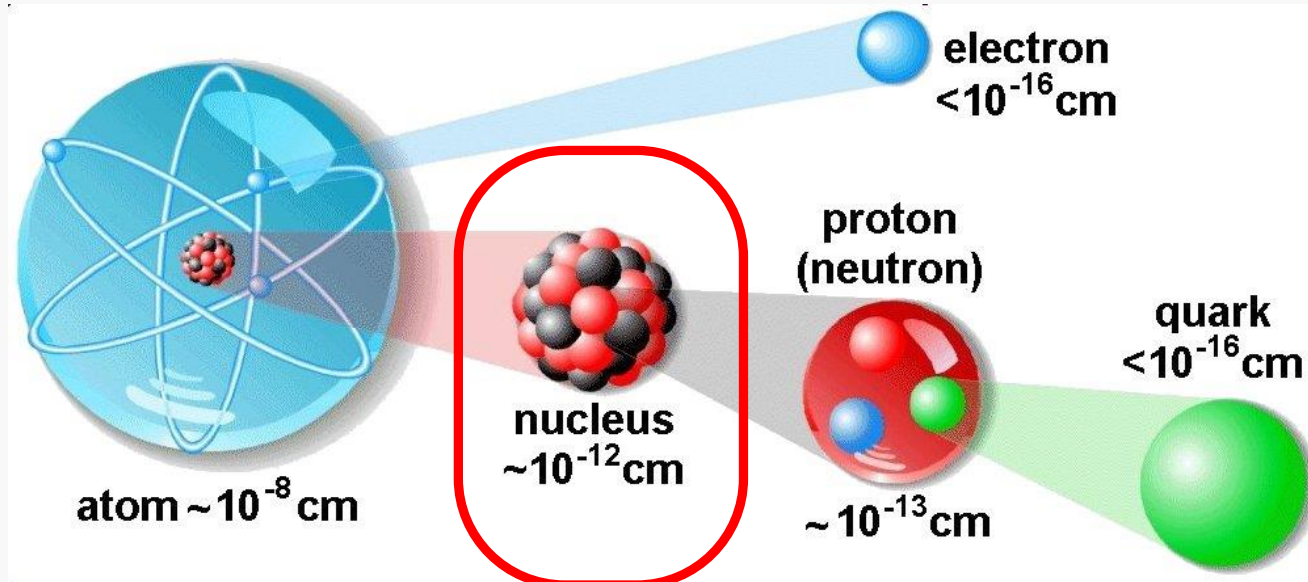


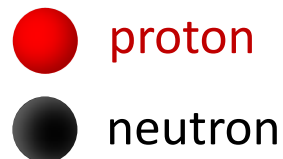
Egzotyczne nuklidy i promieniotwórczość dwuprotonowa

Marek Pfützner (Uniwersytet Warszawski)

Jądro atomowe



Postawowe elementy
(stopnie swobody)

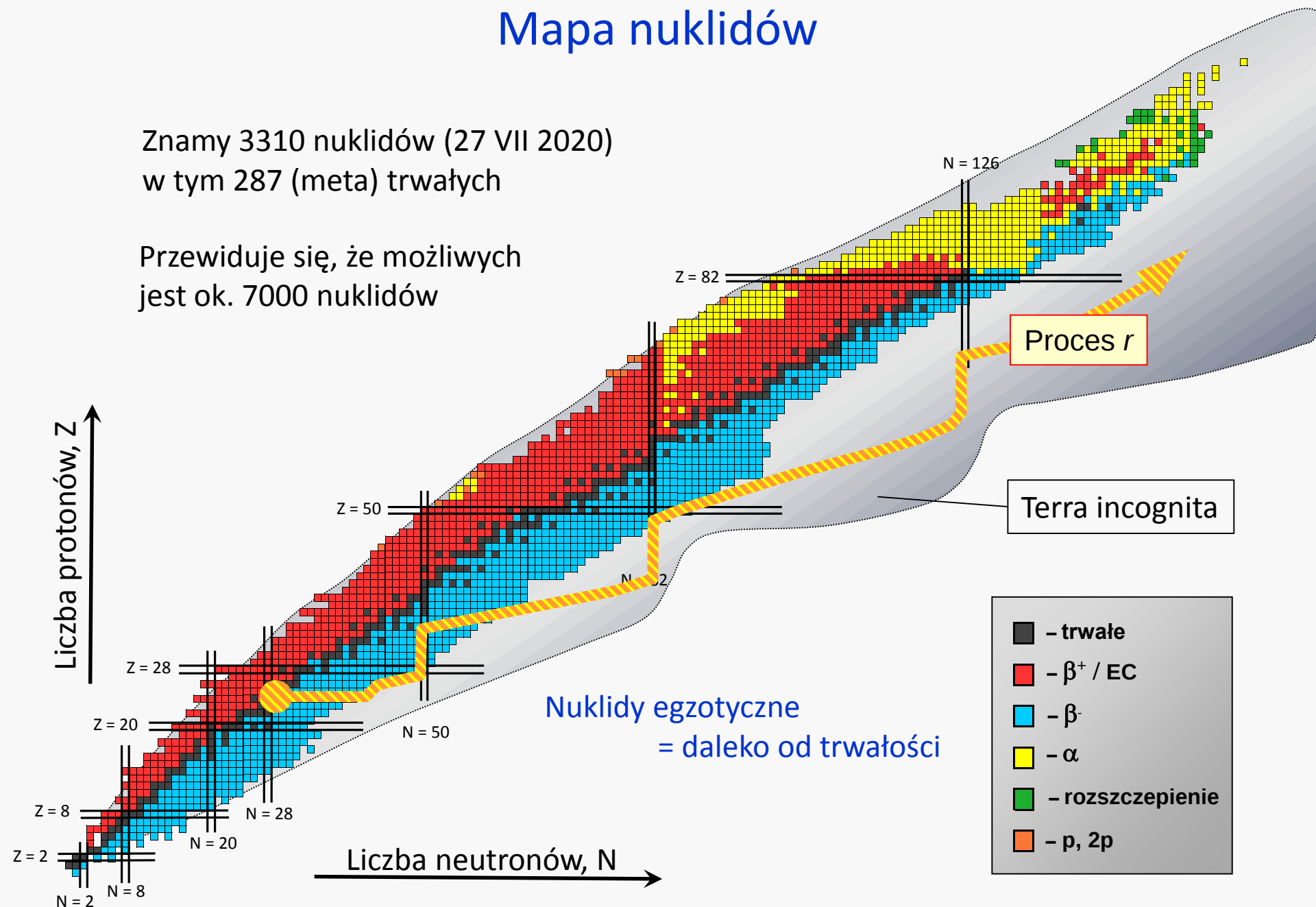


Ile różnych nuklidów
możemy stworzyć z
protonów i neutronów?

Mapa nuklidów

Znamy 3310 nuklidów (27 VII 2020)
w tym 287 (meta) trwałych

Przewiduje się, że możliwych
jest ok. 7000 nuklidów



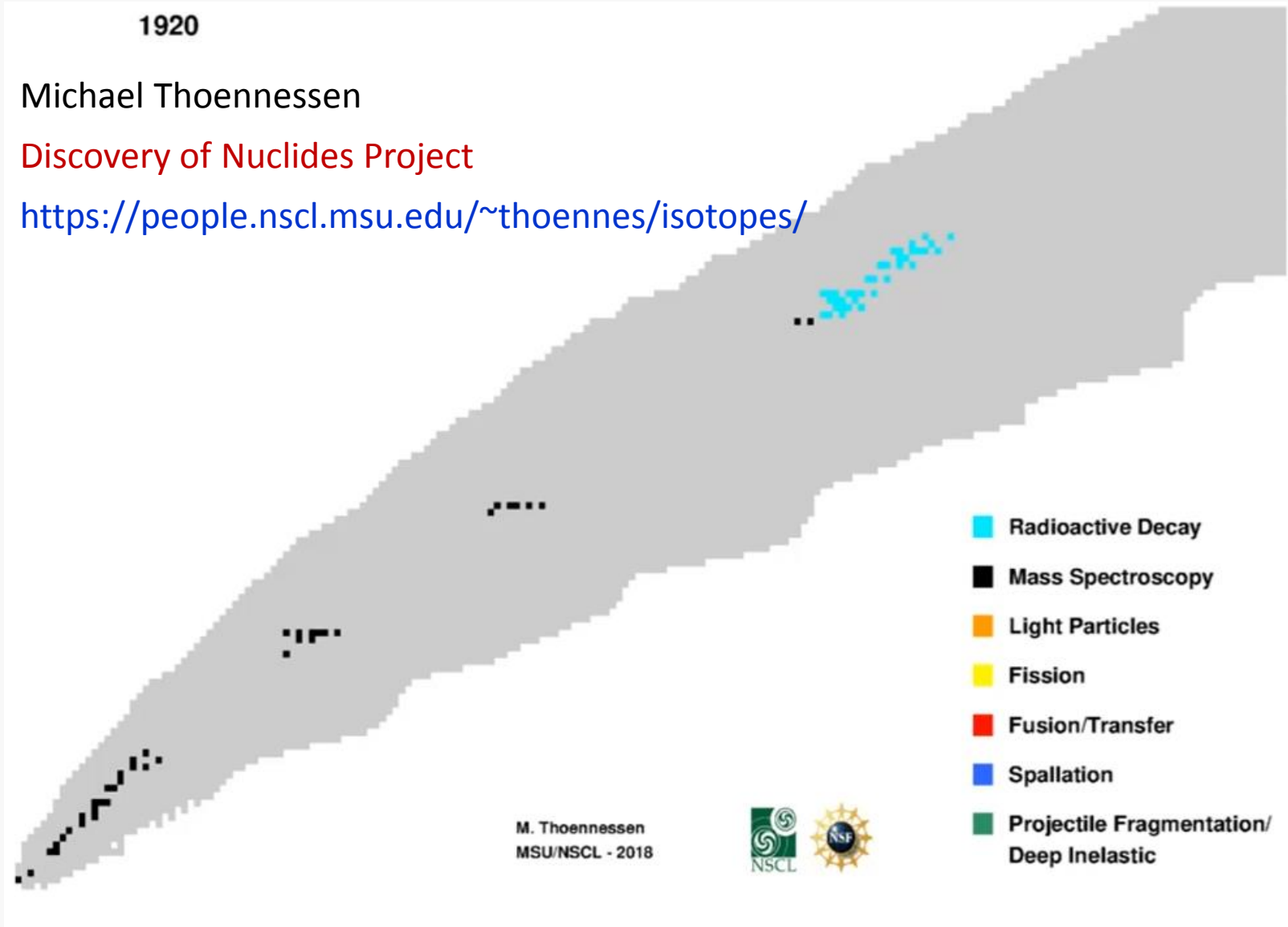
Historia mapy nuklidów

1920

Michael Thoennessen

Discovery of Nuclides Project

<https://people.nscl.msu.edu/~thoennes/isotopes/>



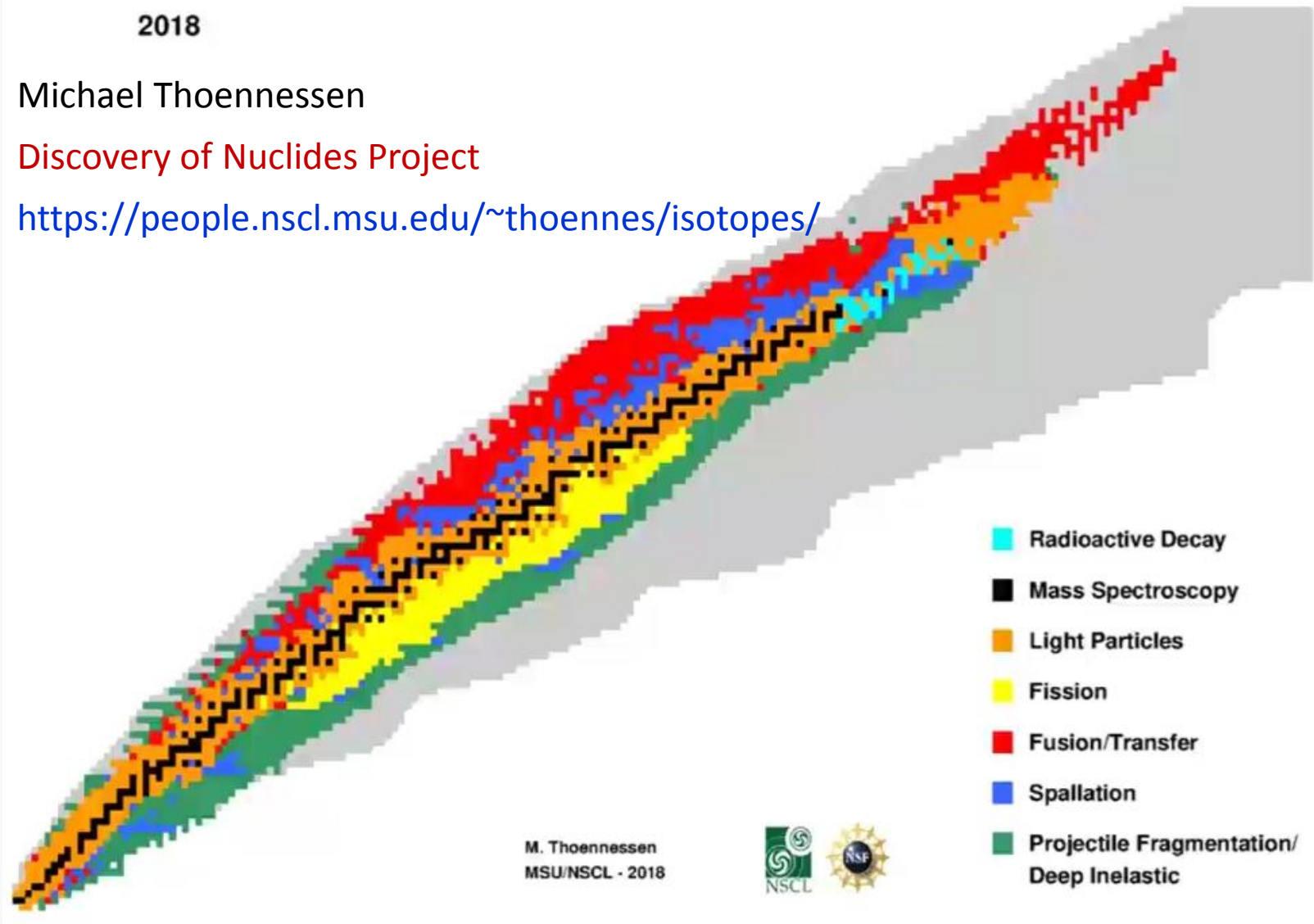
Historia mapy nuklidów

2018

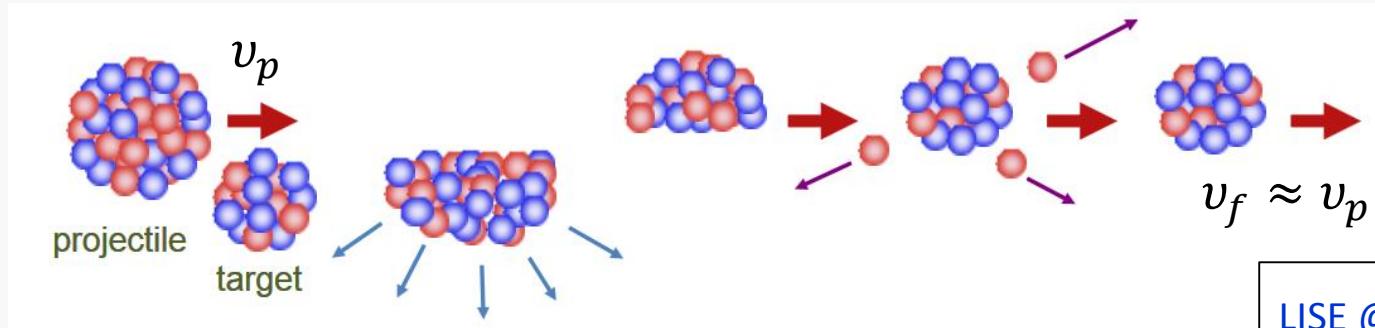
Michael Thoennessen

Discovery of Nuclides Project

<https://people.nscl.msu.edu/~thoennes/isotopes/>



Fragmentacja pocisków

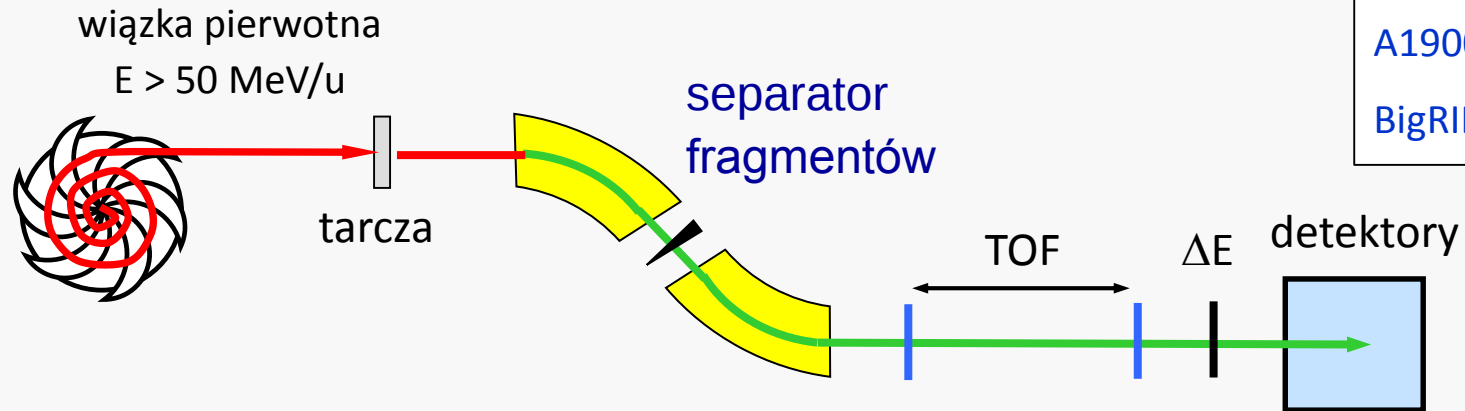


LISE @ GANIL

FRS @ GSI

A1900 @ NSCL

BigRIPS @ RIKEN



Duża energia jonów umożliwia

- pełną identyfikację pojedynczych jonów w locie
- badanie krótkich czasów życia
- implantację w materiał detektora

Strata energii, $\Delta E \rightarrow Z$
Czas przelotu, TOF $\rightarrow A/Q$

Odkrycie ^{45}Fe

VOLUME 77, NUMBER 14

PHYSICAL REVIEW LETTERS

30 SEPTEMBER 1996

First Observation of the $T_z = -7/2$ Nuclei ^{45}Fe and ^{49}Ni

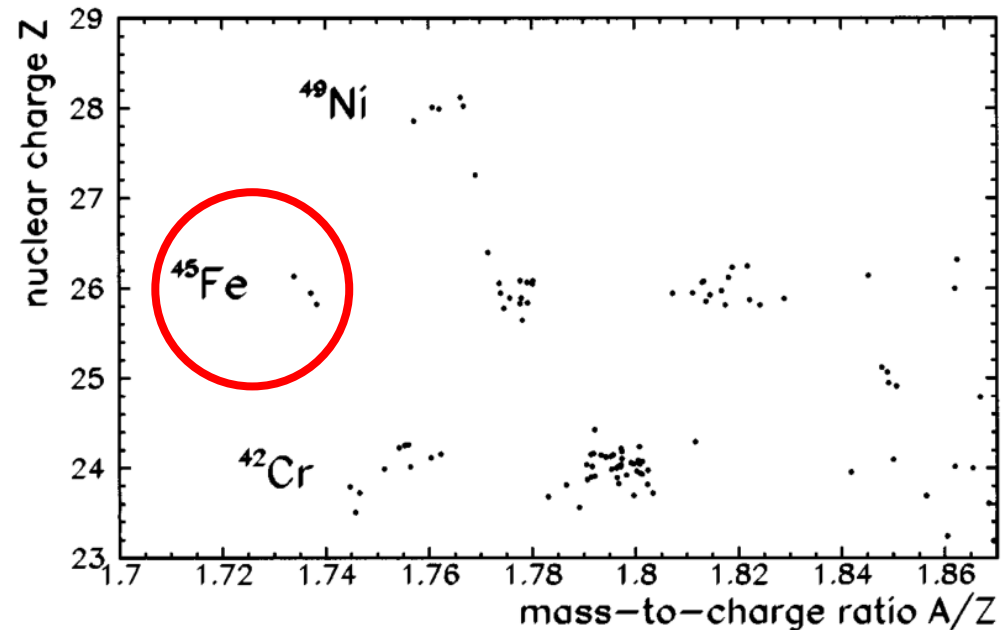
B. Blank, S. Czajkowski, F. Davi, R. Del Moral, J. P. Dufour, A. Fleury, C. Marchand, and M. S. Pravikoff
Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan, F-33175 Gradignan Cedex, France

J. Benlliure, F. Boué, R. Collatz, A. Heinz, M. Hellström, Z. Hu, E. Roeckl, M. Shibata, and K. Sümmerer
Gesellschaft für Schwerionenforschung, Planckstrasse 1, D-64291 Darmstadt, Germany

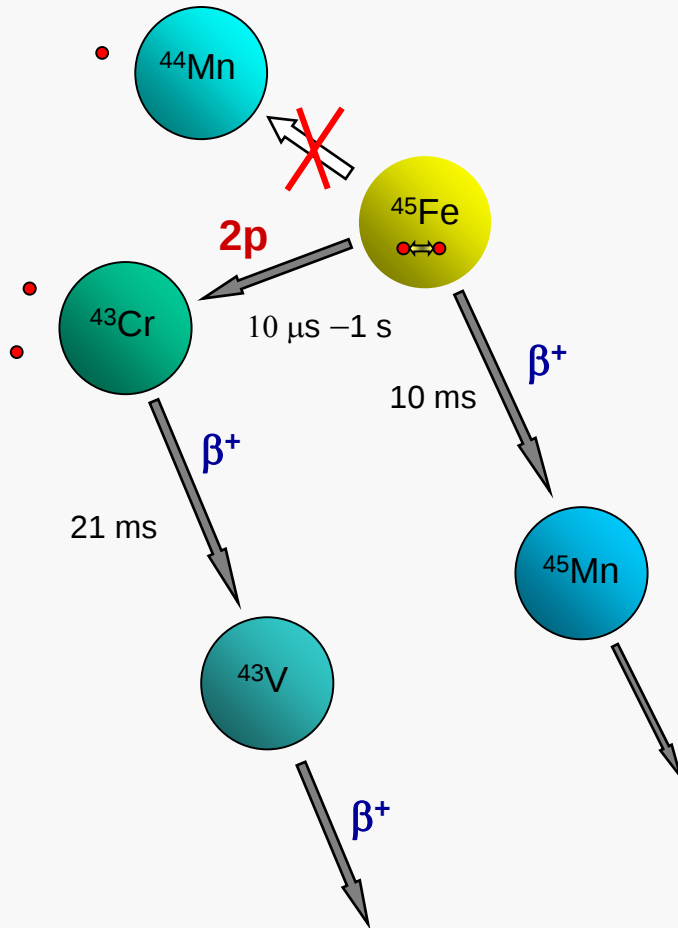
Z. Janas, M. Karny, and M. Pfützner
Institute of Experimental Physics, University of Warsaw, PL 00 681 Warsaw, Hoża 60, Poland

M. Lewitowicz
Grand Accélérateur National des Ions Lourds, B.P. 502
(Received 25 July 1996)

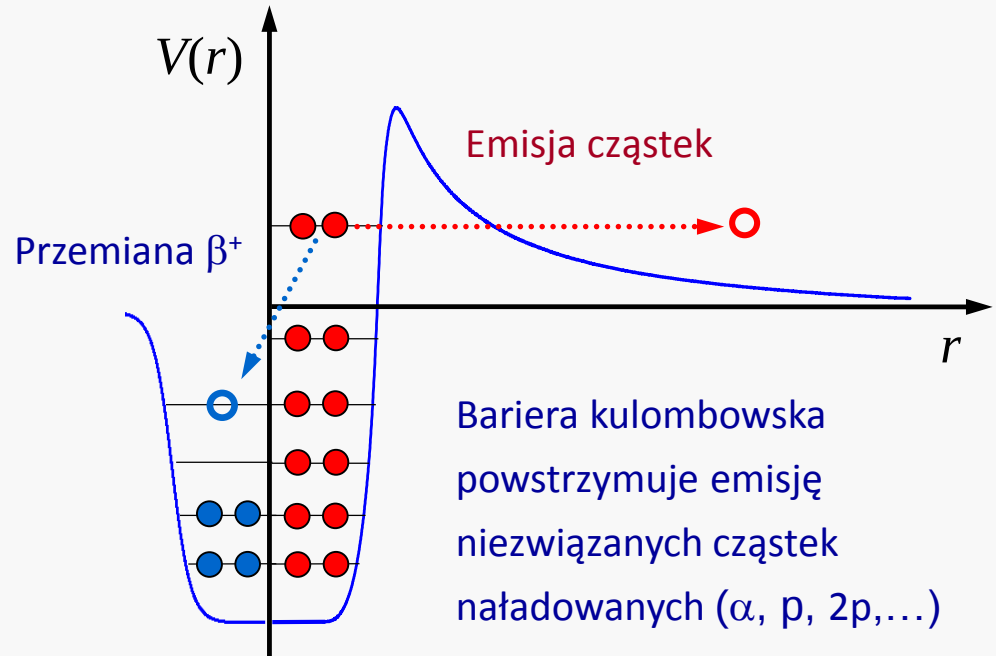
A primary beam of ^{58}Ni at 600 MeV/nucleon from the produce proton-rich isotopes in the titanium-to-nickel region by target. The fragments were separated by a projectile-fragmentation. We report here the first observation of the $T_z = -7/2$ nuclei ever synthesized with an excess of seven protons ($T_z = -3$) was identified. According to commonly used model unbound with respect to two-proton emission from their ground state of ^{38}Ti ($T_z = -3$) in this experiment, an upper limit of 120 isotope. [S0031-9007(96)01355-5]



Promieniotwórczość 2p



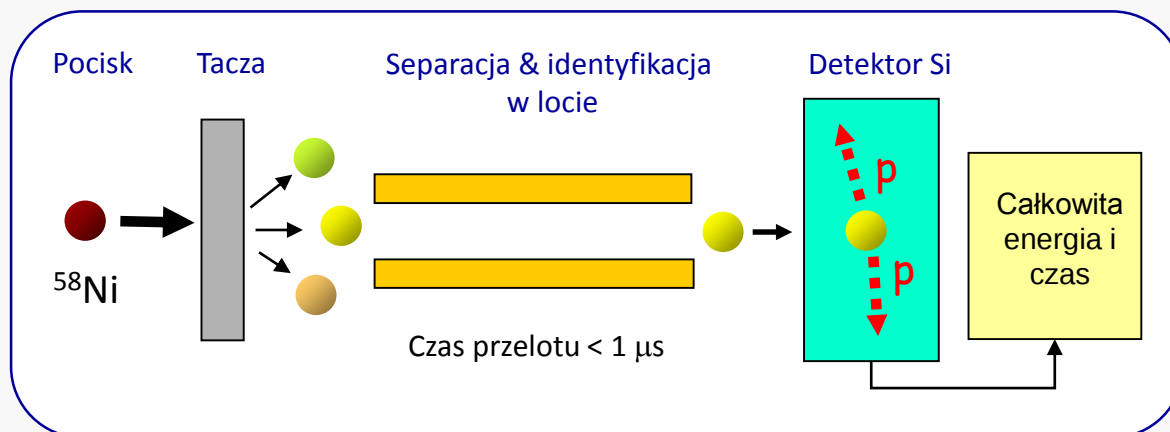
Goldanskii, Nucl. Phys. 19 (60) 482



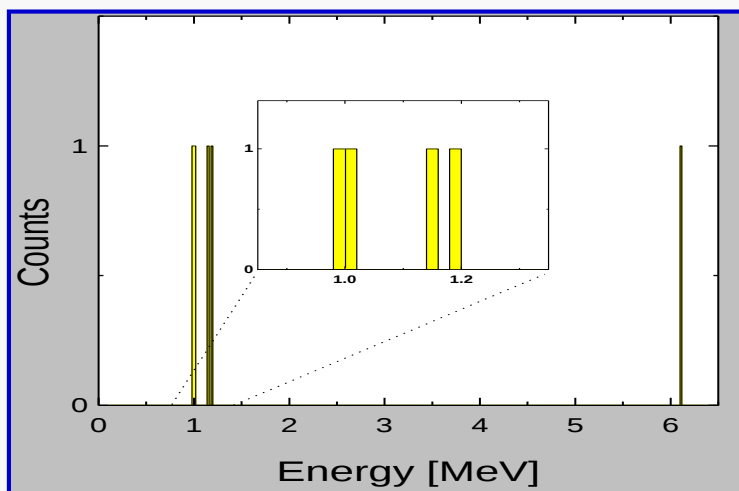
Przewidywanie rozpadów wymaga:

- dokładnych wartości mas
- kształtu potencjału
- modelu emisji cząstek

Odkrycie emisji $2p$ w ^{45}Fe

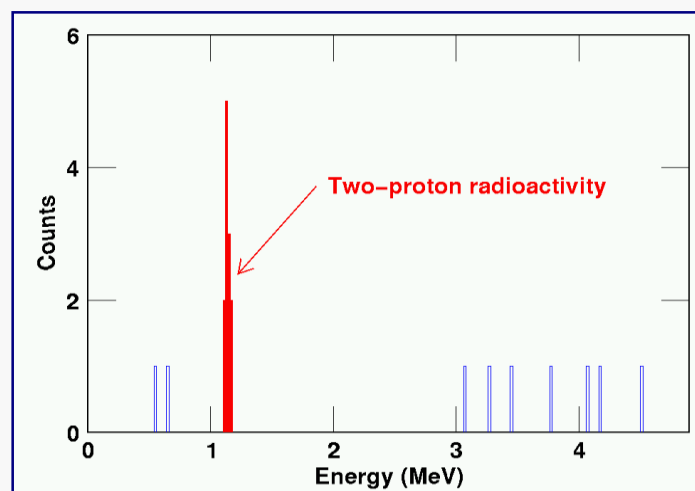


GSI: ^{58}Ni @ 650 MeV/A + Be $\rightarrow$ ^{45}Fe



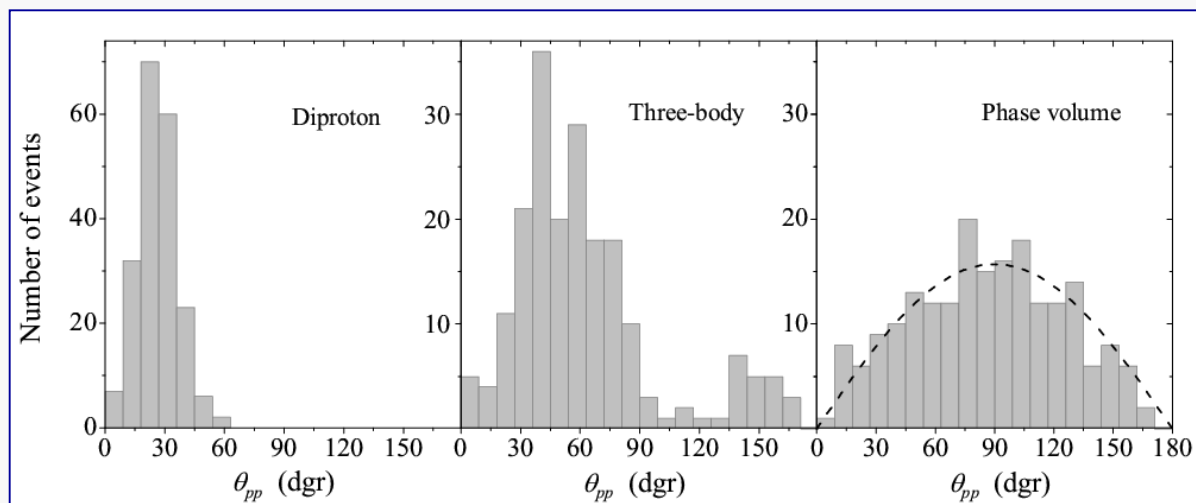
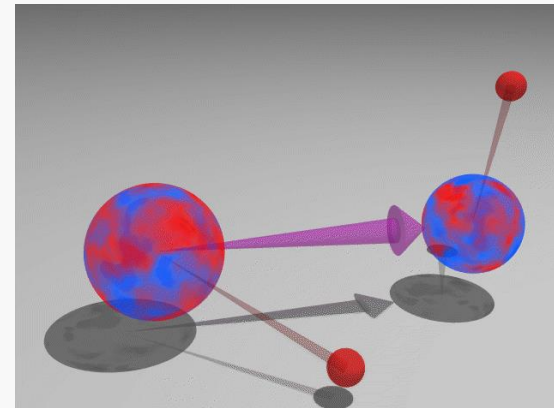
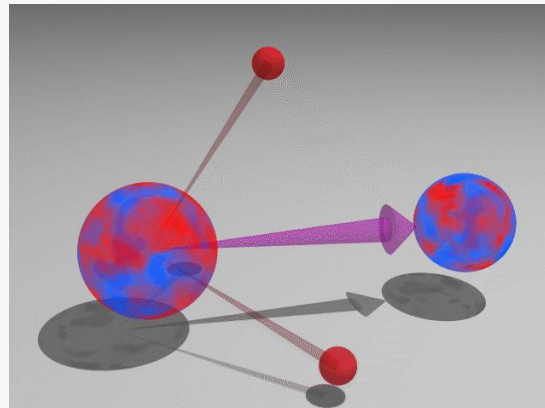
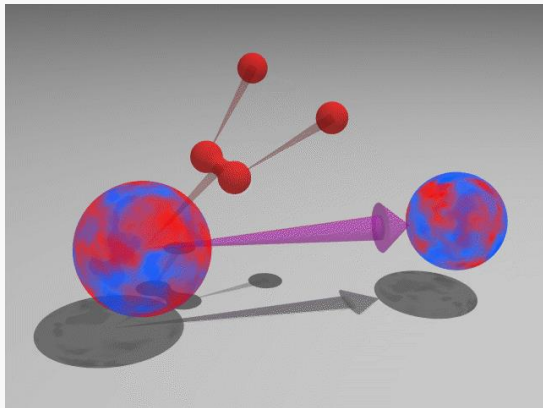
MP et al., EPJ A 14 (2002) 279

GANIL: ^{58}Ni @ 75 MeV/A + Ni $\rightarrow$ ^{45}Fe



Giovinazzo et al., PRL 89 (2002) 102501

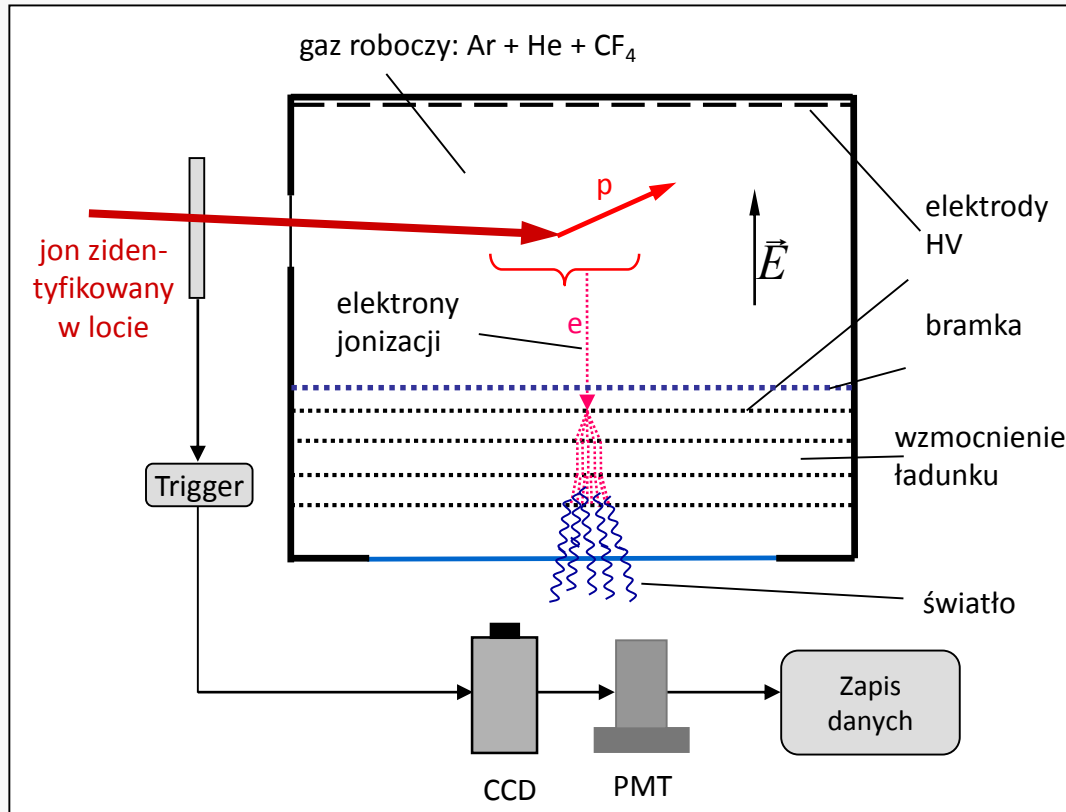
Jaki jest mechanizm emisji $2p$?



Rozkład kąta między protonami (L. Grigorenko)

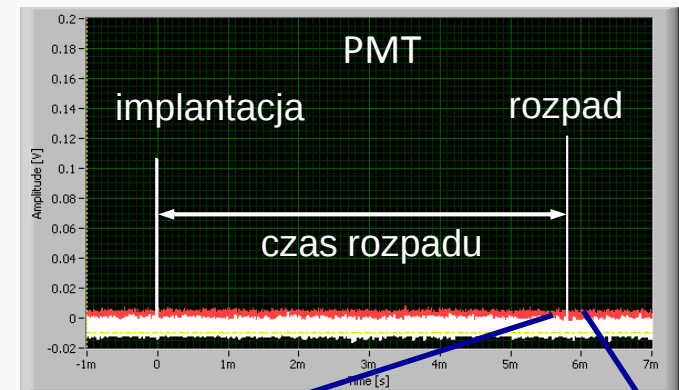
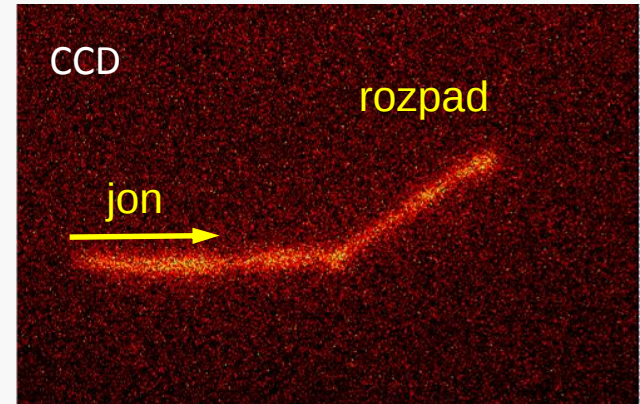
Warszawski detektor OTPC

W. Dominik → komora dryfowa z projekcją czasu

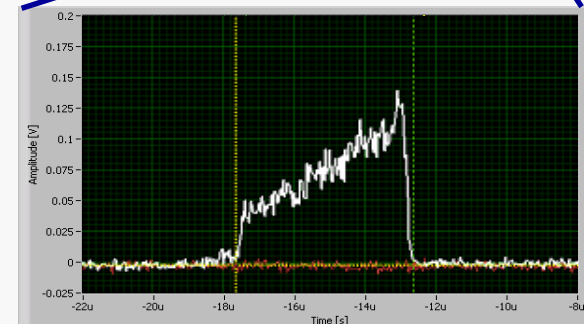


CCD → obraz rzutu torów na płaszczyznę poziomą

PMT → a) czasowa sekwencja zdarzeń,
b) rozkład jonizacji w kierunku pionowym

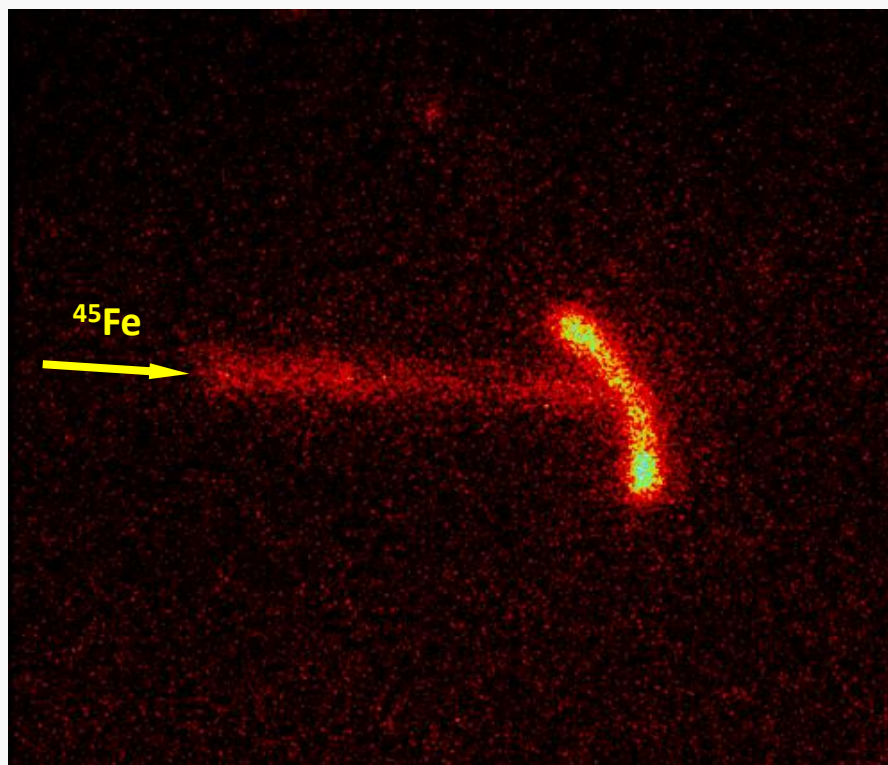


szczegóły rozpadu



Emisja $2p$ przez ^{45}Fe

NSCL/MSU, 2007: ^{58}Ni @ 161 MeV/u + $^{\text{nat}}\text{Ni}$ $\rightarrow$ ^{45}Fe

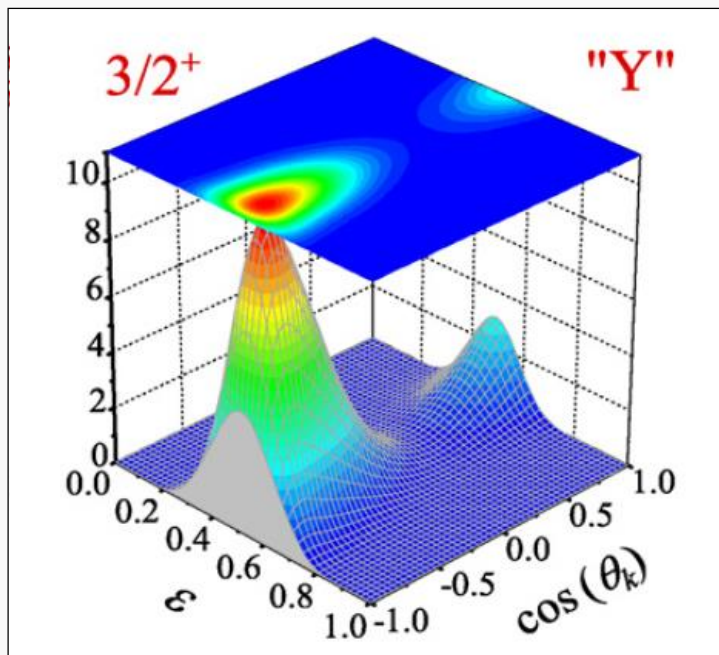


Miernik et al., PRL 99 (2007) 192501

87 zdarzeń emisji $2p$
udało się zrekonstruować

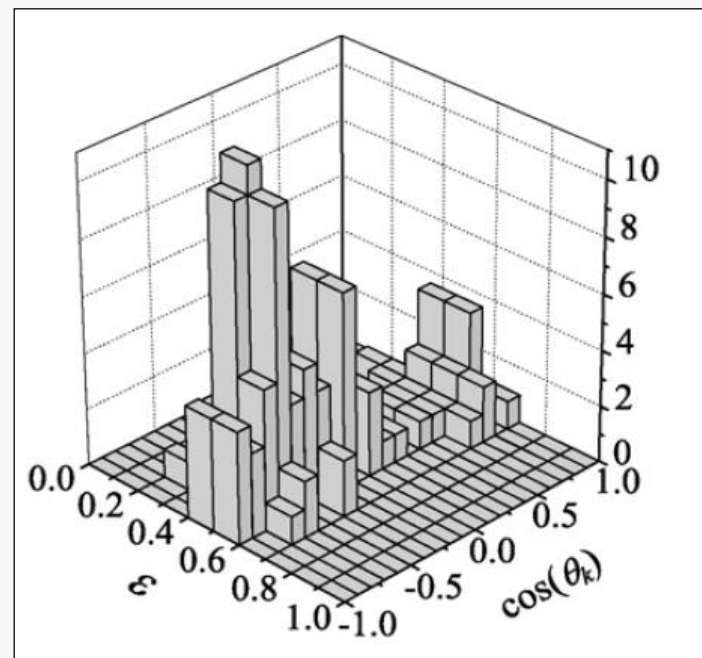
Korelacje między protonami dla ^{45}Fe

Przewidywanie



Grigorenko and Zhukov, Phys. Rev. C 68 (2003) 054005

Eksperyment

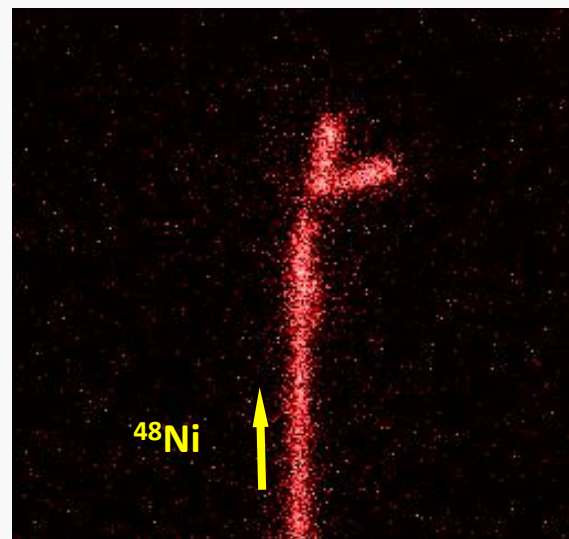
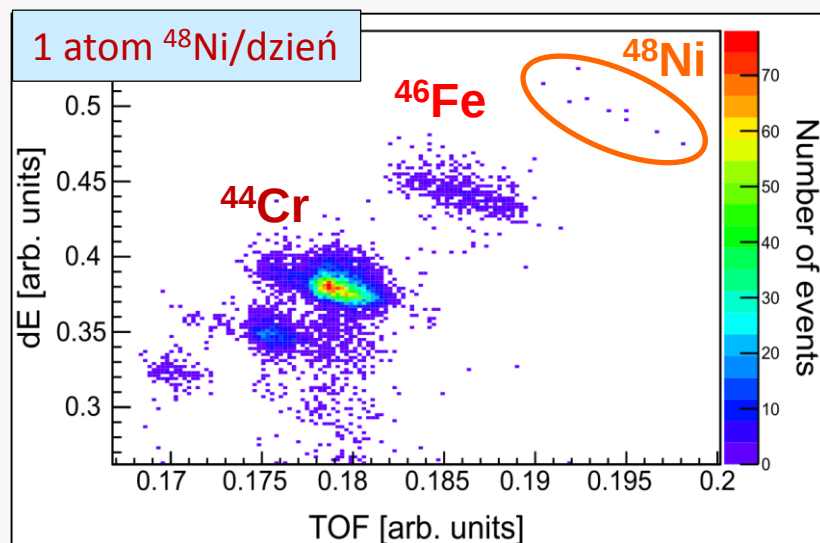


Miernik *et al.*, EPJA 42 (2009) 431

Emisja 2p ma charakter trójciałowy
Obraz korelacji zależy od struktury stanu początkowego

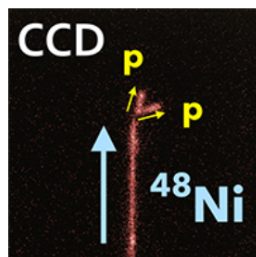
Odkrycie emisji 2p w ^{48}Ni

NSCL/MSU, 2011: ^{58}Ni @ 161 MeV/u + $^{\text{nat}}\text{Ni} \rightarrow ^{48}\text{Ni}$



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

Physical Review C 50th Anniversary Milestones



First observation of two-proton radioactivity in ^{48}Ni

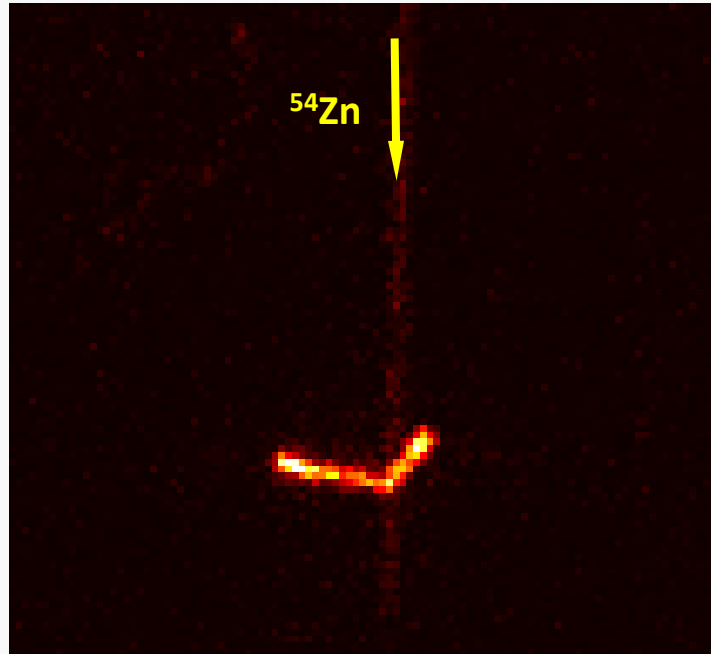
A rare form of radioactivity, in which a proton-laden nucleus decays toward stability via the simultaneous emission of two protons, was observed for ^{48}Ni . Using an optical time-projection chamber, the two-proton emission of four ^{48}Ni nuclei produced at the National Superconducting Cyclotron Laboratory was captured for the first time on CCD camera, marking a new era of optical detection of sub-atomic charged-particle processes in nuclear physics.

First observation of two-proton radioactivity in ^{48}Ni

M. Pomorski, M. Pfützner, W. Dominik, R. Grzywacz, T. Baumann, J. S. Berryman, H. Czyrkowski, R. Dąbrowski, T. Ginter, J. Johnson, G. Kamiński, A. Kuźniak, N. Larson, S. N. Liddick, M. Madurga, C. Mazzocchi, S. Mianowski, K. Miernik, D. Miller, S. Paulauskas, J. Pereira, K. P. Rykaczewski, A. Stolz, and S. Suchyta

Badanie emisji $2p$ w ^{54}Zn

RIKEN, 2019: ^{78}Kr @ 350 MeV/u + ^9Be $\rightarrow$ ^{54}Zn



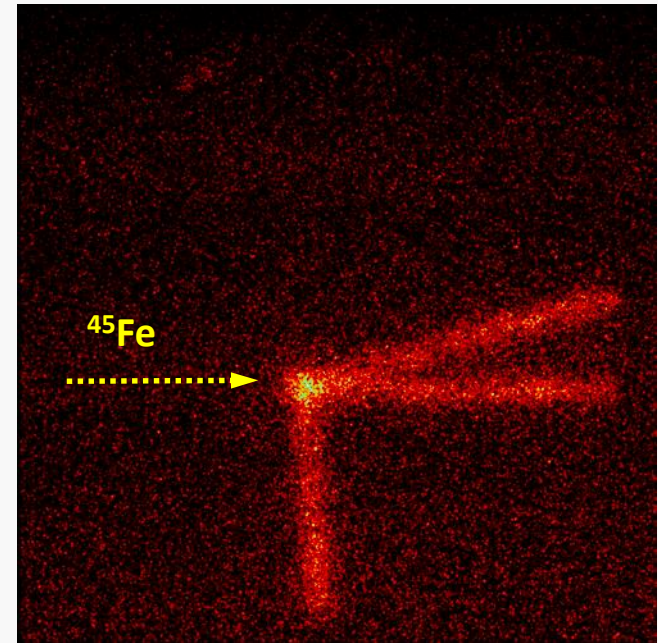
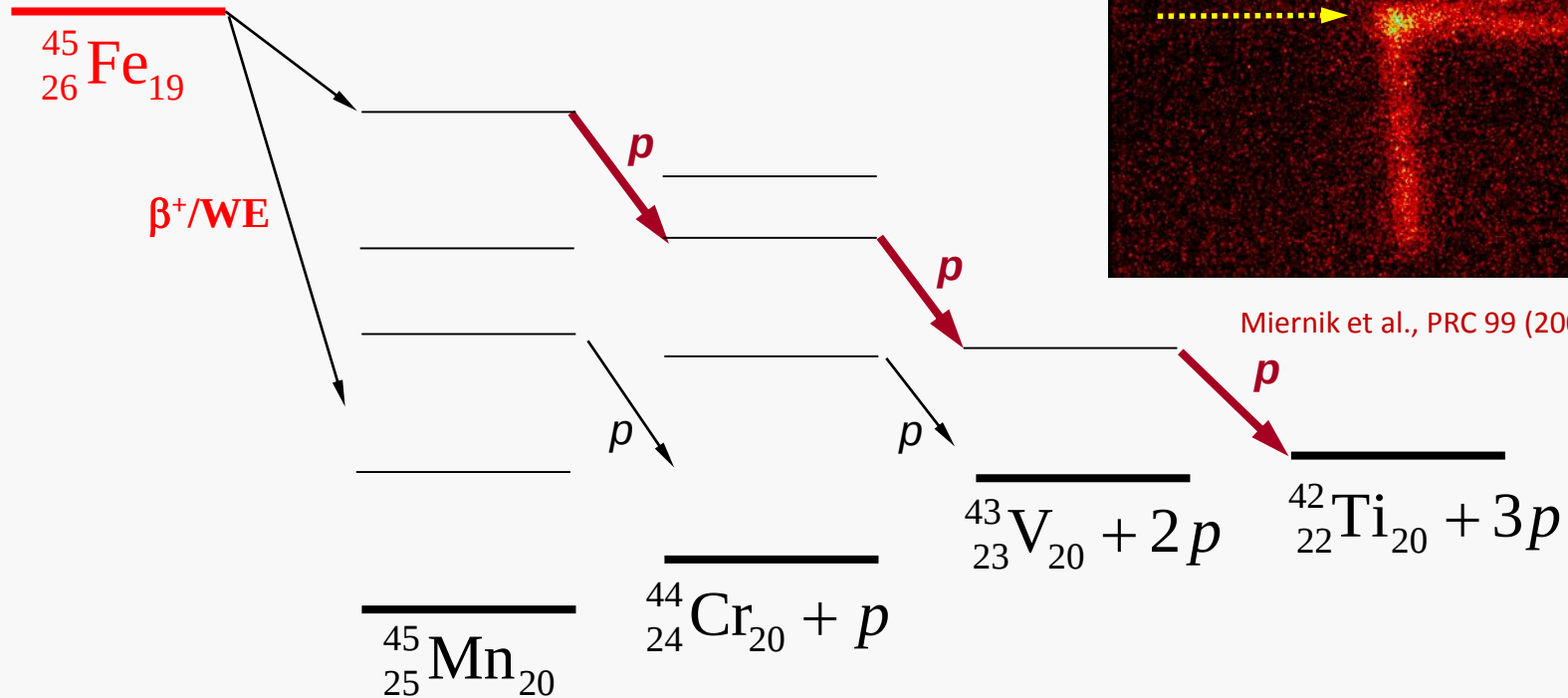
Kubiela et al., to be published

Zebrana statystyka dla ^{48}Ni i ^{54}Zn jest zbyt mała
Czekamy na laboratoria kolejnej generacji (FRIB, FAIR?)

Przemiana β z emisją protonów

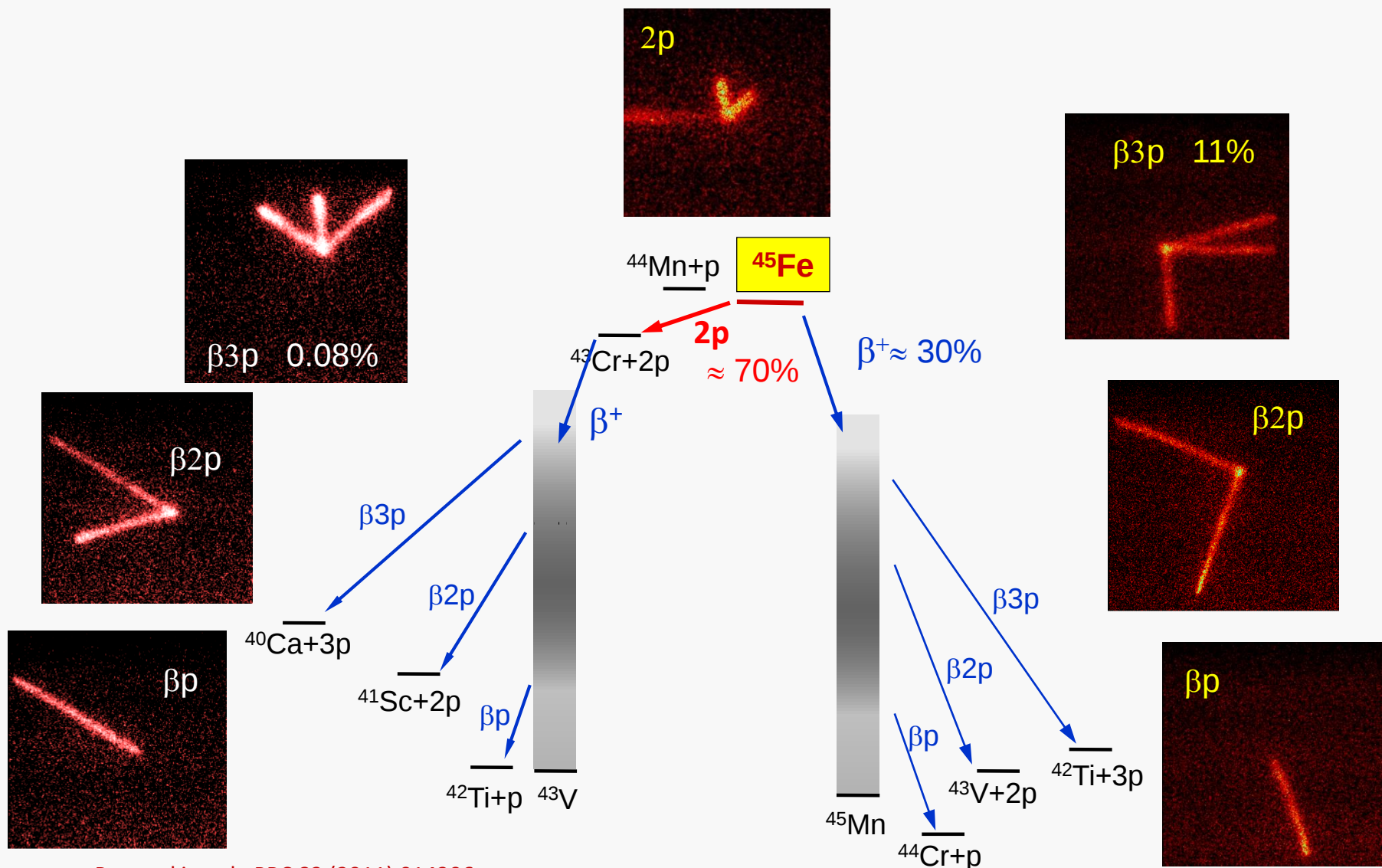
Przemiana β może prowadzić do stanów wzbudzonych, w których proton jest niezwiązany. Występuje wtedy zjawisko opóźnionej emisji protonu (βp)

$$T_{1/2} = 2.6(2) \text{ ms}$$



Miernik et al., PRC 99 (2007) 041304R

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

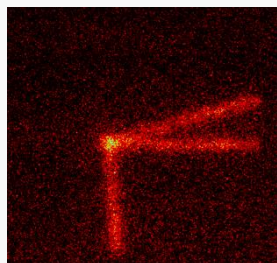


Pomorski et al., PRC 83 (2011) 014306

Miernik et al., PRL 99 (07) 192501

Miernik et al., PRC 99 (2007) 041304R

Wszystkie przypadki przemiany $\beta 3p$



^{45}Fe

NSCL 2007

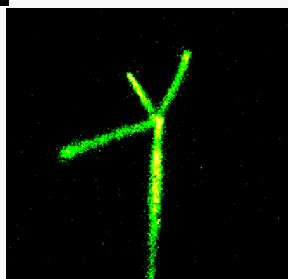
Miernik et al., PRC 76 (2007) 041304(R)



^{43}Cr

NSCL 2007

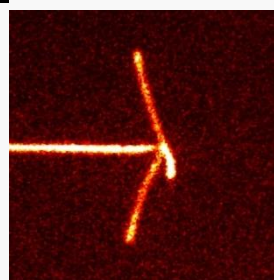
Pomorski et al., PRC 83 (2011) 014306



^{31}Ar

GSI 2012

Lis et al., PRC 91 (2015) 064309



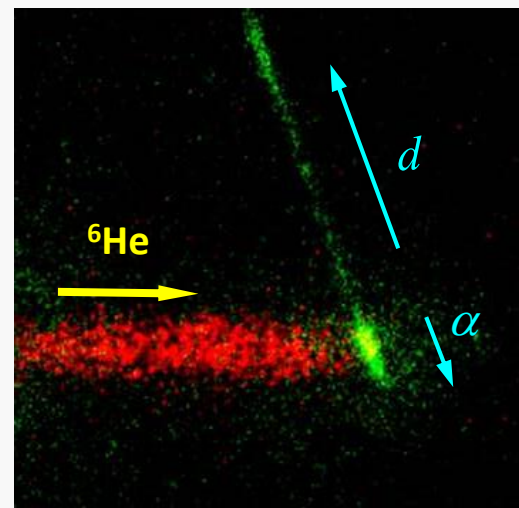
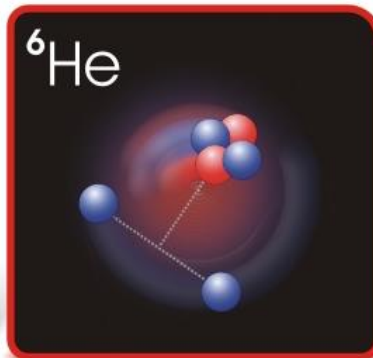
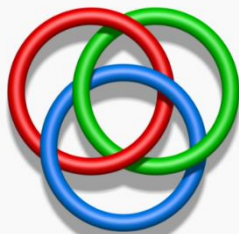
^{23}Si

Texas A&M 2017

Ciemny et al., to be published

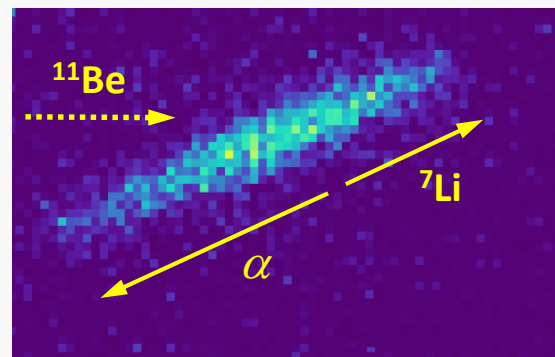
Inne przypadki emisji cząstek po przemianie β

- Badanie halo neutronowego w ${}^6\text{He}$.
Z prawdopodobieństwem $\approx 10^{-6}$ po przemianie β następuje emisja $d + \alpha$



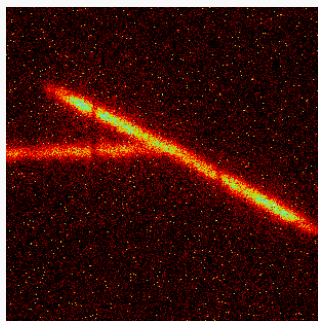
MP et al., PRC 92 (2015) 014316

- Badanie halo neutronowego w ${}^{11}\text{Be}$. Poszukujemy emisji opóźnionych protonów. Za to z prawdopodobieństwem $\approx 3\%$ występuje emisja opóźnionych cząstek α

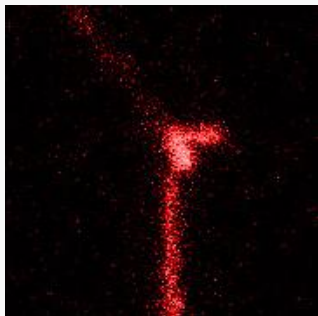


Sokołowska et al., to be published

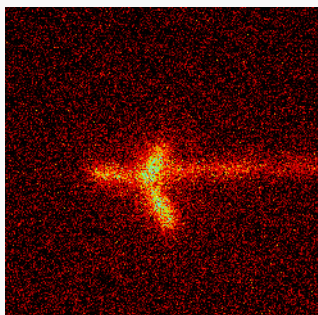
Podsumowanie



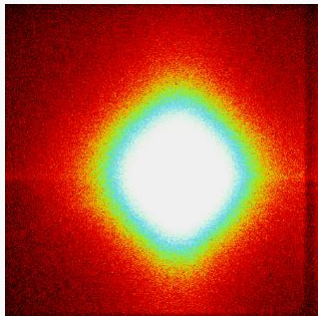
Świat nuklidów ciągle się poszerza, w ostatnich kilkunastu latach w tempie ok. 30/rok



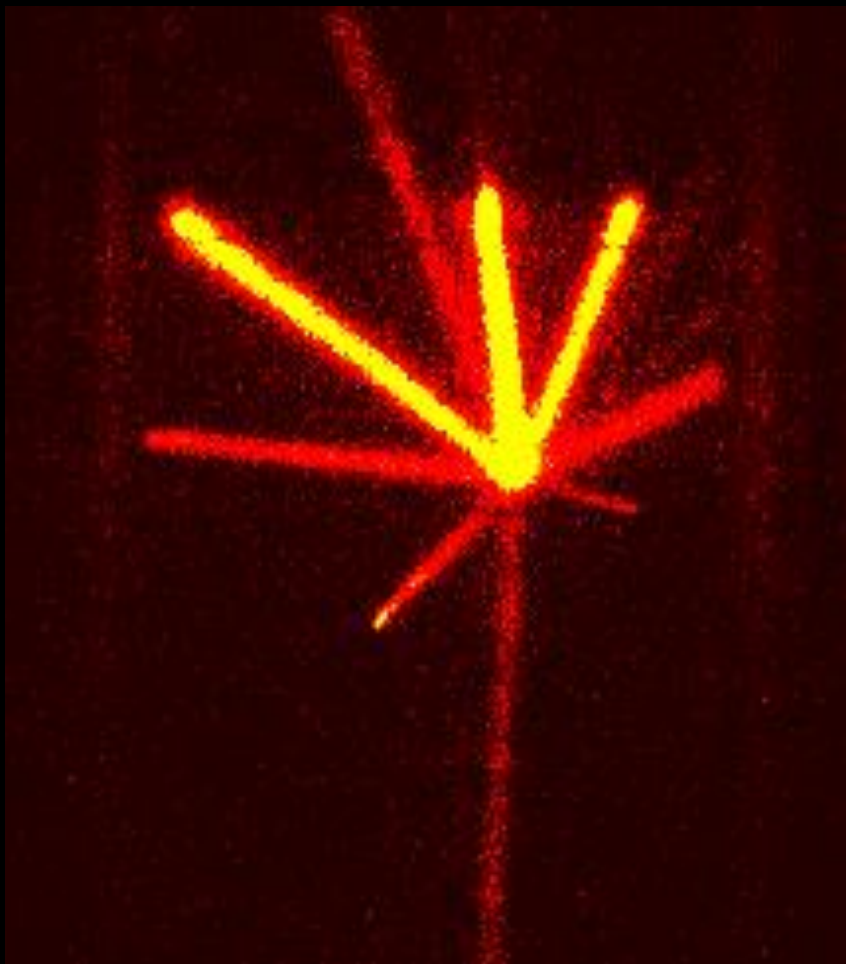
Na granicach tego świata występują nowe procesy, jak bezpośrednia lub opóźniona emisja cząstek



Badanie nuklidów egzotycznych i ich rozpadów jest konieczne do zrozumienia np. kosmicznej nukleosyntezy



Zbudowaliśmy bardzo czuły i wydajny instrument (OTPC), który pozwala odkrywać nowe rozpady promieniotwórcze i zdobywać pierwsze informacje o nich



→ Plakaty: A. Giska (18:30)
A. Kubiela (19:30)

