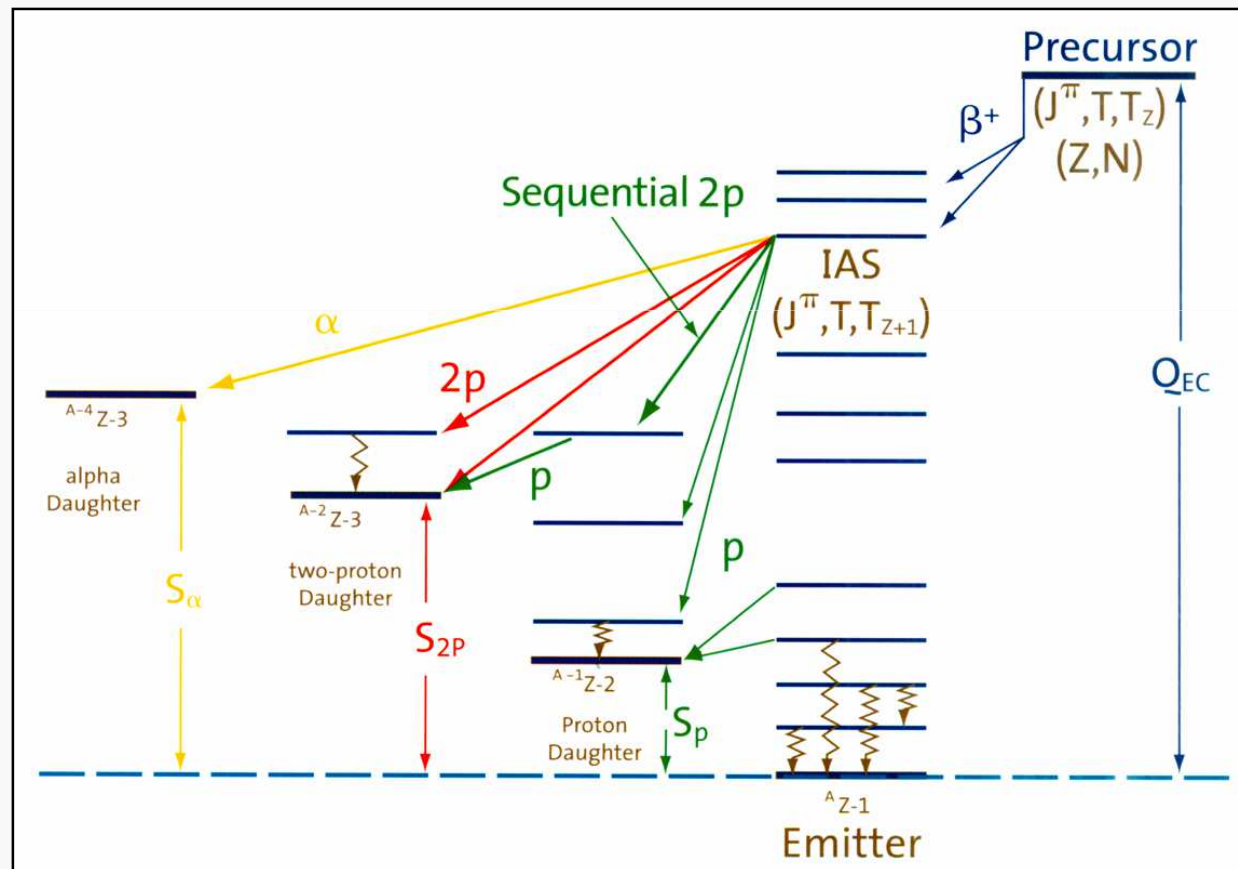
- Promieniotwórczość 2p obserwowana w ^{45}Fe , ^{54}Zn , ^{48}Ni i ^{19}Mg
- W lekkich jądrach wskutek małej bariery kulombowskiej emisja 2p jest b. szybka, ($T_{1/2}(^{19}\text{Mg}) \approx 4$ ps), lub natychmiastowa (stany rezonansowe)



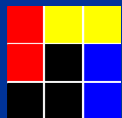


Emisja cząstek opóźnionych

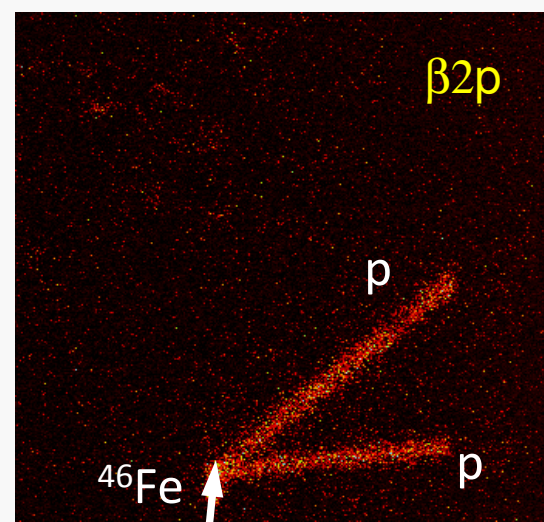
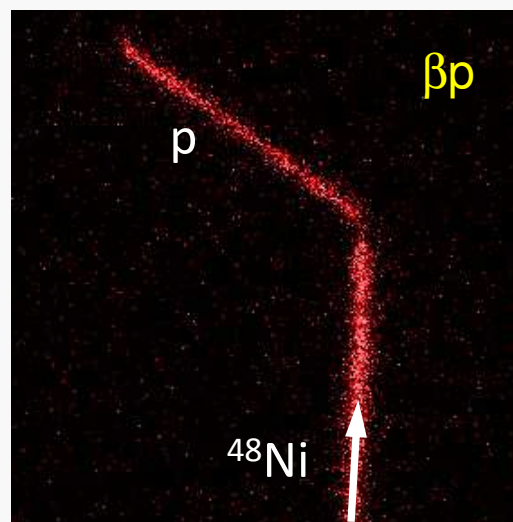
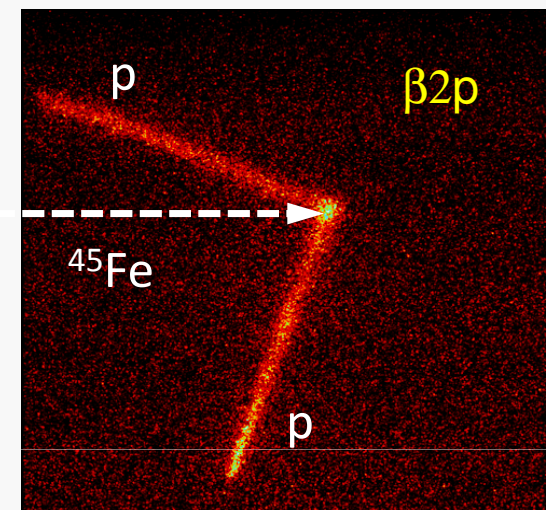
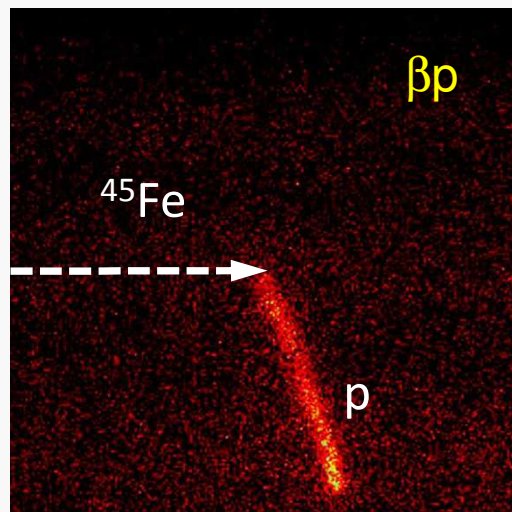
- Nuklidy dalekie od trwałości mają bardzo duże energie przemiany β !
- Przejścia β zasilają stany o dużej energii, powyżej progu na separację cząstek.

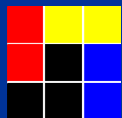


Blank and Borge, Progress in Part. Nucl. Phys. 60 (2008) 403

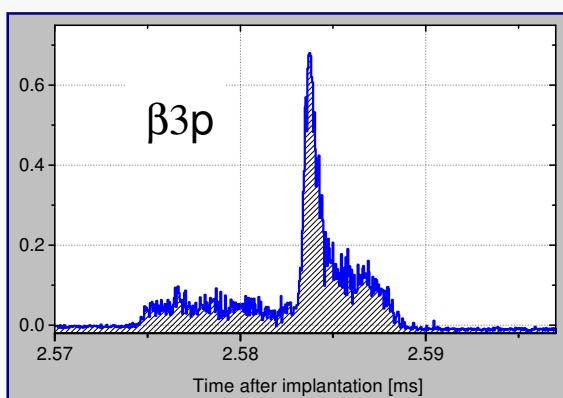
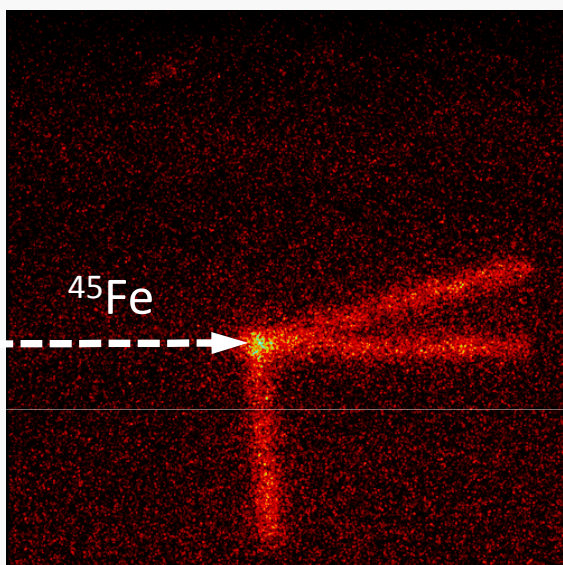


Opóźnione protony

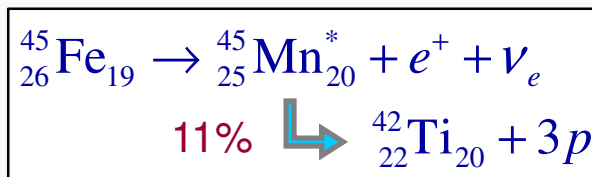




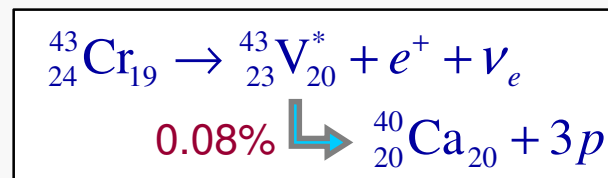
Odkrycie opóźnionej emisji 3p



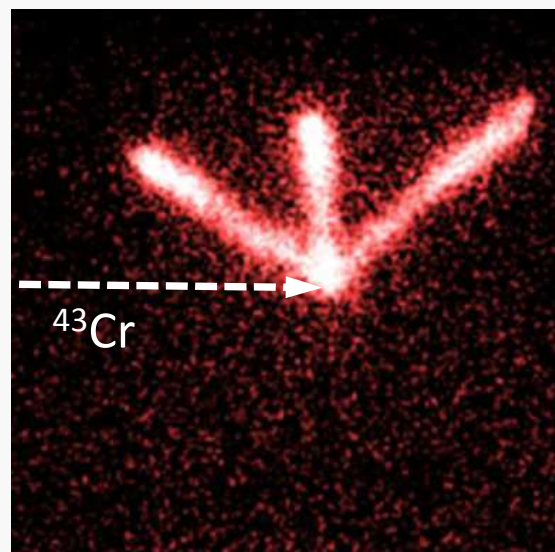
Miernik et al., PRC 76 (07) 041304(R)



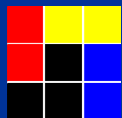
125 rozpadów ${}^{45}\text{Fe}$
38 rozpadów β
4 przypadki $\beta 3p$



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



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



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

PHYSICAL REVIEW C

VOLUME 45, NUMBER 1

JANUARY 1992

Decay modes of ^{31}Ar and first observation of β -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

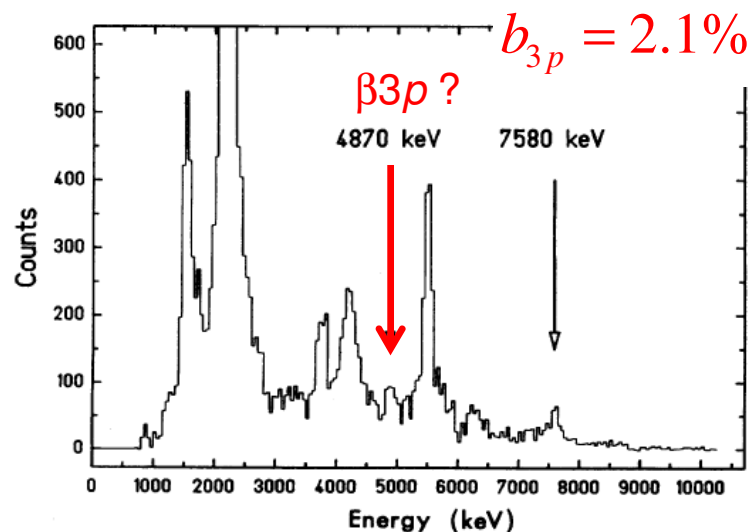
PHYSICAL REVIEW C

VOLUME 59, NUMBER 4

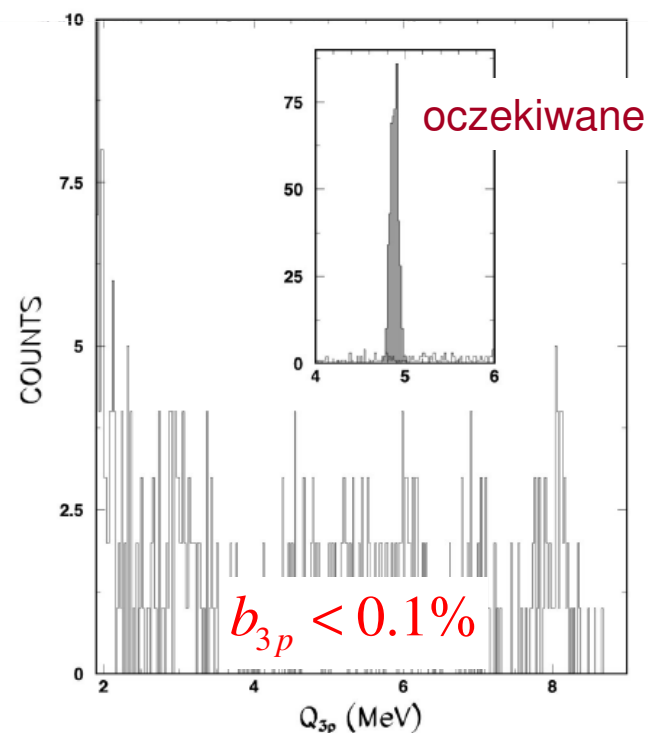
APRIL 1999

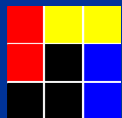
^{31}Ar examined: New limit on the β -delayed three-proton branch

H. O. U. Fynbo,¹ L. Axelsson,² J. Äystö,³ M. J. G. Borge,⁴ L. M. Fraile,⁴ A. Honk
A. Jokinen,³ B. Jonson,² I. Martel,^{5,†} I. Mukha,^{1,‡} T. Nilsson,^{2,§} G. Nyman,² M. Oin
M. H. Smedberg,² O. Tengblad,⁴ F. Wenander,² and the ISOLDE



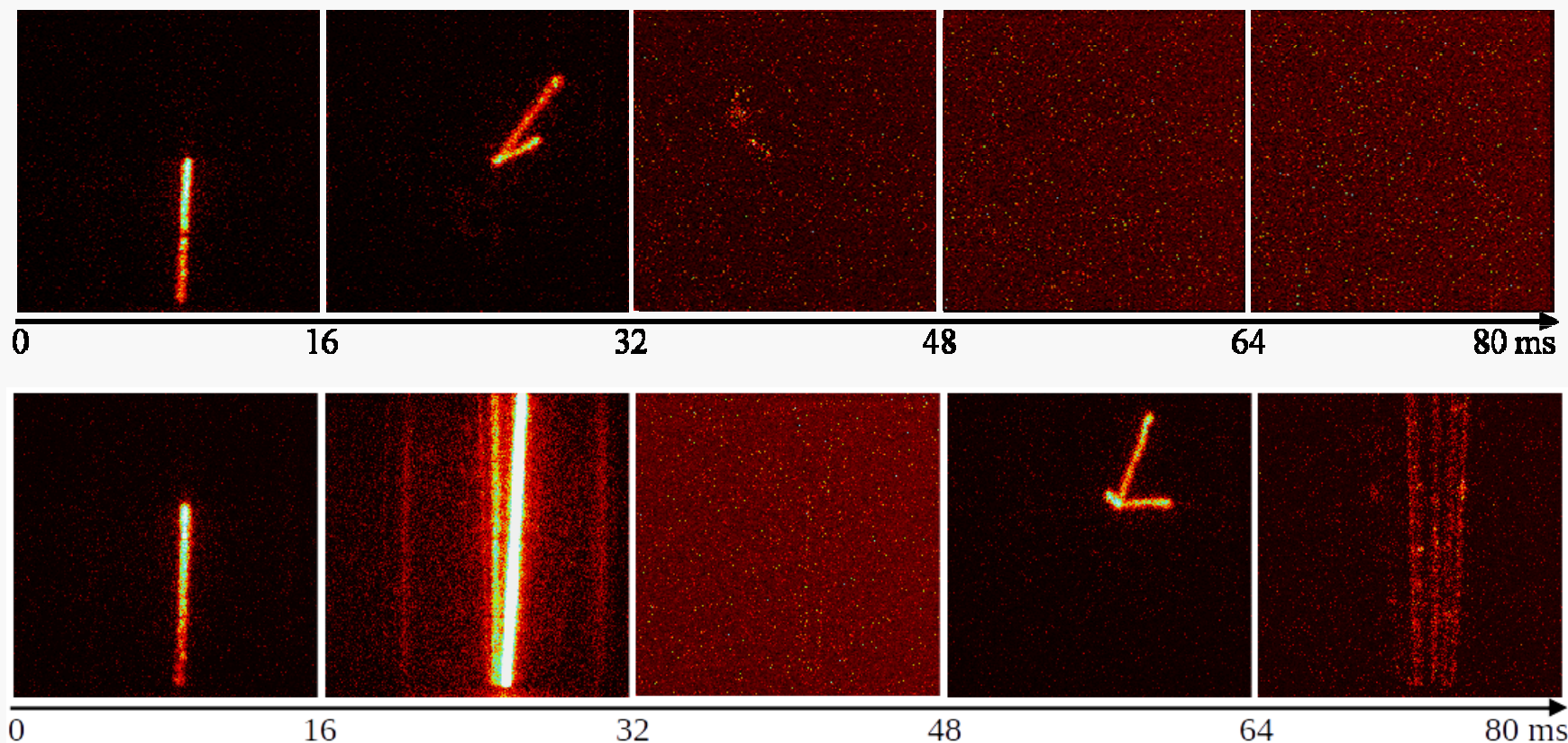
M. Pfützner, KN PromienioTwórczy, 17 maja 2017





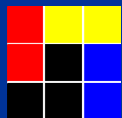
Tak, $\beta 3p$ w ^{31}Ar !

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

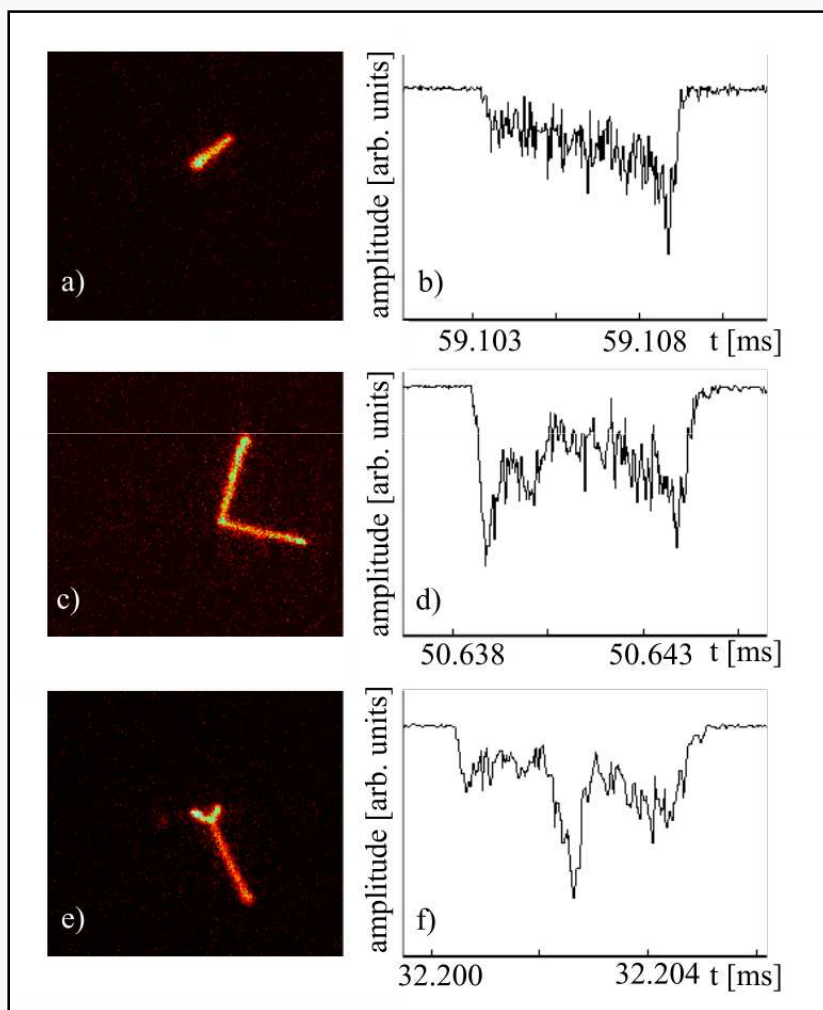


➤ Selekcja zdarzeń: w pierwszej klatce tylko dobrze zatrzymany jon ^{31}Ar

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



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



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

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

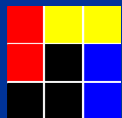
TABLE I. The total branching ratios for the observed decays of ^{31}Ar . The given uncertainties are statistical.

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

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

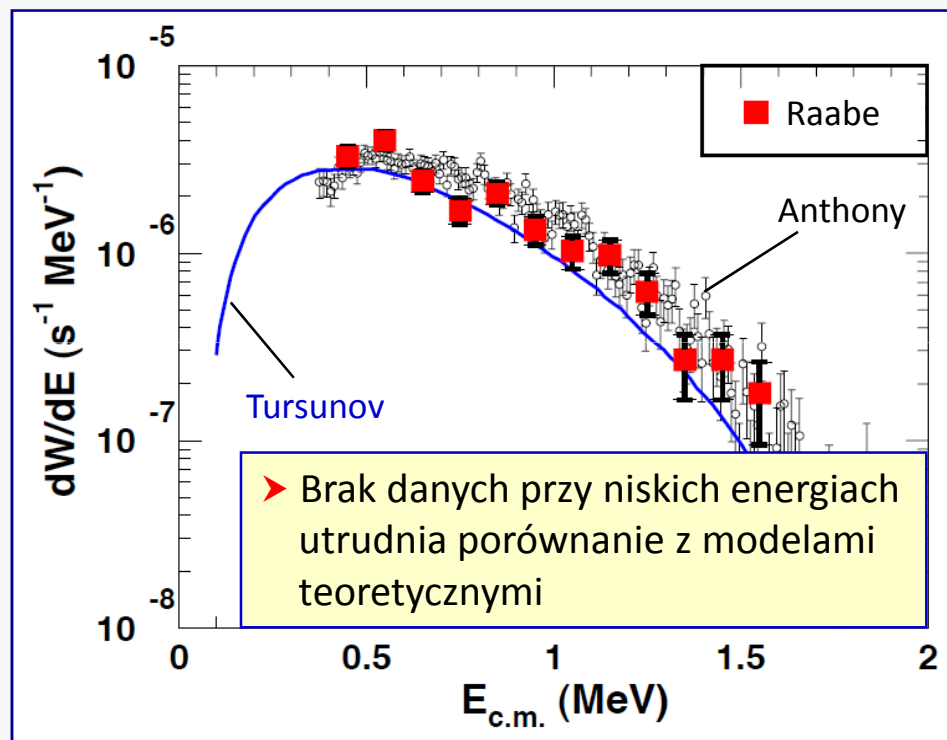
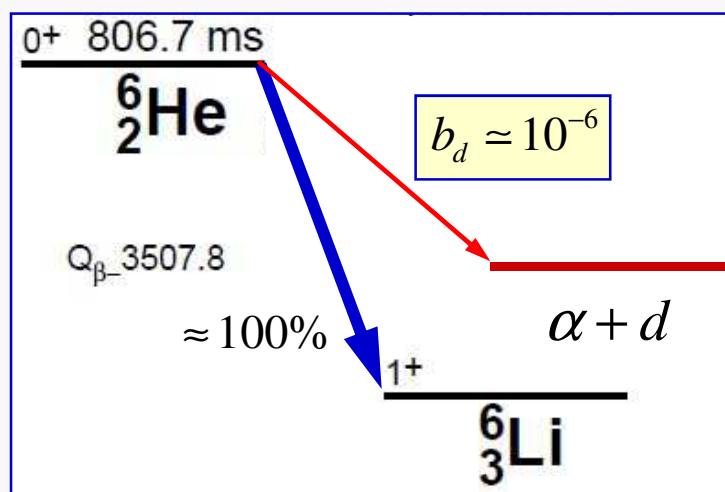
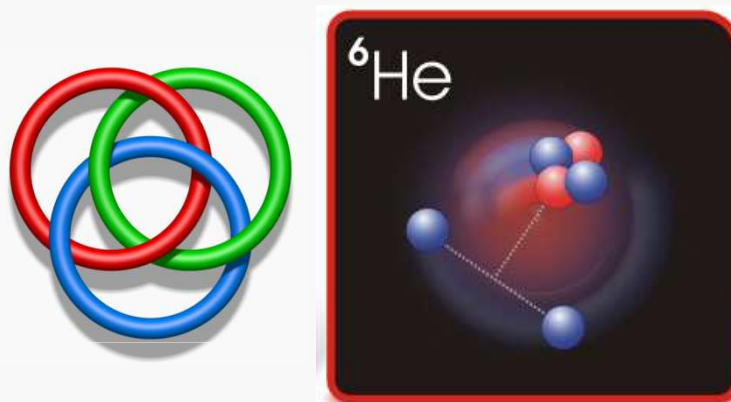
- ^{45}Fe (Miernik et al., PRC76, 2007)
- ^{43}Cr (Pomorski et al., PRC83, 2011)
- ^{31}Ar (Lis et al., PRC, 2015)

Wszystkie odkryte przy pomocy OTPC!



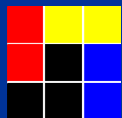
Badanie halo $2n$ w ${}^6\text{He}$

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



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

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



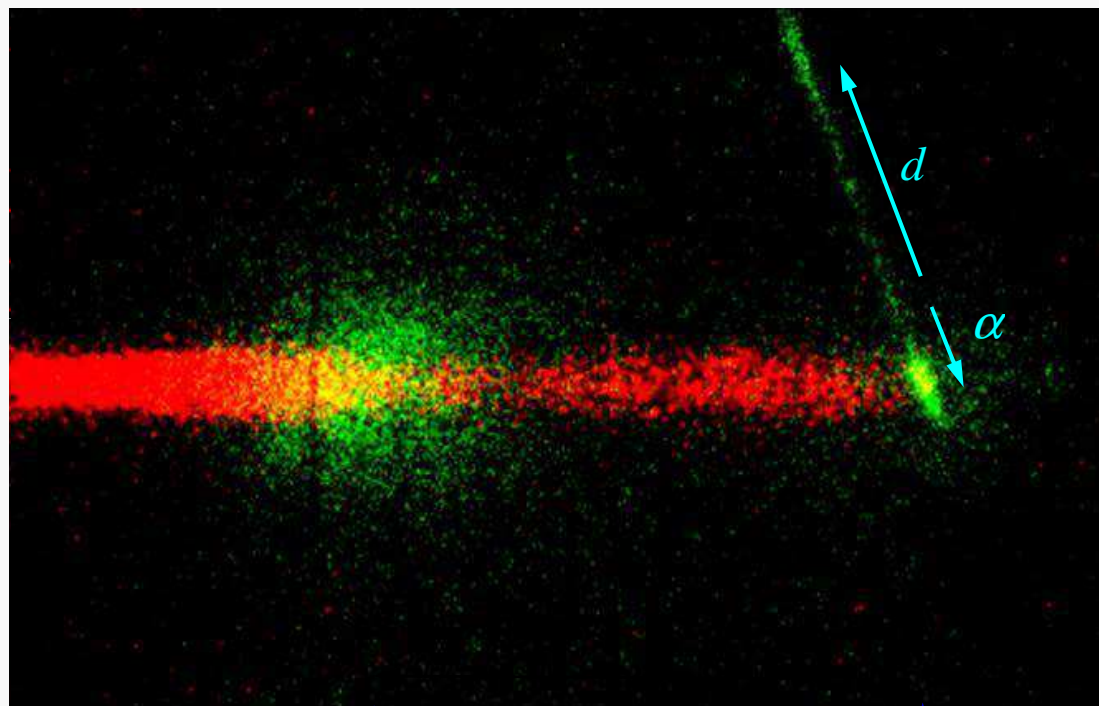
${}^6\text{He}$ w OTPC

➤ Eksperyment w CERN-ISOLDE, sierpień 2012

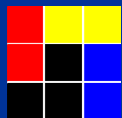
Paczka zawierająca ok. 10^4 jonów ${}^6\text{He}$, przyspieszonych do 3 MeV/u przez REX-ISOLDE, jest zatrzymywana w OTPC (czerwone)



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

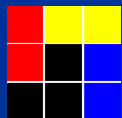


Różnica w głębokości implantacji odpowiada stracie energii ${}^6\text{He}$ w pasku $5\text{ }\mu\text{m Cu} + 2\text{ }\mu\text{m Au}$ na oknie wejściowym

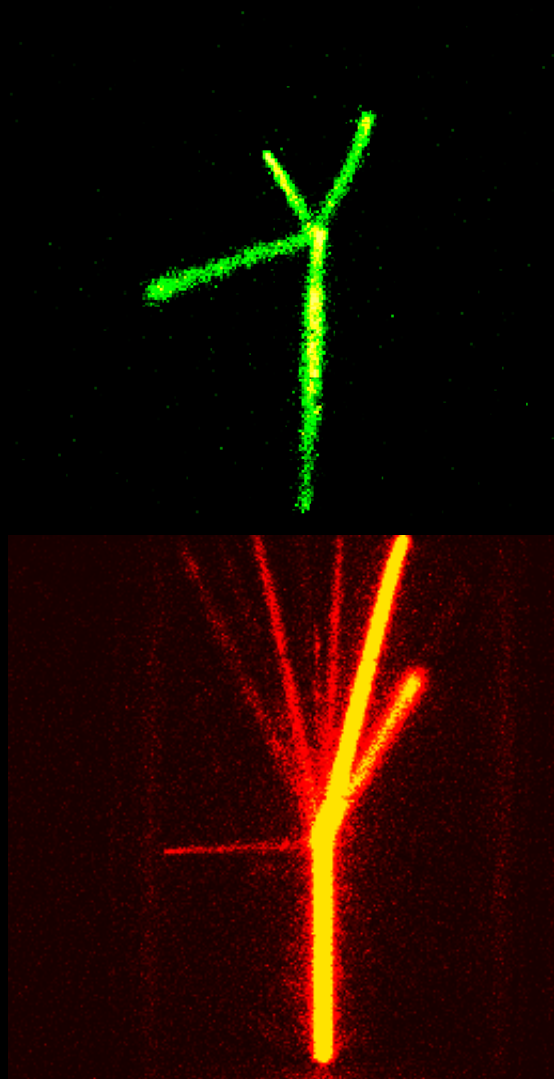


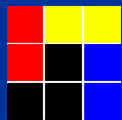
Podsumowanie

- Detektor OTPC zbudowaliśmy z myślą o badaniu promieniotwórczości $2p$ (korelacje p - p).
- Zabadaliśmy dokładnie emisję $2p$ ^{45}Fe i odkryliśmy trzciałowy charakter tej przemiany. Odkryliśmy emisję $2p$ w ^{48}Ni . Planujemy badanie korelacji p - p w ^{54}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 β .
- Po raz pierwszy zaobserwowaliśmy nowe kanały rozpadu, jak $\beta 3p$ (^{45}Fe , ^{43}Cr , ^{31}Ar), czy $\beta 2p$ w ^{46}Fe (obserwacja jednego zdarzenia!).
- Zmierzyliśmy widmo deuteronów opóźnionych z ^6He .
- Pomiary z OTPC uzupełniają badania prowadzone innymi technikami.
Każdy eksperyment przynosi coś nowego

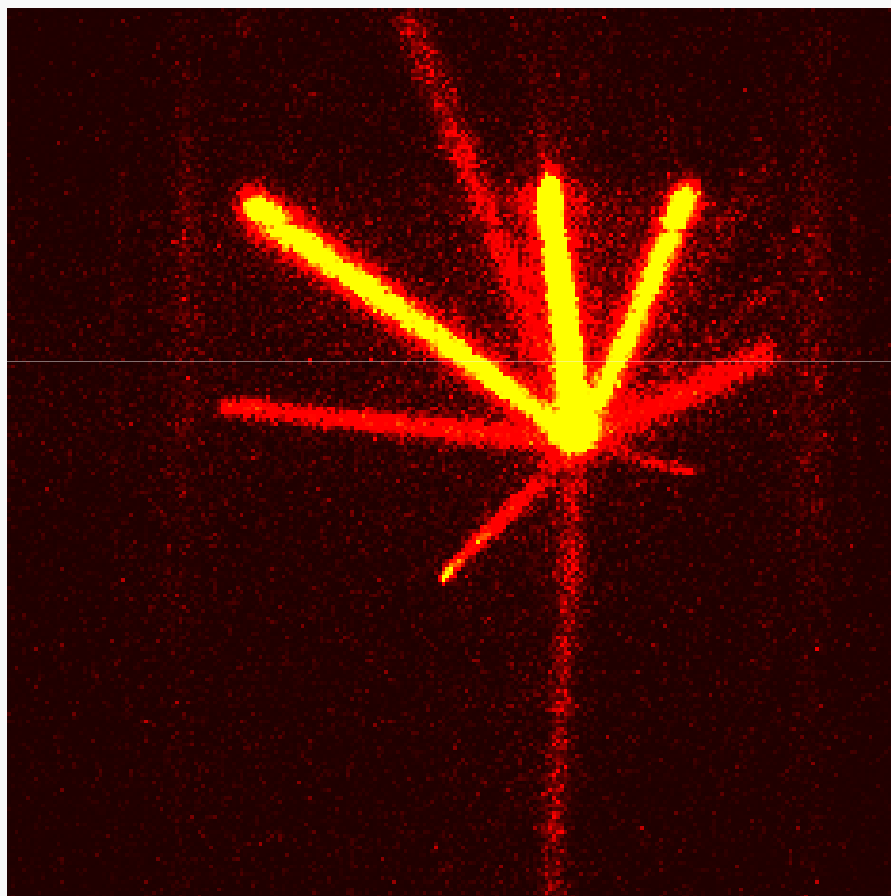


Dziękuję!





Dodatkowe slajdy





Beyond the proton drip-line

Competition between two decay modes

➤ The β^+ decay

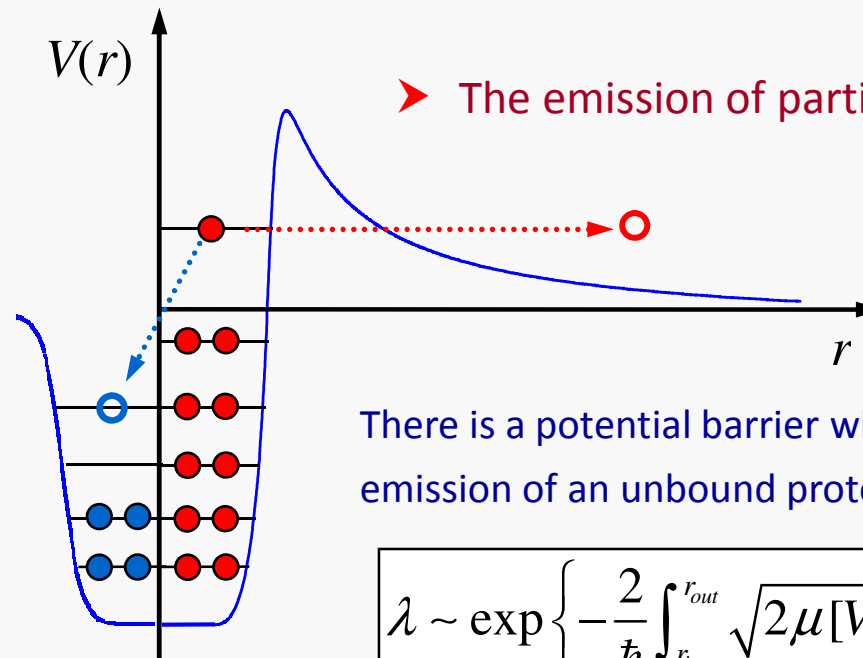
Probability of transition:

$$\lambda \sim Q^5$$

Decay energy may be large,
but the weak interaction
is really weak

$$\rightarrow T_{1/2} > 1 \text{ ms}$$

➤ The emission of particles



There is a potential barrier which hampers
emission of an unbound proton (α , $2p$, ^{14}C ,...)

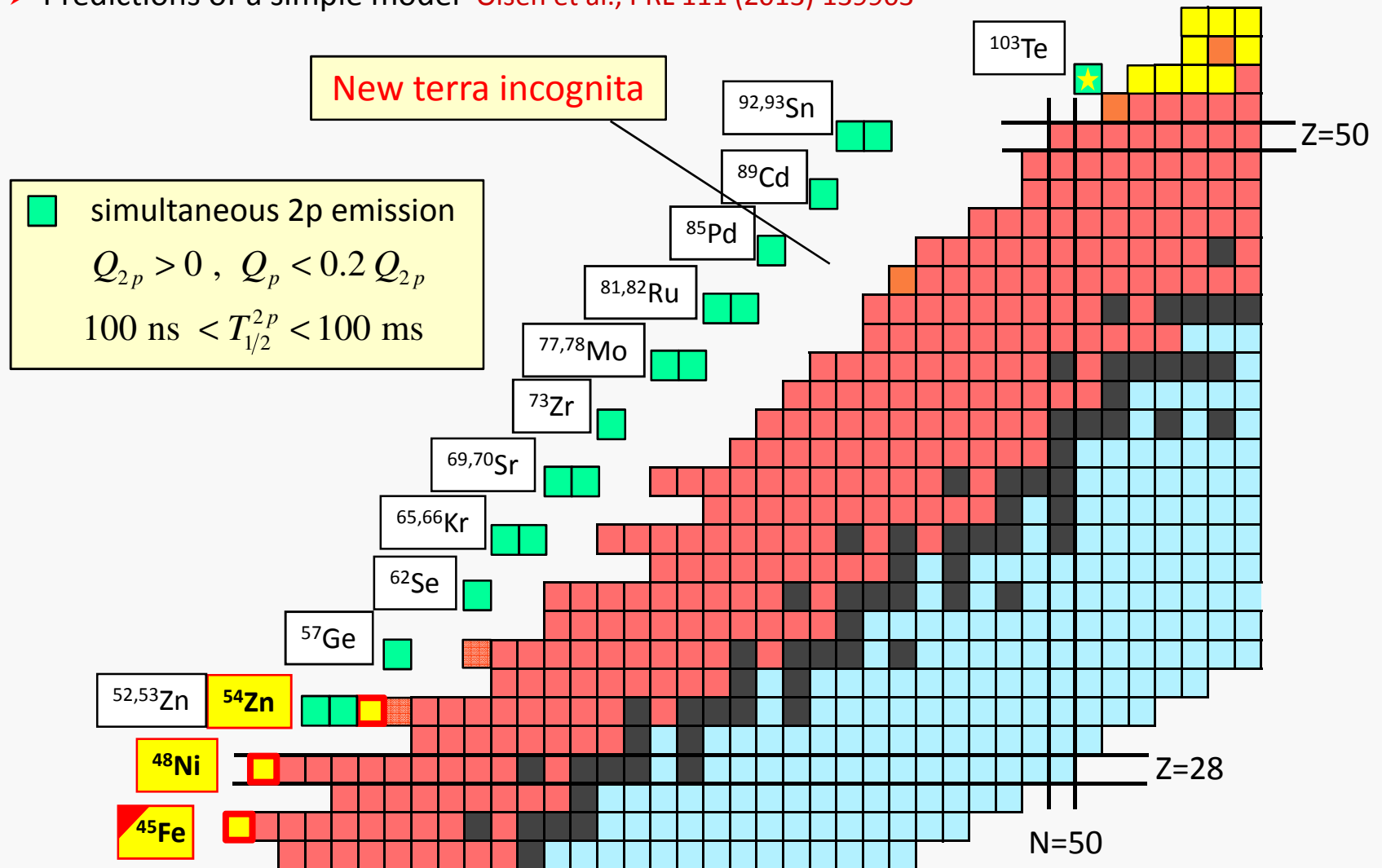
$$\lambda \sim \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \sqrt{2\mu[V(r) - Q_p]} \cdot dr \right\}$$

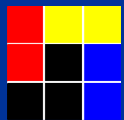
- ➔ To find where the drip-line actually is and to predict which decay will happen, precise estimates of atomic masses are required!
- ➔ To study particle radioactivity fast techniques are needed!



Up to tellurium

► Predictions of a simple model Olsen et al., PRL 111 (2013) 139903



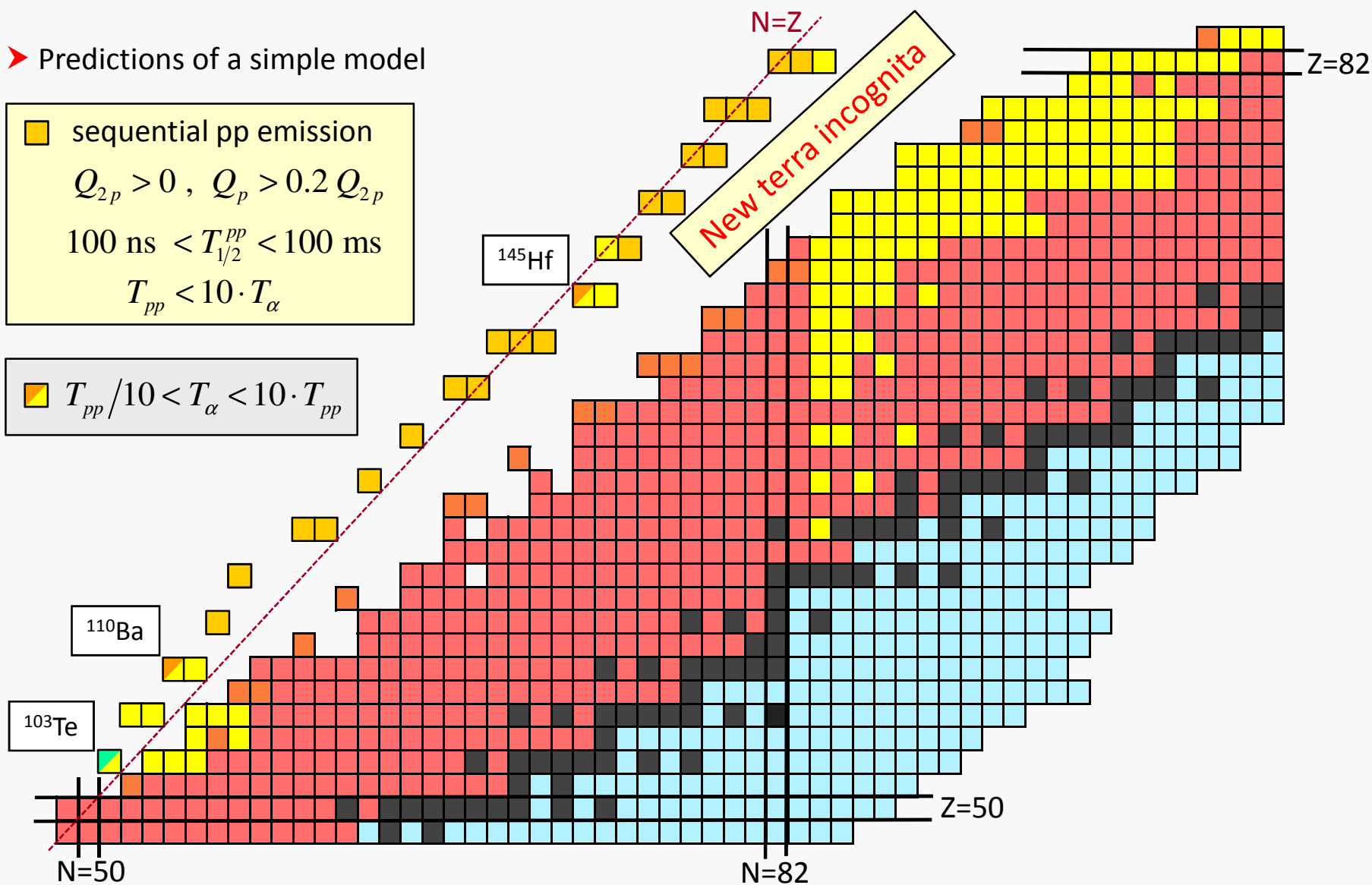


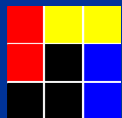
Between tellurium and lead

► Predictions of a simple model

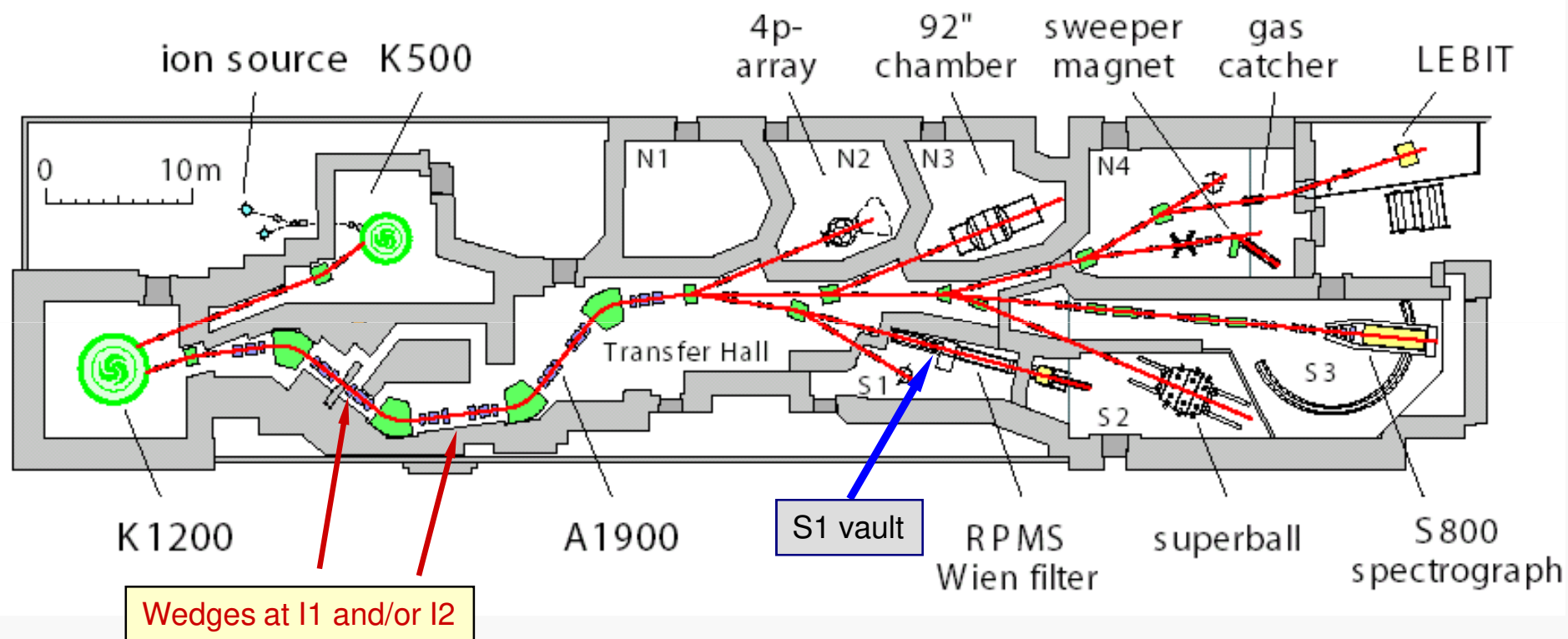
 sequential pp emission
 $Q_{2p} > 0$, $Q_p > 0.2 Q_{2p}$
 $100 \text{ ns} < T_{1/2}^{pp} < 100 \text{ ms}$
 $T_{pp} < 10 \cdot T_{\alpha}$

 $T_{pp}/10 < T_{\alpha} < 10 \cdot T_{pp}$



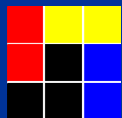


A1900 separator



Reaction: ^{58}Ni at 161 MeV/u + $^{\text{nat}}\text{Ni} \rightarrow ^{45}\text{Fe}$

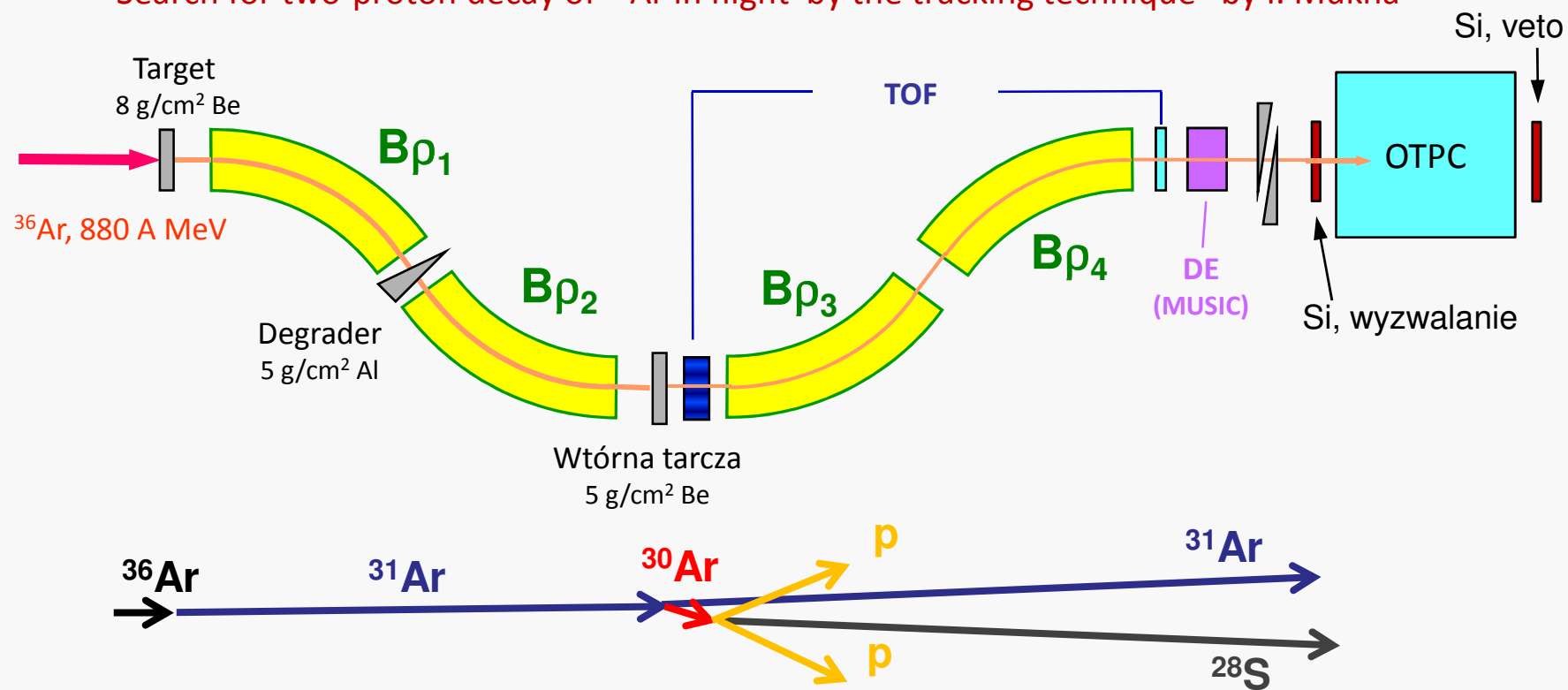
Ion identification in-flight : $\Delta E + \text{TOF}$



^{31}Ar na separatorze FRS

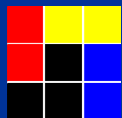
➤ Eksperyment w GSI-FRS, sierpień 2012

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



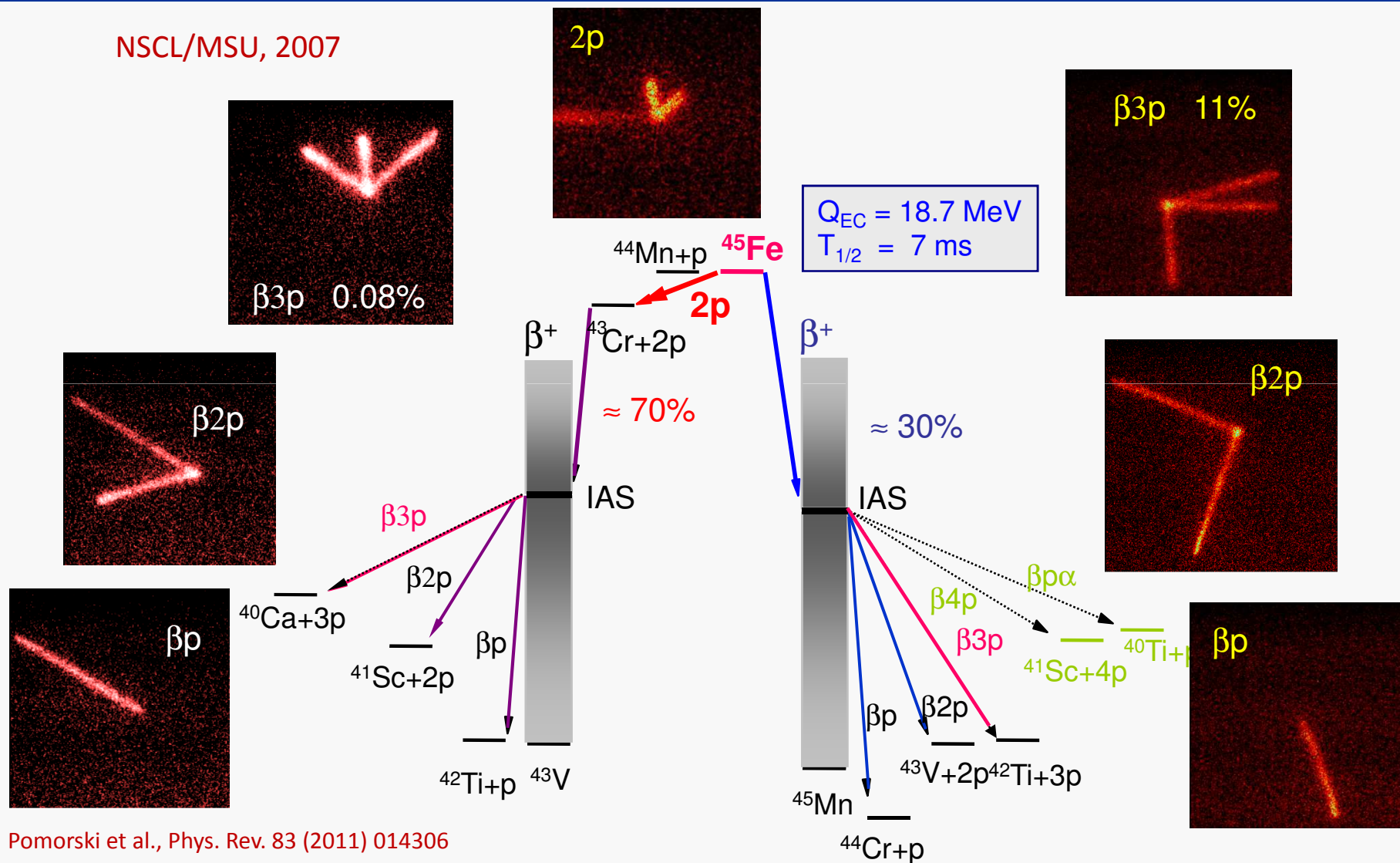
Mukha et al., PRL 115 (2015) 202501

➤ Wiele jonów ^{31}Ar dolatuje na koniec separatora
Zatrzymujemy je w OTPC i badamy ich rozpady



Rozpady ^{45}Fe i ^{43}Cr

NSCL/MSU, 2007



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

Miernik et al., PRL 99 (07) 192501