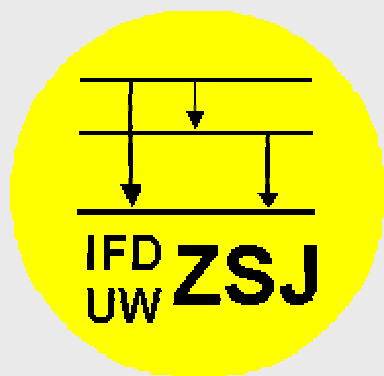


Nuklidy egzotyczne

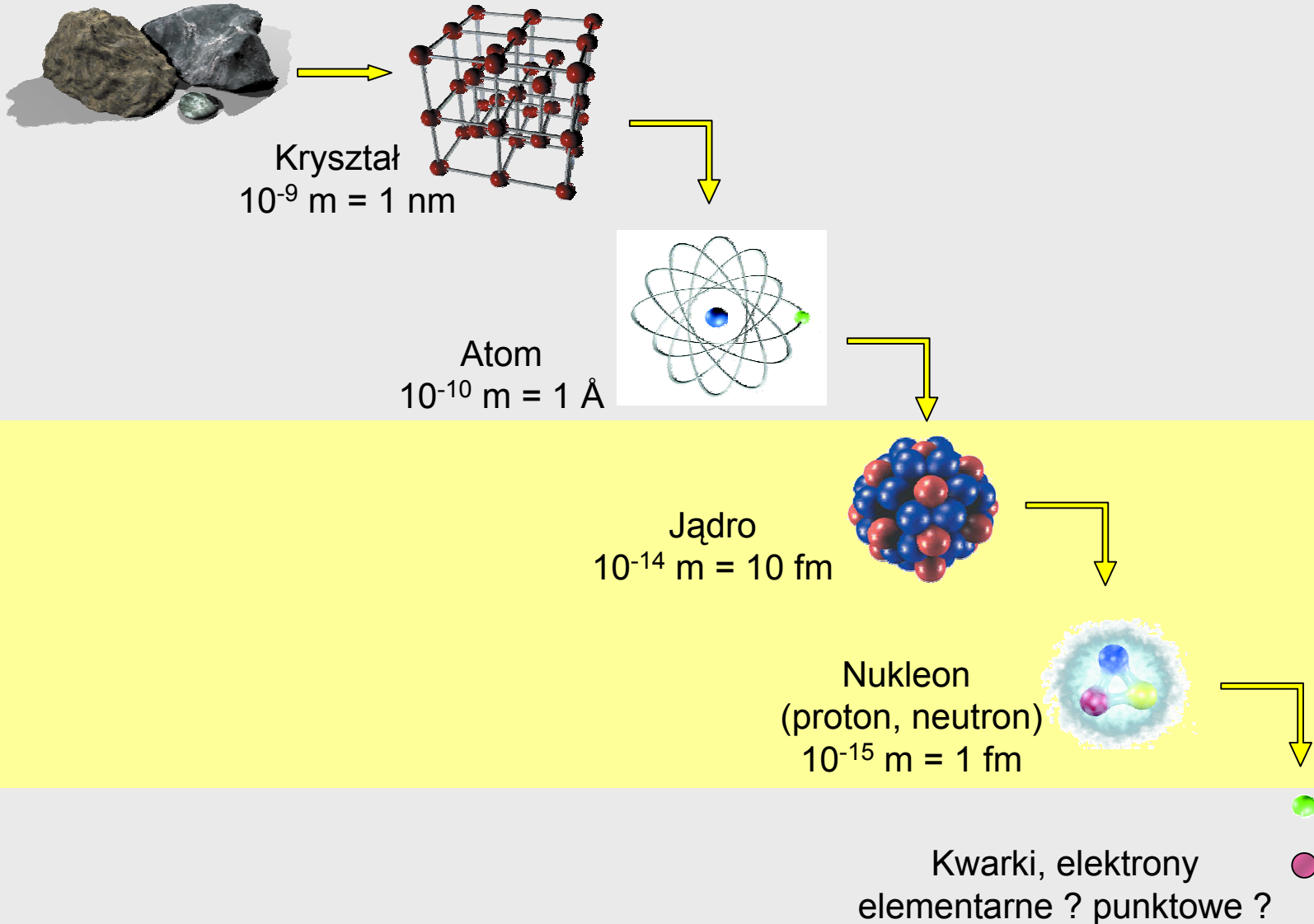


Marek Pfützner

Zakład Spektroskopii Jądrowej
Instytut Fizyki Doświadczalnej UW

e-mail: pfutzner@mimuw.edu.pl

„Poziomy” materii



Nuklidy

Nuklid (elektrycznie obojętny atom) :

Z protonów + N neutronów + Z elektronów

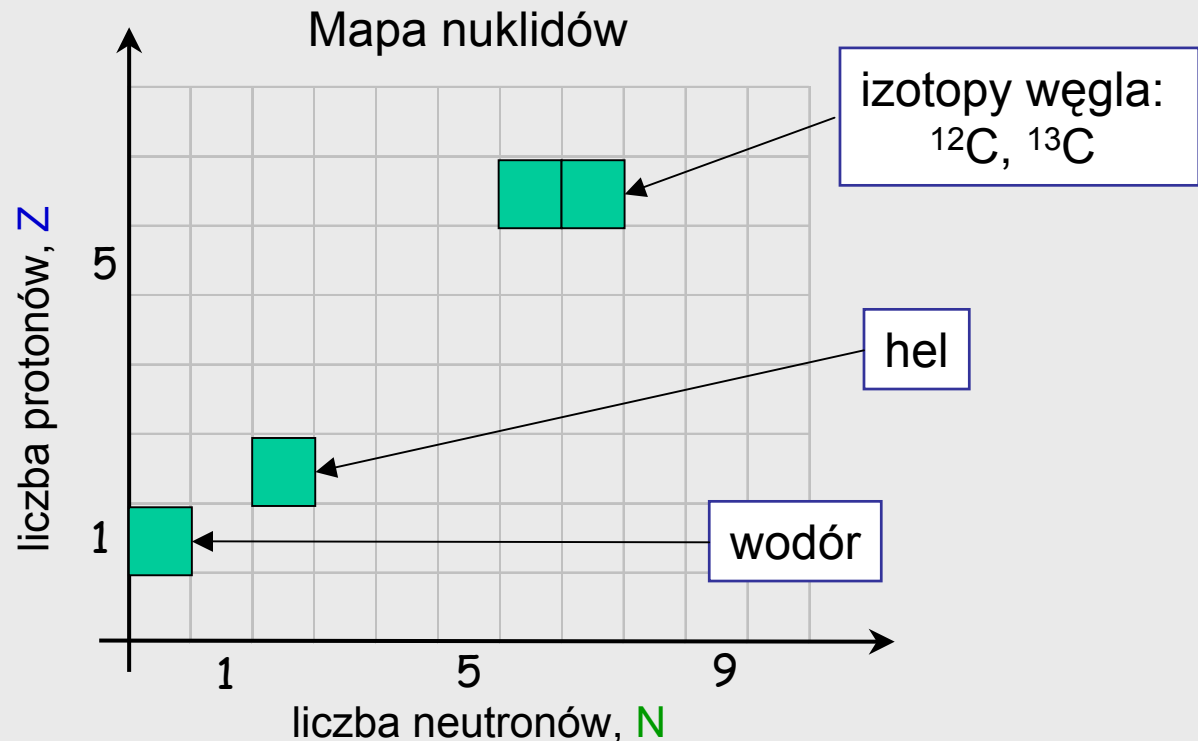
Liczba Z decyduje o właściwościach chemicznych

→ pierwiastki chemiczne

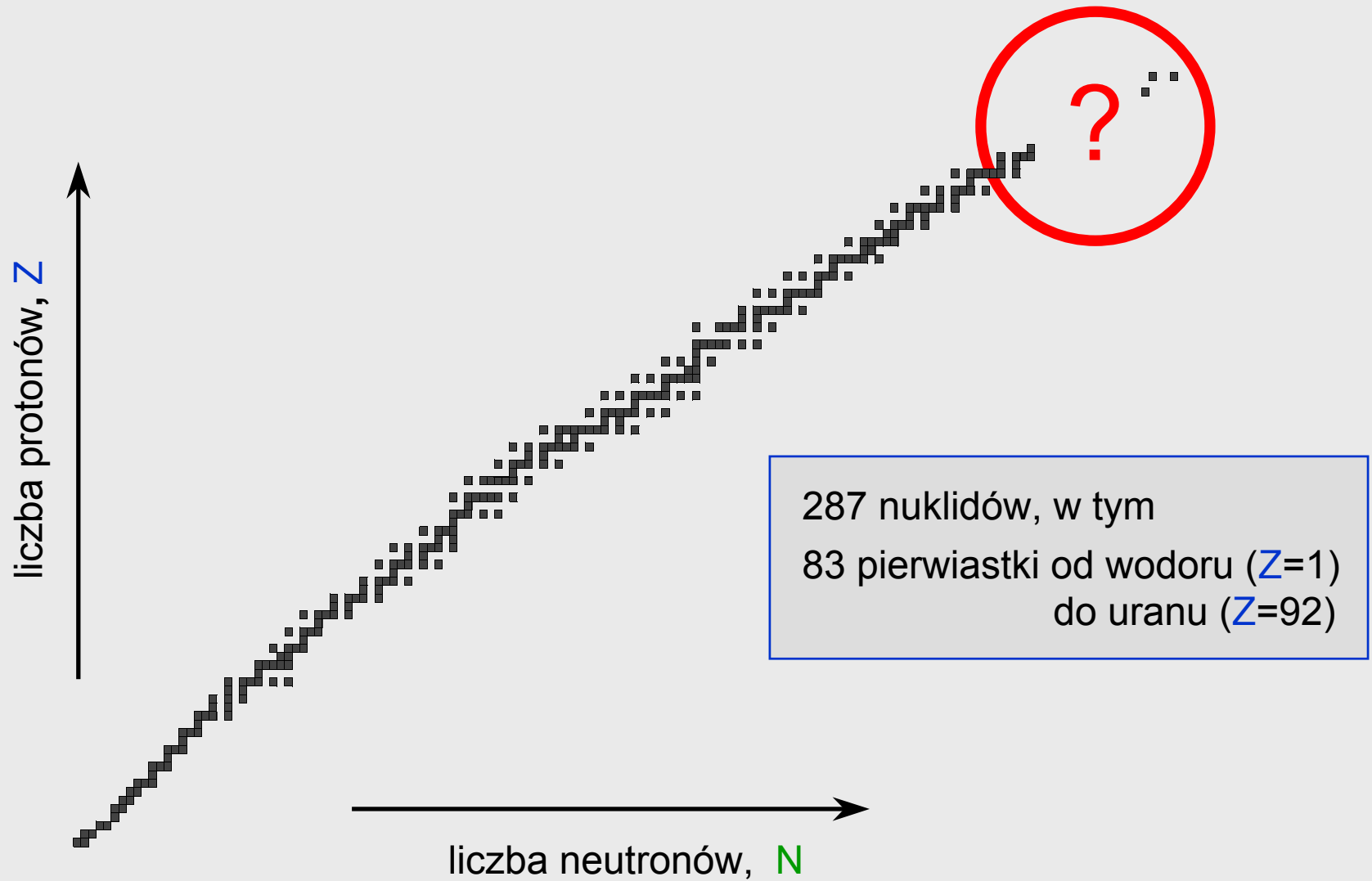
Różne liczby N → izotopy

$$m_p = 1.672 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ = 938.3 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 1.674 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ = 939.6 \text{ MeV}/c^2$$

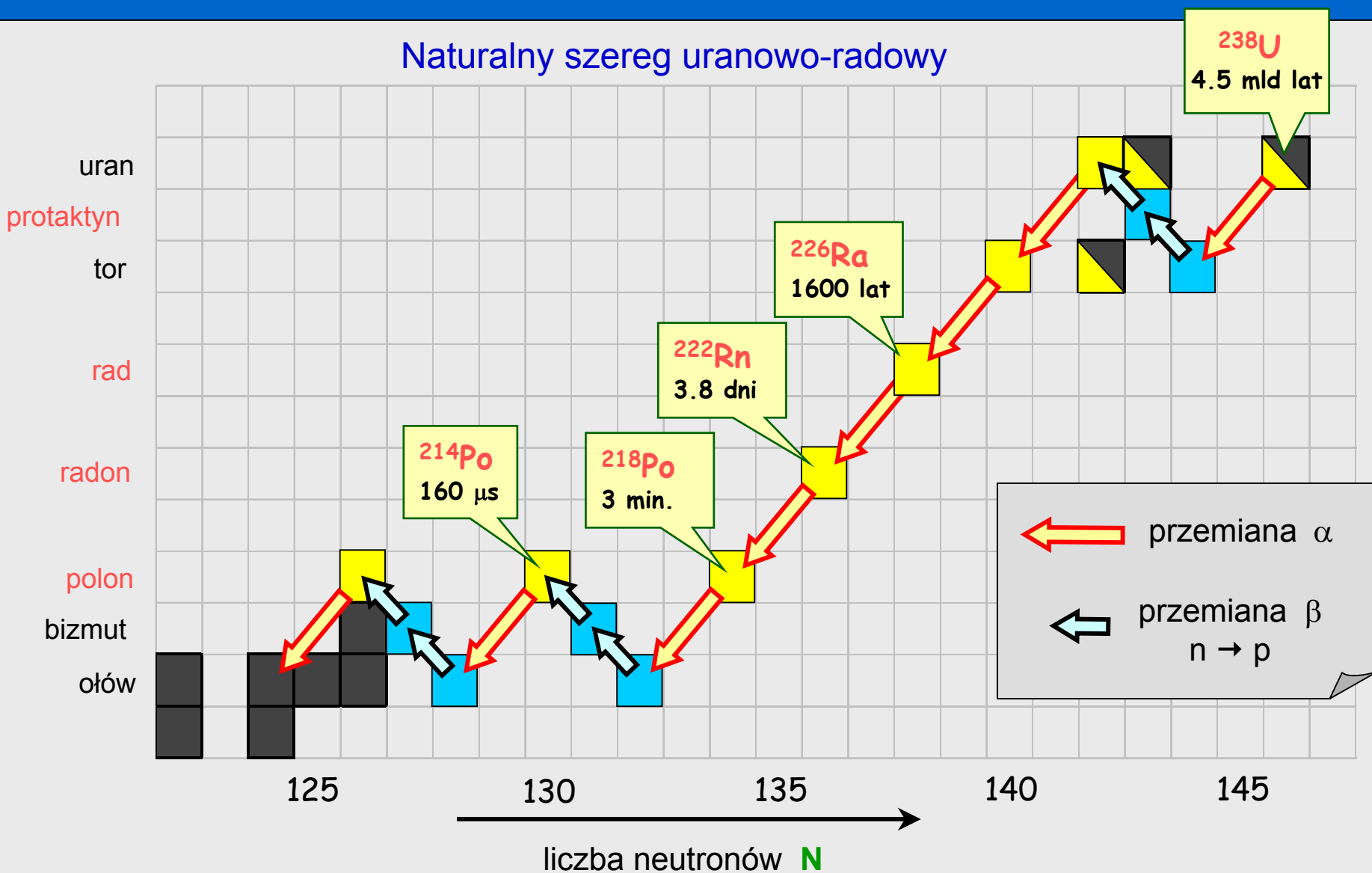


Nuklidy trwałe

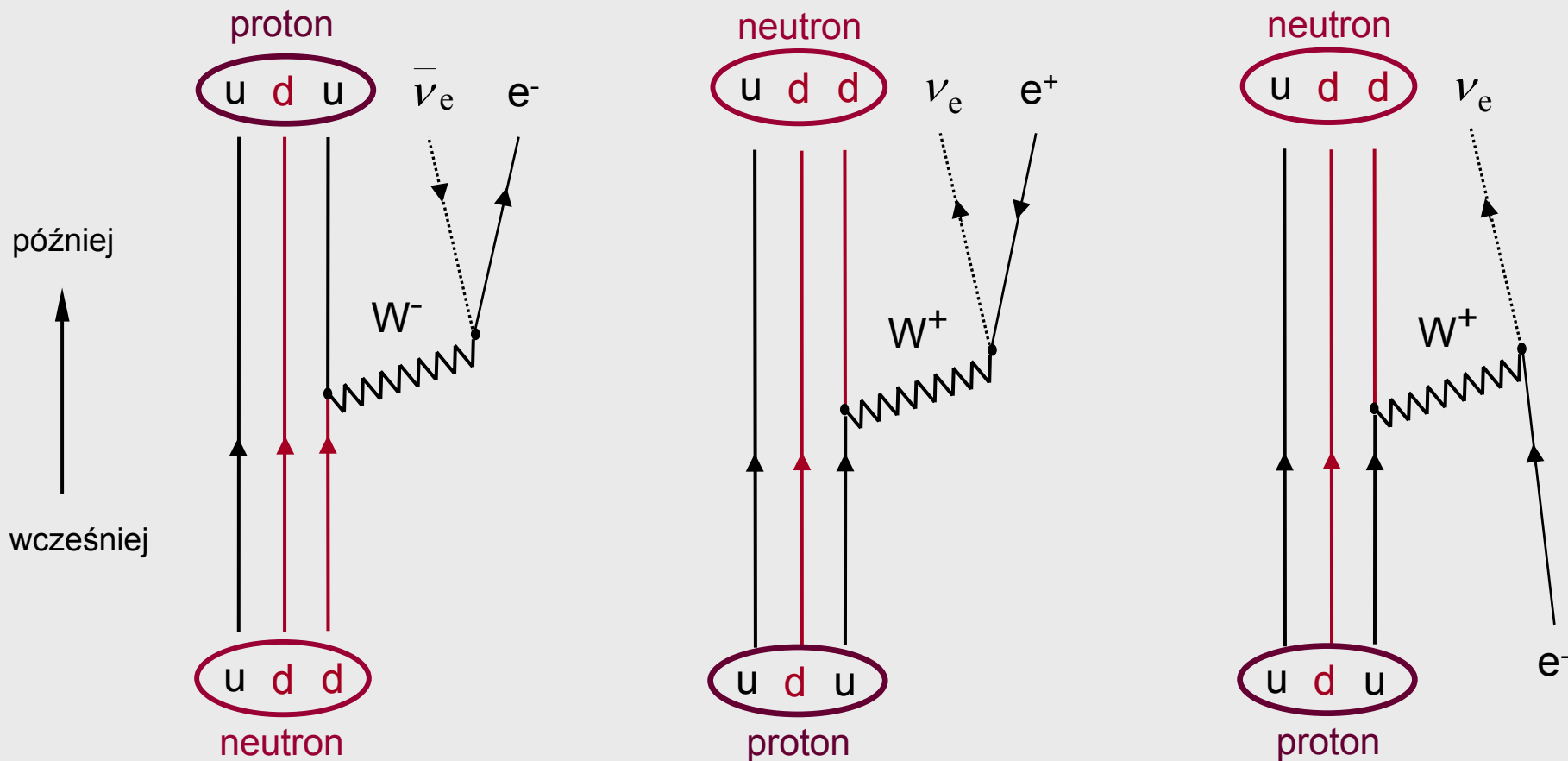


Nuklidy promieniotwórcze

Naturalny szereg uranowo-radowy



Przemiana β – oddziaływania słabe



Rozpad β^- neutronu

$$M(n) > M(p)$$

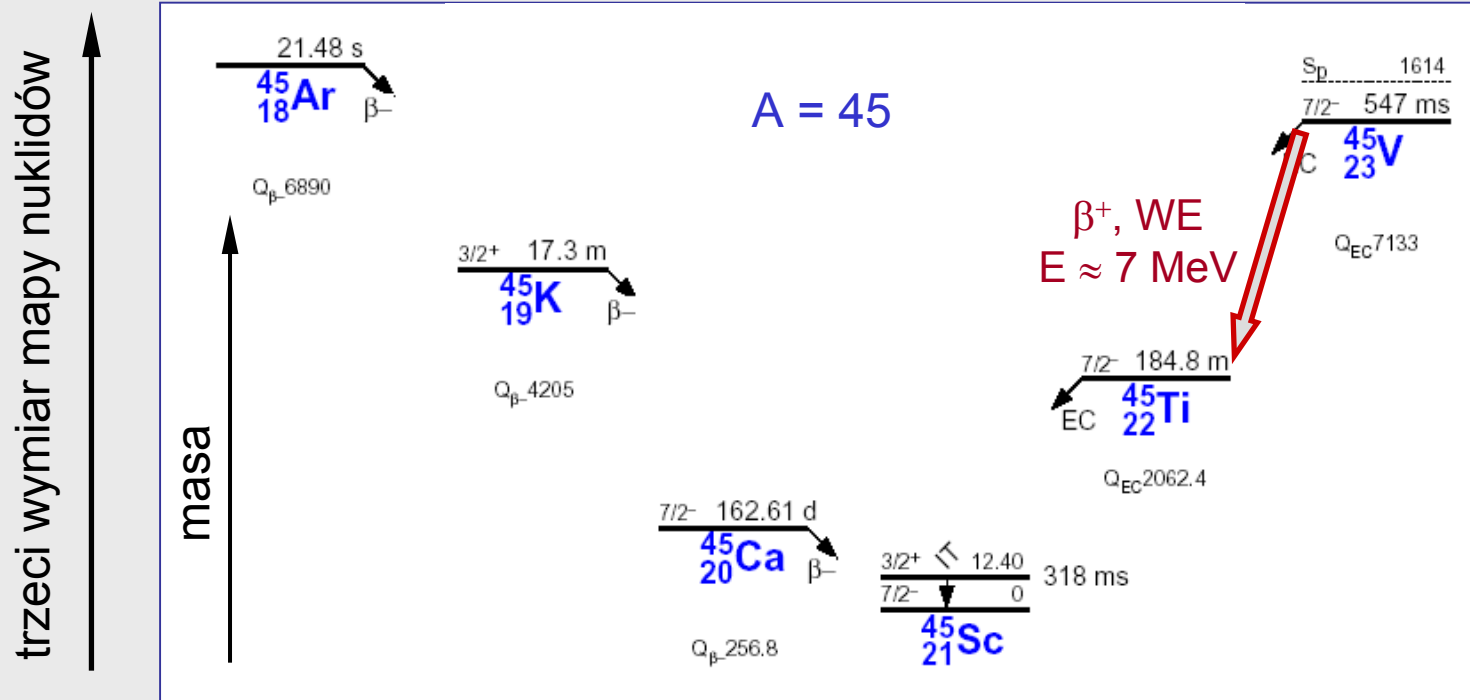
Rozpad β^+ protonu

Jak to możliwe ???

Wychwyt elektronu

Przemiany β jąder

Zbiór nuklidów o tej samej liczbie nukleonów (izobary)



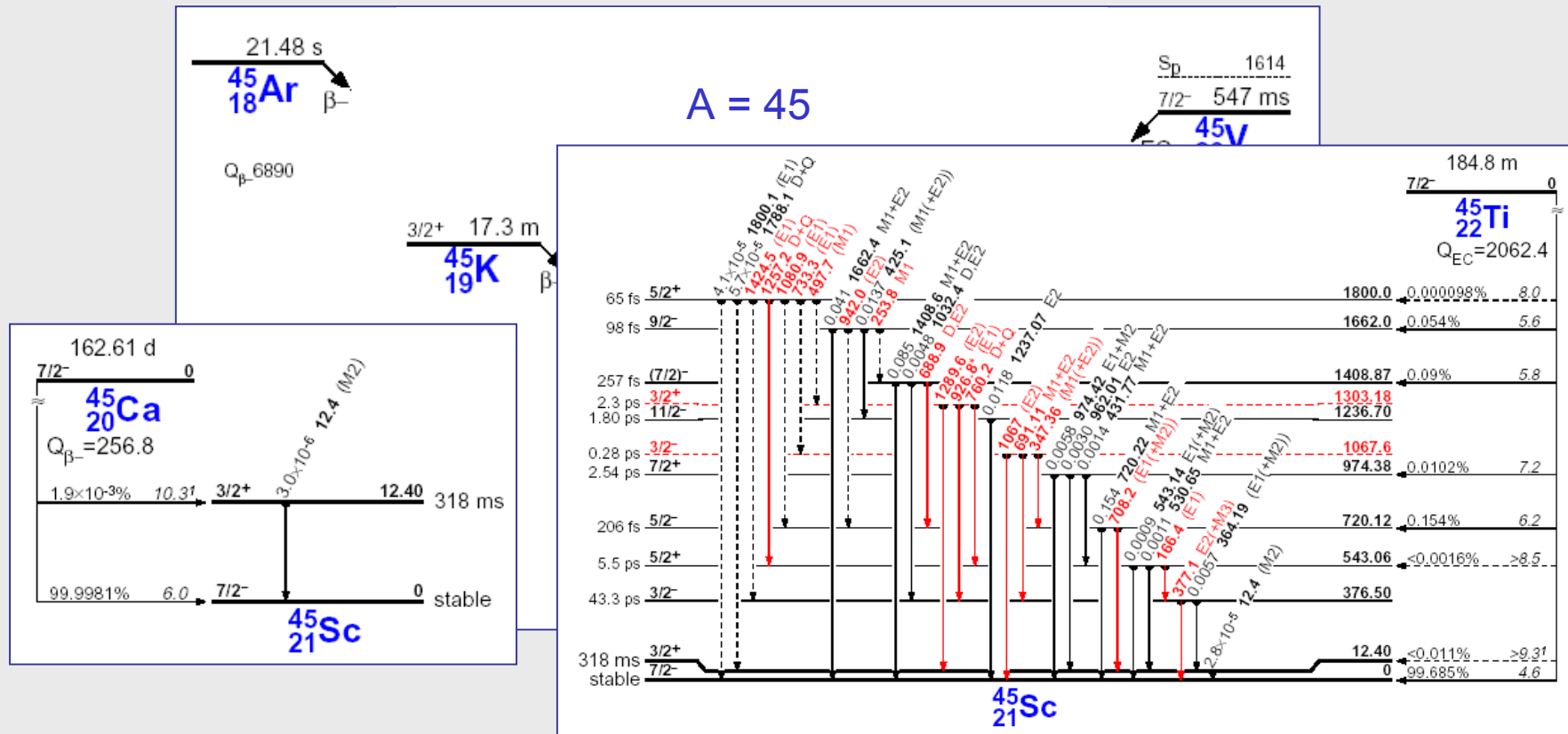
$M(^{45}\text{V}) > M(^{45}\text{Ti}) \rightarrow$ W przemianie $^{45}\text{V} \rightarrow ^{45}\text{Ti}$

może wydzielić się energia: $E = \Delta M \times c^2$

Teoria względności w działaniu!



Promieniowanie γ – oddziaływanie elektromagnetyczne



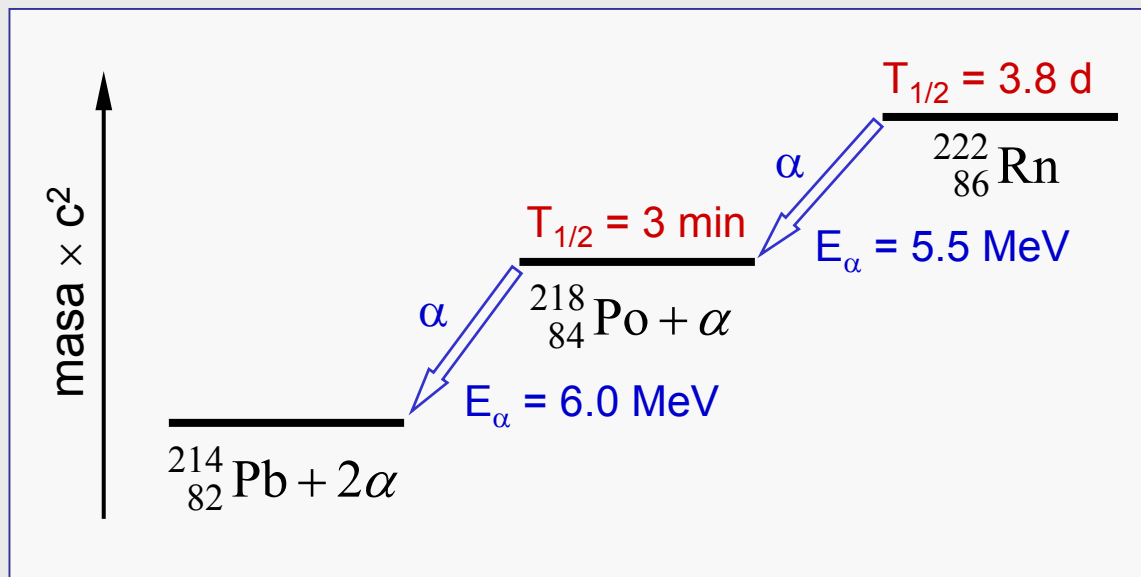
Jądro jest układem wielu cząstek, które poruszają się względem siebie, a zatem może mieć **stany wzbudzone** o dyskretnych energiach (tak jak atom).

Przejściom między tymi stanami towarzyszy emisja **promieniowania e-m** (γ)

Przemiana α – oddziaływanie silne

Cząstka α to jądro helu: $\alpha = {}^4_2\text{He}_2$

$$M_\alpha = 3728.4 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow 2 \times m_n + 2 \times m_p - M_\alpha = 27.4 \text{ MeV}/c^2 \quad (\text{energia wiązania!})$$



$$E_\alpha \approx \Delta M \times c^2$$

$$E_\alpha = 5 \text{ MeV} \rightarrow \text{prędkość } v = 0.05 c = 15000 \text{ km/s} !$$

Zagadka okresów półrozpadu α

$$^{238}\text{U} : E_{\alpha} = 4.2 \text{ MeV}, T_{1/2} = 4.5 \text{ mld lat}$$

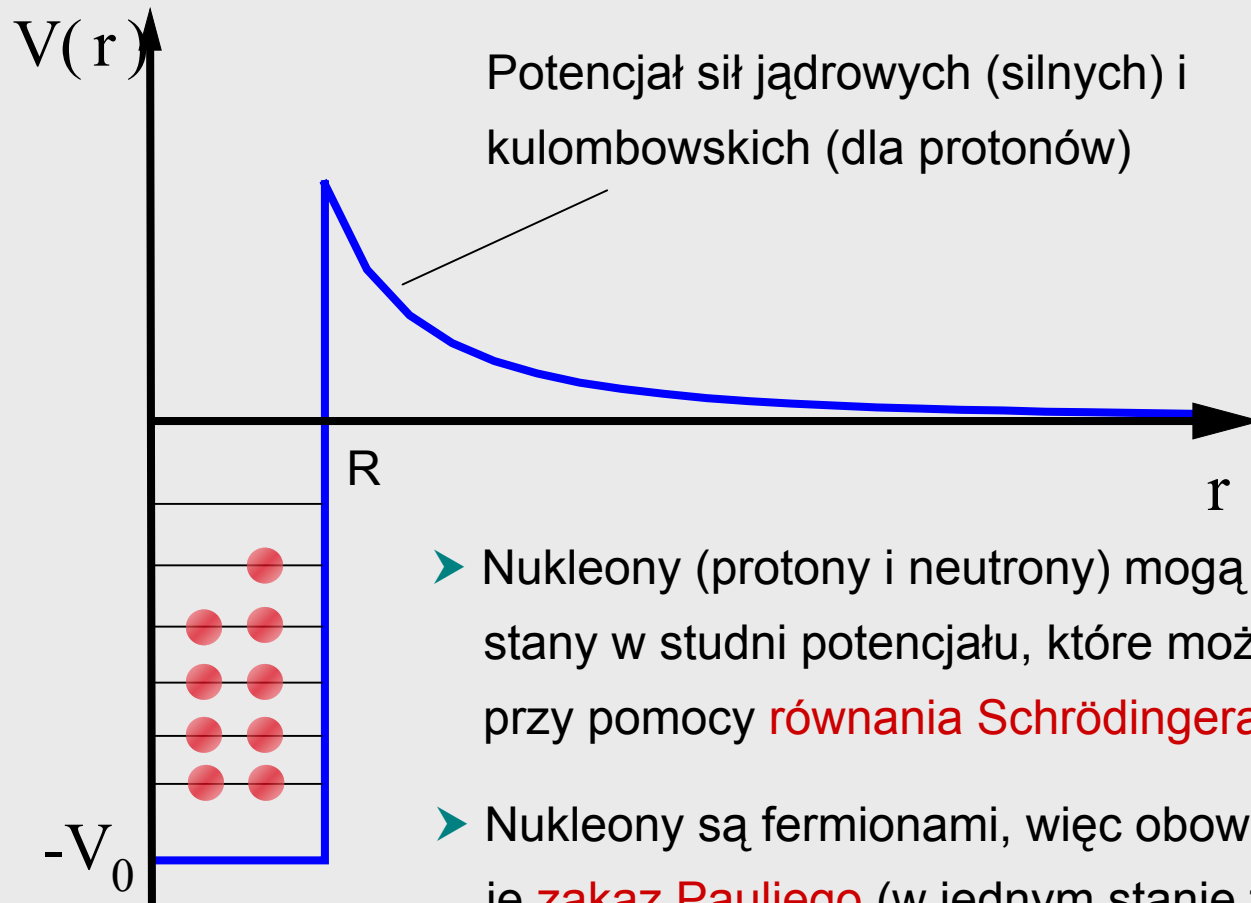
$$^{222}\text{Rn} : E_{\alpha} = 5.5 \text{ MeV}, T_{1/2} = 3.8 \text{ dni}$$

$$^{214}\text{Po} : E_{\alpha} = 7.7 \text{ MeV}, T_{1/2} = 164 \mu\text{s}$$

Dlaczego okresy półrozpadu tak bardzo się różnią ?

Zrozumienie zależności półokresu rozpadu od energii wymaga zastosowania innego wielkiego odkrycia fizyki XX w. : **mechaniki kwantowej**.

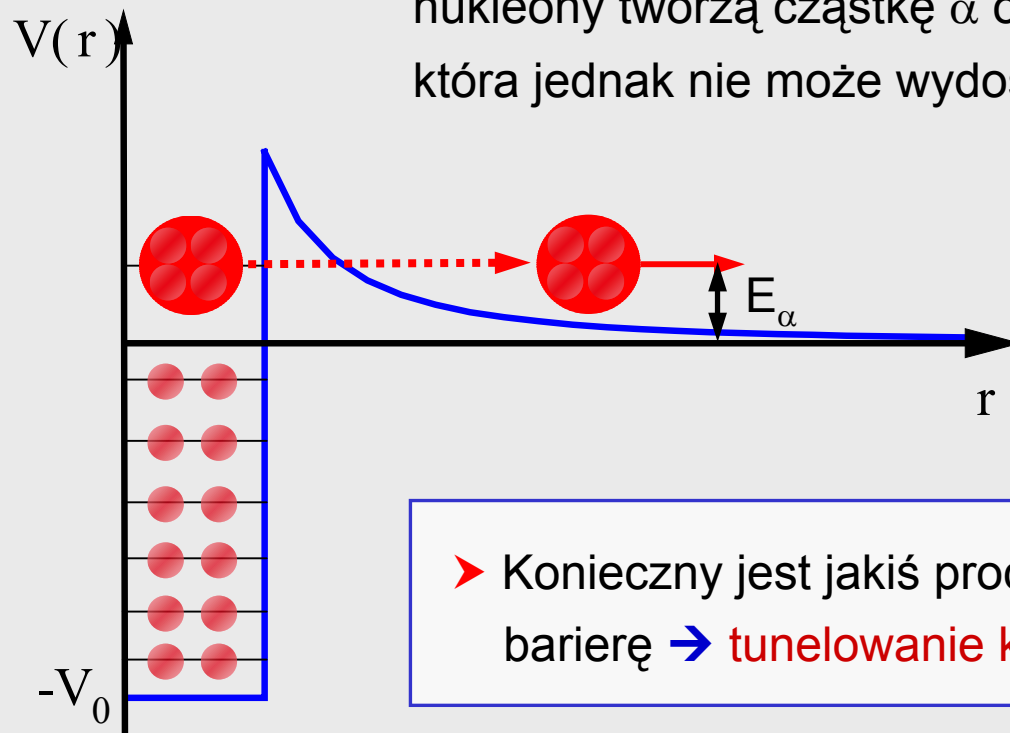
Jądro atomu to obiekt kwantowy



- Nukleony (protony i neutrony) mogą zajmować stany w studni potencjału, które można wyznaczyć przy pomocy **równania Schrödingera**.
- Nukleony są fermionami, więc obowiązuje **zakaz Pauliego** (w jednym stanie tylko jedna cząstka)!

Jak zachodzi emisja α ?

- W jądrze nietrwałym ze względu na przemianę α nukleony tworzą cząstkę α o dodatniej energii, która jednak nie może wydostać się z jamy potencjału!



- Konieczny jest jakiś proces przejścia przez barierę → **tunelowanie kwantowe**

Model „minigolfowy”

Ruch ładunku w polu elektrycznym można zobrazować toczeniem się kulki po nierównej powierzchni.

Kulka wtacza się na wysokość odpowiadającą początkowej energii kinetycznej

^{218}Po

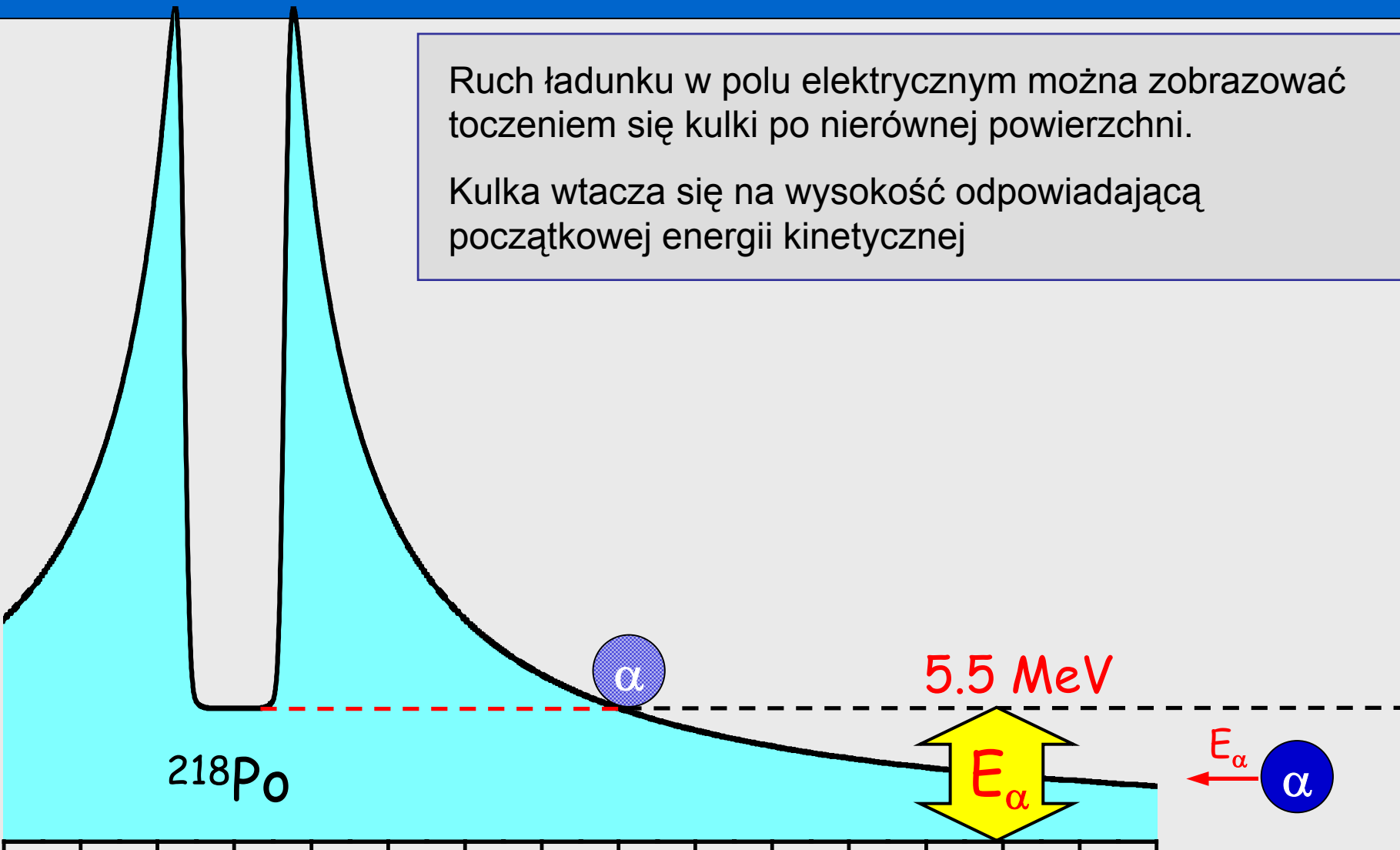
α

5.5 MeV

E_α

E_α

α



Model „minigolfowy”

Ruch ładunku w polu elektrycznym można zobrazować toczeniem się kulki po nierównej powierzchni.

Kulka wtacza się na wysokość odpowiadającą początkowej energii kinetycznej.

Staczając się z tej wysokości uzyskuje tę samą energię na końcu.

^{218}Po

α

5.5 MeV

E_α

α

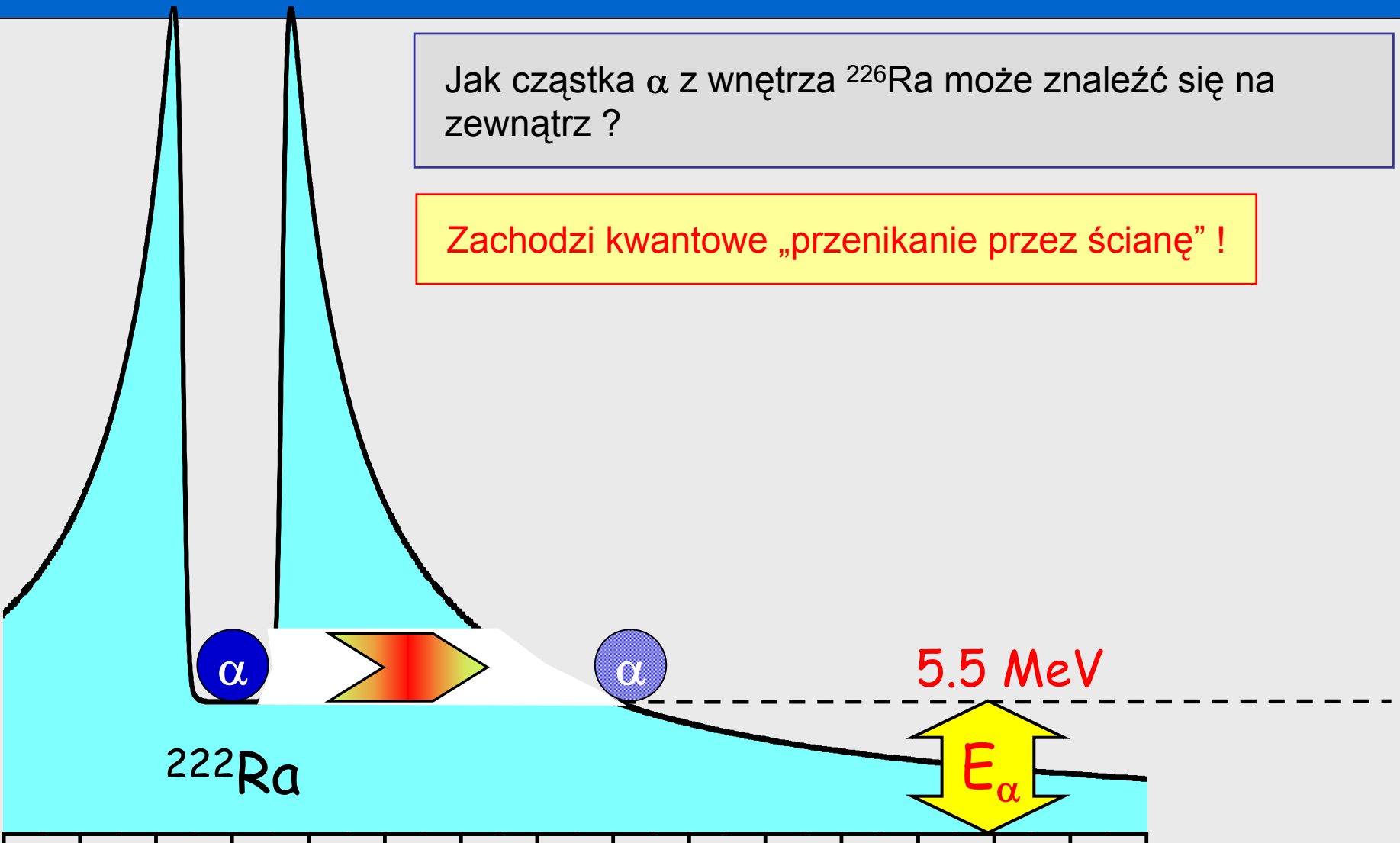
E_α



Model „minigolfowy”

Jak cząstka α z wnętrza ^{226}Ra może znaleźć się na zewnątrz ?

Zachodzi kwantowe „przenikanie przez ścianę” !

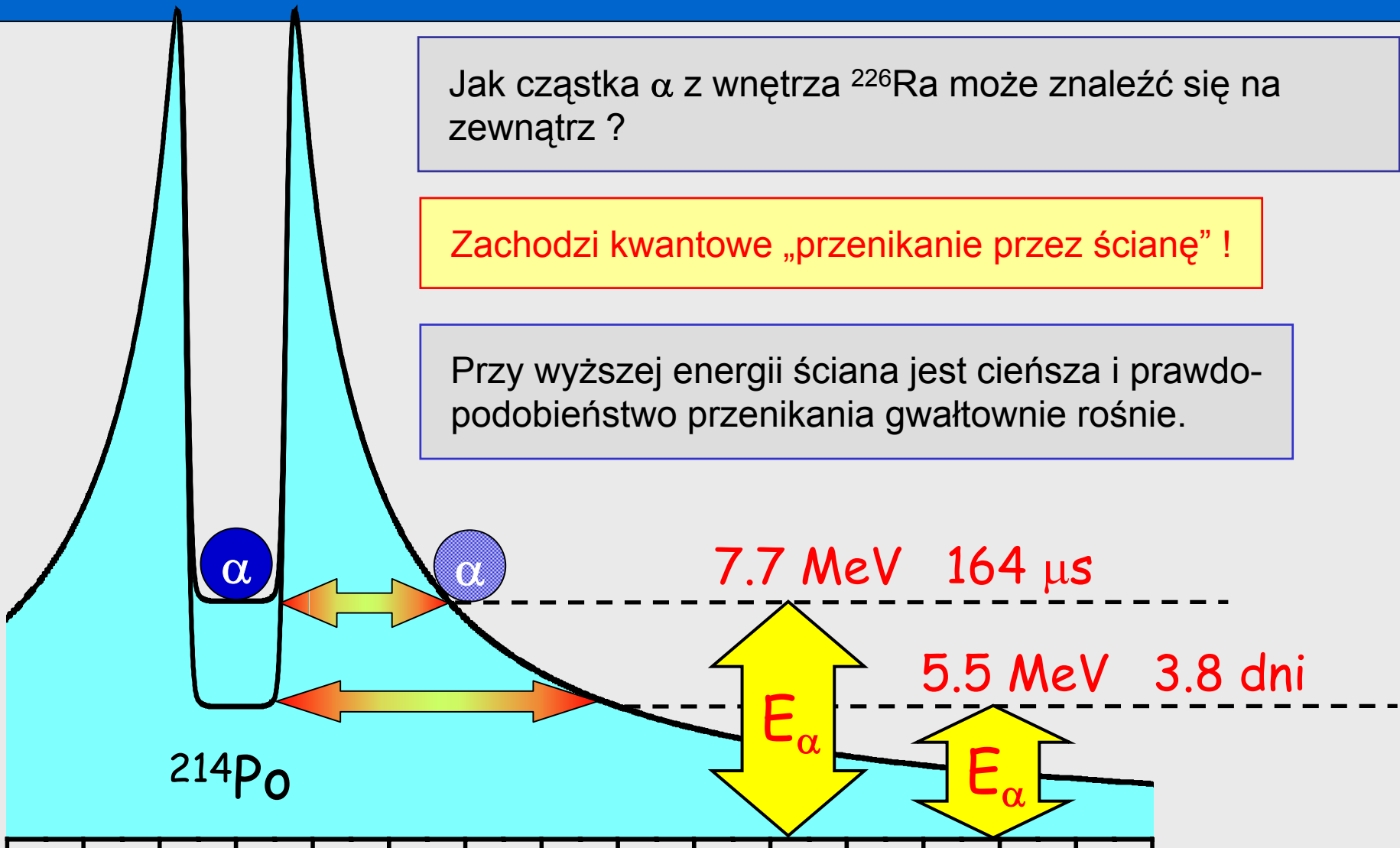


Model „minigolfowy”

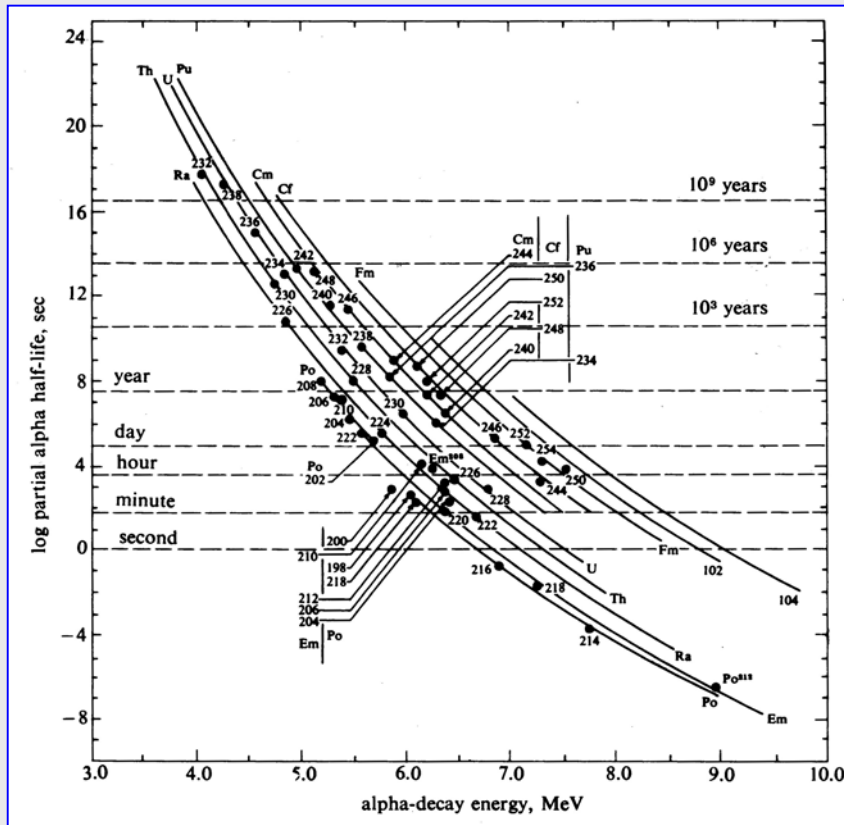
Jak cząstka α z wnętrza ^{226}Ra może znaleźć się na zewnątrz ?

Zachodzi kwantowe „przenikanie przez ścianę” !

Przy wyższej energii ściana jest cieńsza i prawdopodobieństwo przenikania gwałtownie rośnie.

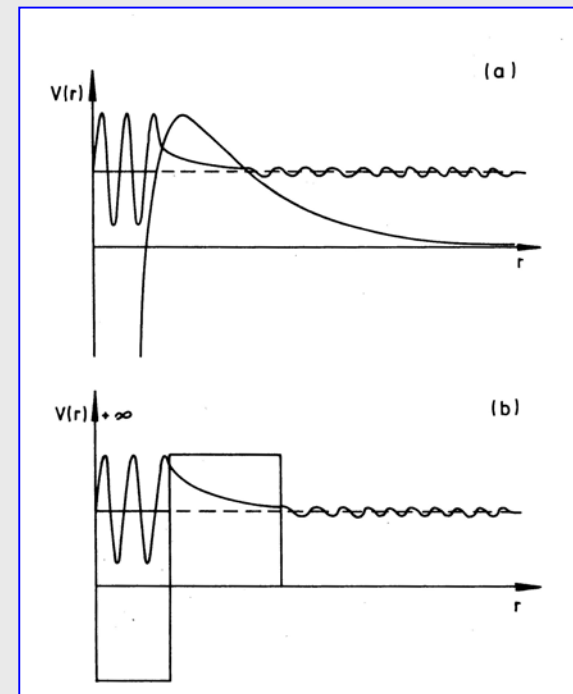


Prawo Geigera-Nutalla



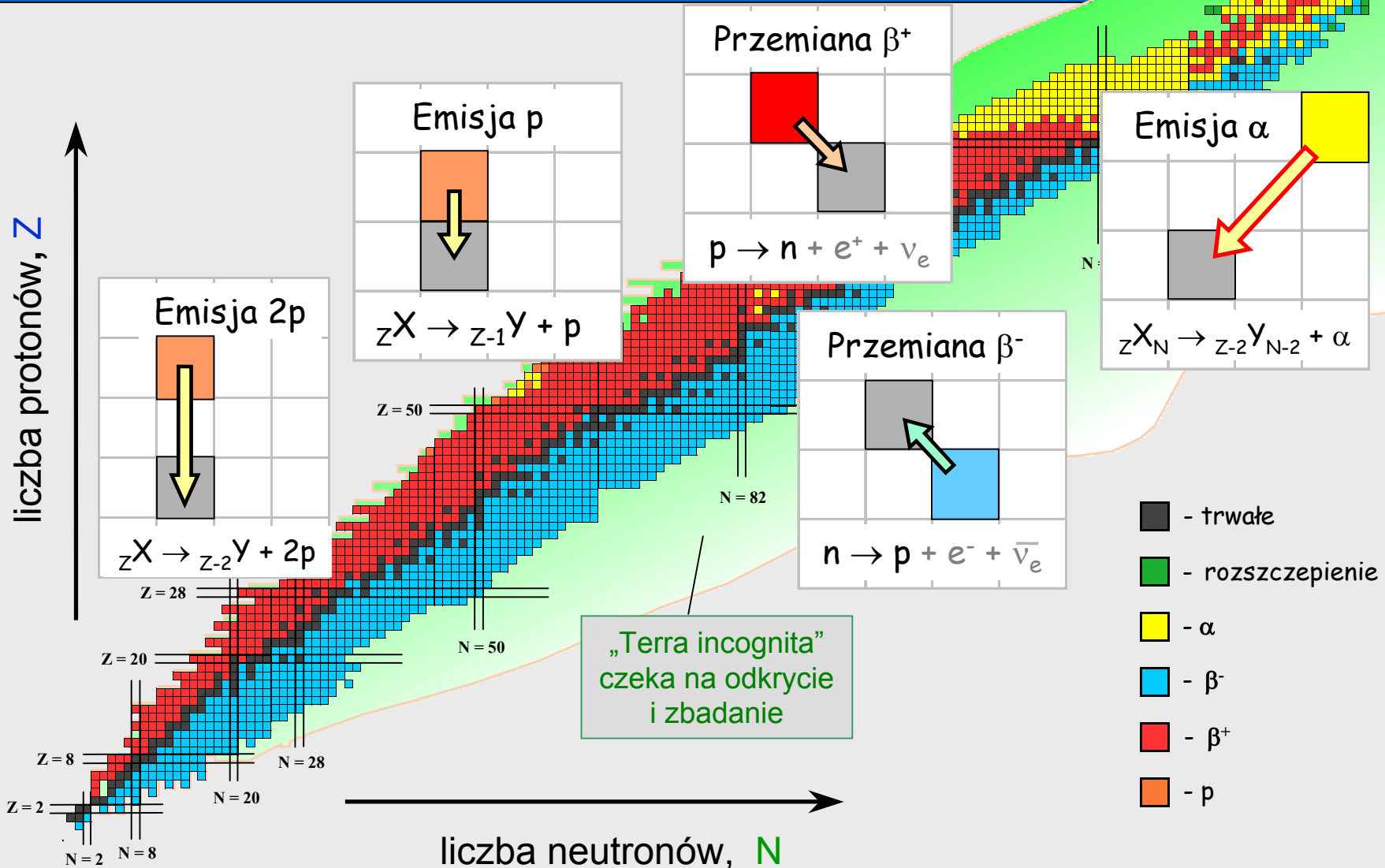
Prawo Geigera-Nutalla (1912)

$$\log T = a + \frac{b}{\sqrt{E_\alpha}}$$

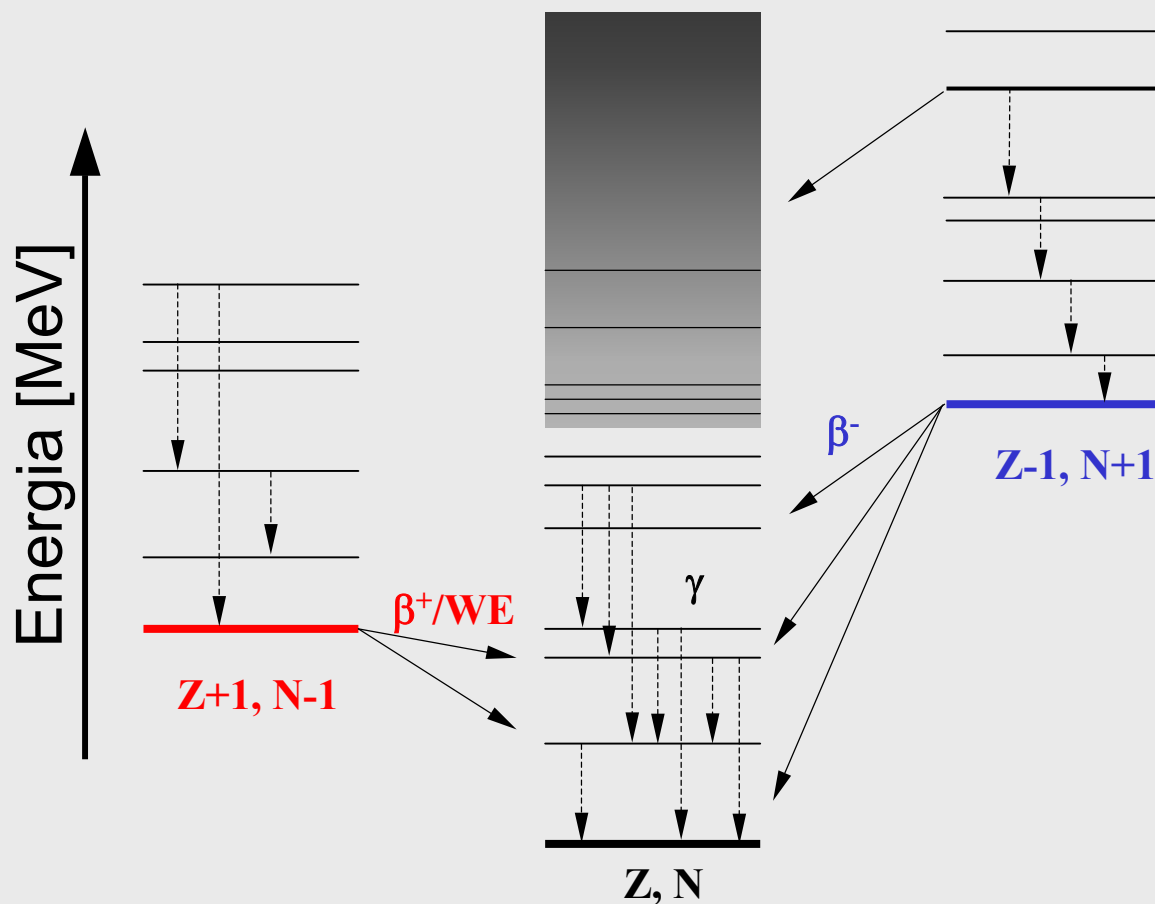


Wyjaśnienie kwantowe
G. Gamov, 1928

Wszystkie nuklidy



Spektroskopia jądrowa



Zadanie spektroskopii : poznać strukturę jąder badając przemiany zachodzące między ich stanami

Znaczenie fizyki jądrowej

- W przemianach jądrowych odgrywają rolę oddziaływania słabe, elektromagnetyczne i silne.
- Do opisu procesów jądrowych konieczna jest mechanika kwantowa. Potrzebna bywa też szczególna teoria względności. Istotne są prawa dotyczące układów wielu ciał.
- Dzięki wielkiemu bogactwu zjawisk, w jakich jądra atomowe biorą udział, są one ważnym obiektem badań podstawowych. Pełnią też istotną rolę w innych dziedzinach nauki i w zastosowaniach (fizyka materii skondensowanej, biologia, medycyna, technika...)

...i warto znać angielski 😊



Q: What did the Nuclear Physicist have for lunch?

A: Fission Chips.

Egzotyczne nuklidy (na skraju mapy)

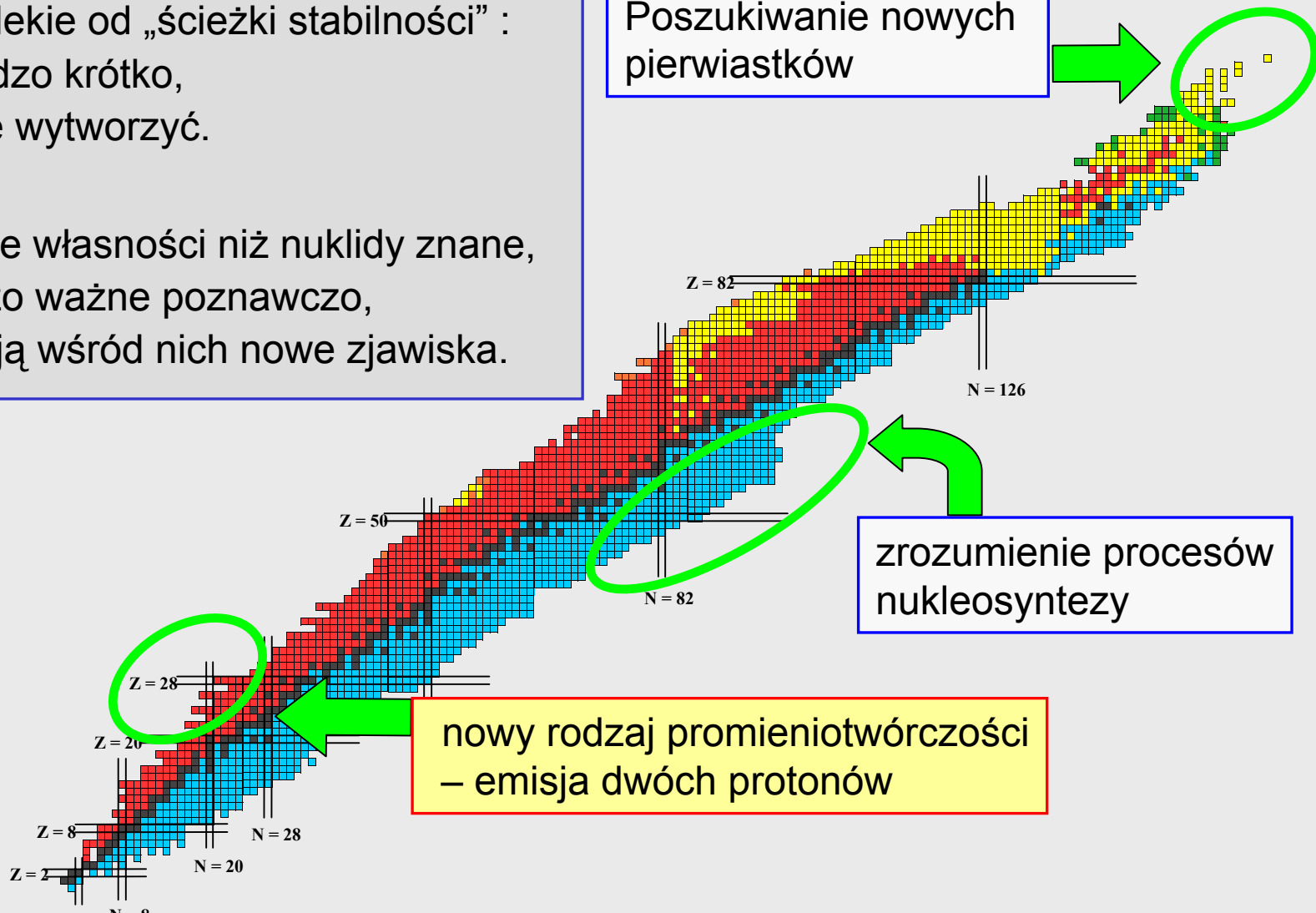
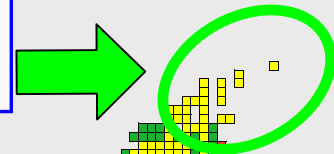
Nuklidy dalekie od „ścieżki stabilności” :

- żyją bardzo krótko,
- trudno je wytworzyć.

Ale :

- mają inne własności niż nuklidy znane,
- są bardzo ważne poznawczo,
- występują wśród nich nowe zjawiska.

Poszukiwanie nowych
pierwiastków

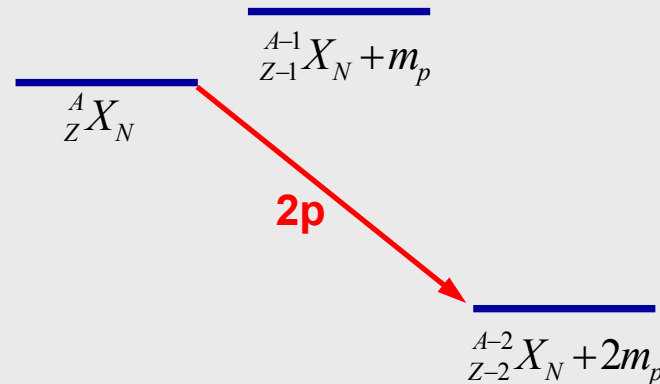
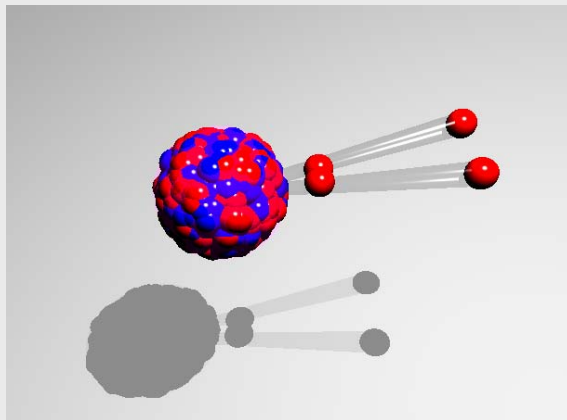


zrozumienie procesów
nukleosyntezy

nowy rodzaj promieniotwórczości
– emisja dwóch protonów

Promieniotwórczość dwuprotonowa

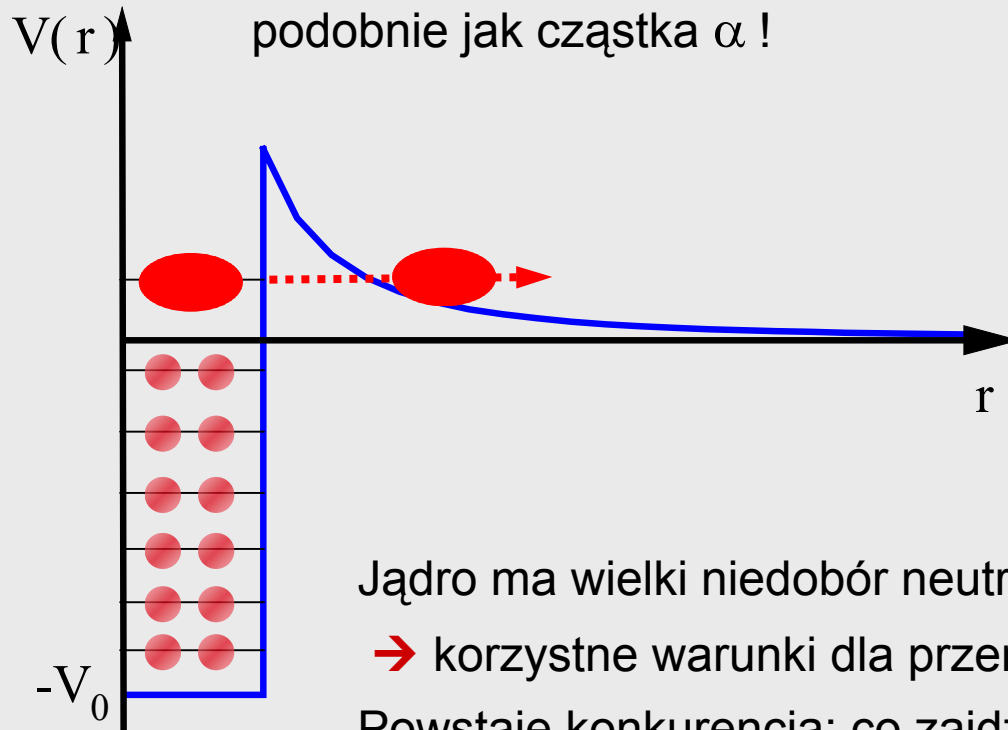
W 1960 r. przewidziano możliwość przemiany, w której z jądra wyrzucane są jednocześnie dwa protony → szukać w bardzo neutrono-deficytowych nuklidach o parzystej liczbie Z , w których emisja jednego protonu jest energetycznie niemożliwa.



- ▶ Przy pomocy obliczeń teoretycznych wytypowano najlepszych kandydatów : ${}^{45}\text{Fe}$, ${}^{48}\text{Ni}$, ${}^{54}\text{Zn}$.

Promieniotwórczość dwuprotonowa

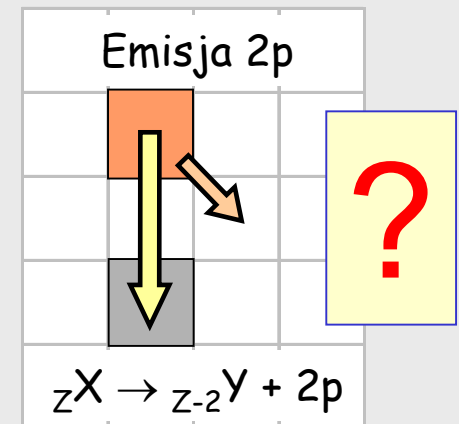
Oba protony uwięzione w jamie potencjału,
podobnie jak cząstka α !



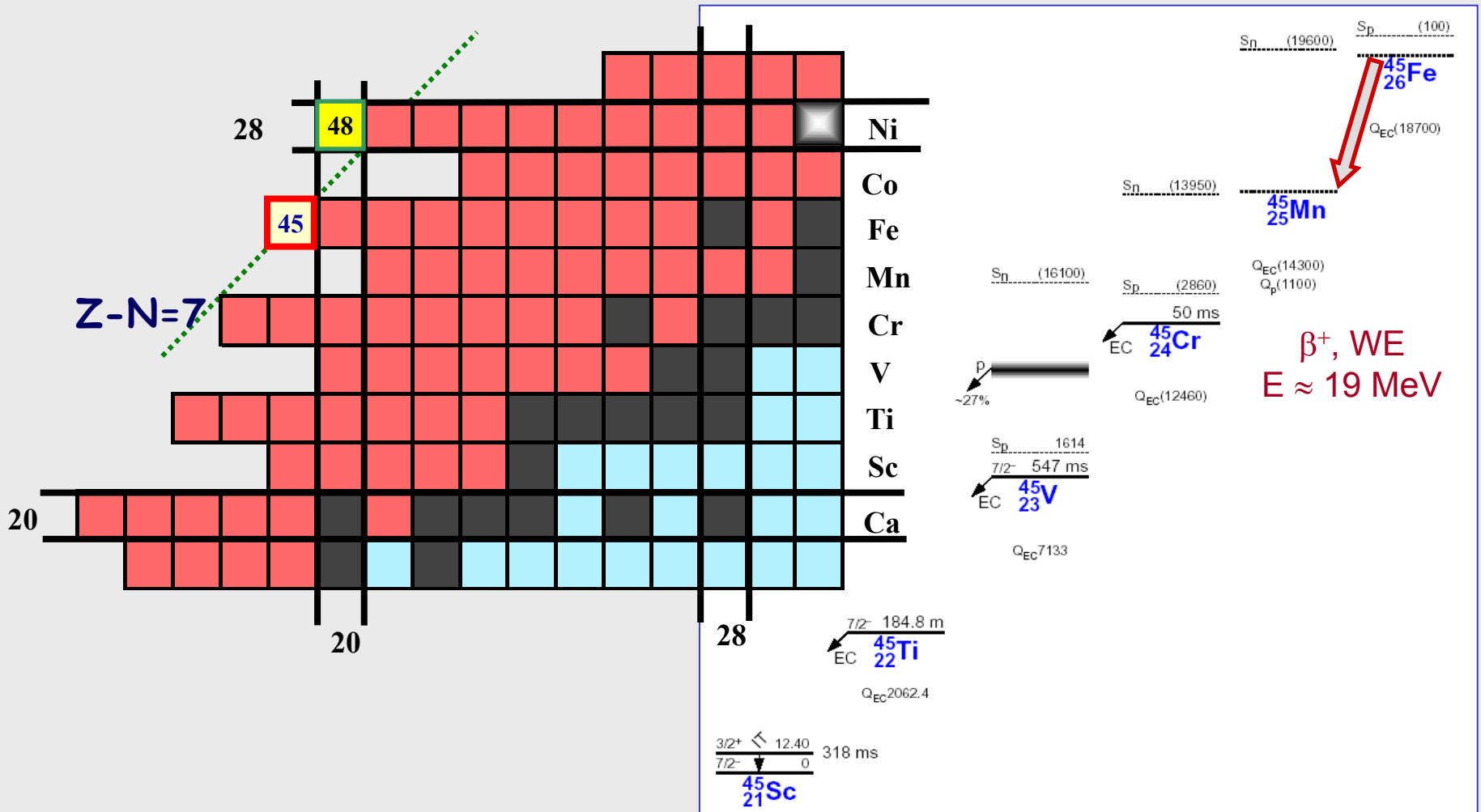
Jądro ma wielki niedobór neutronów

→ korzystne warunki dla przemiany β^+ !

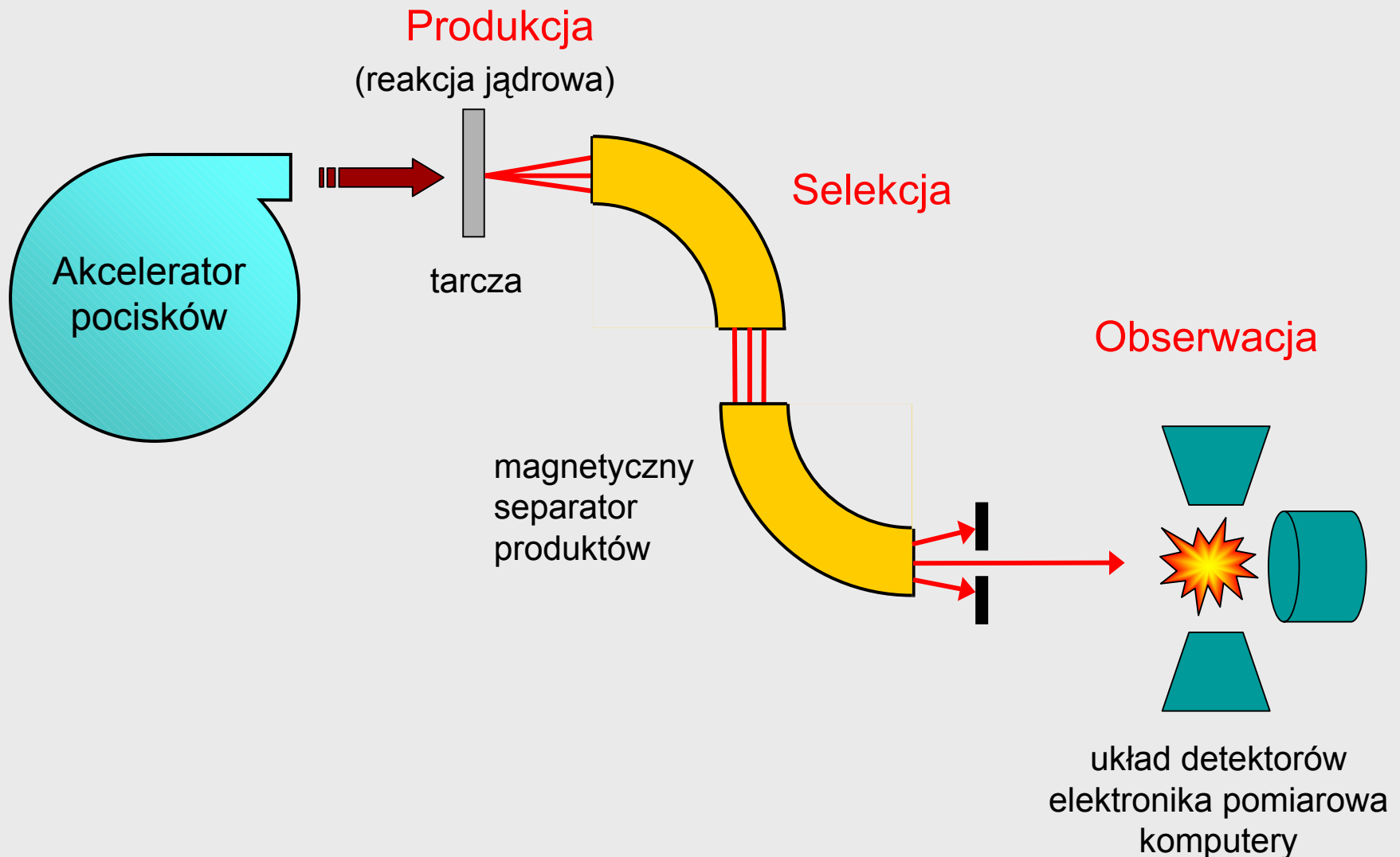
Powstaje konkurencja: co zajdzie szybciej,
przemiana β , czy tunelowanie pary protonów?



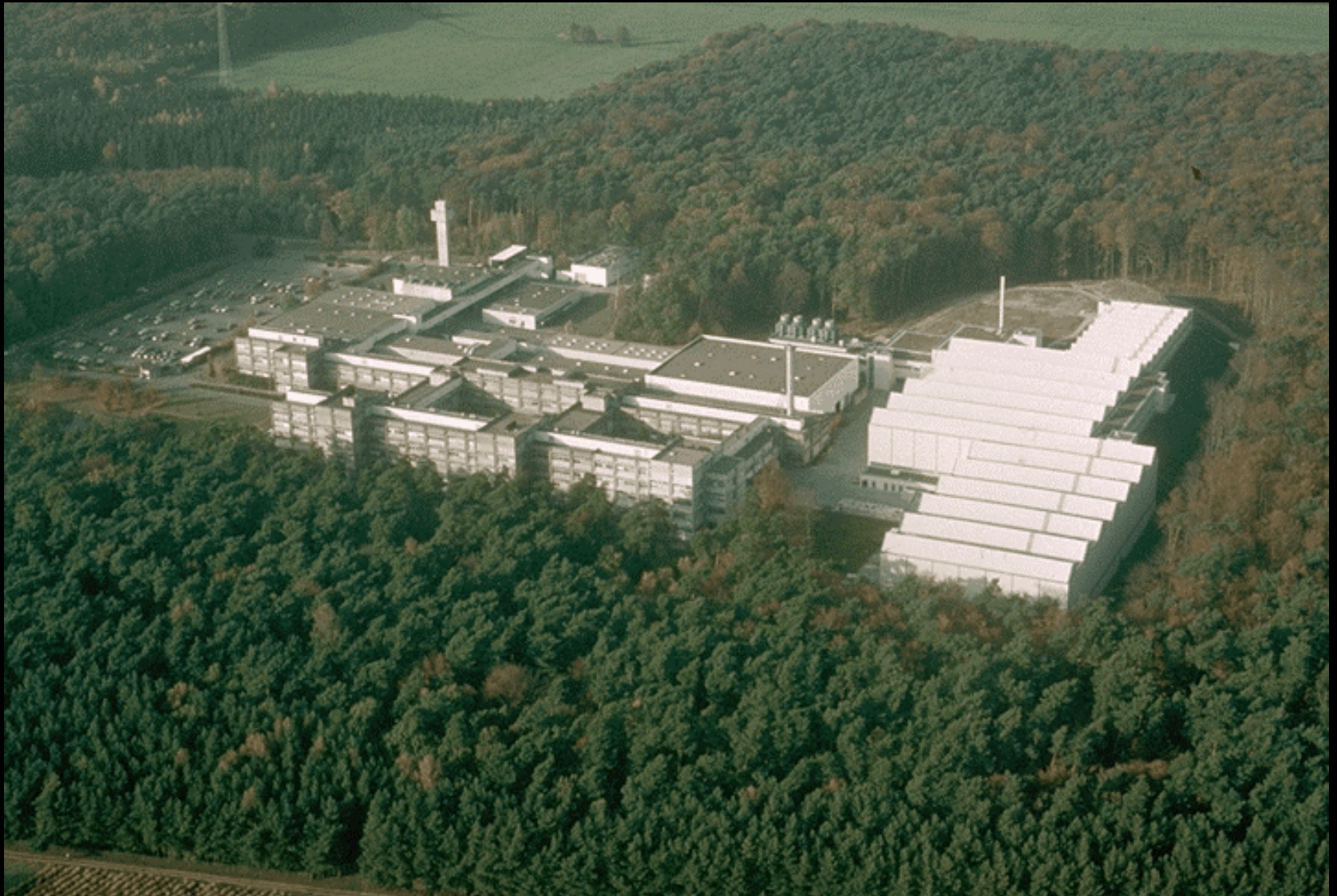
Mapa w okolicy ^{45}Fe



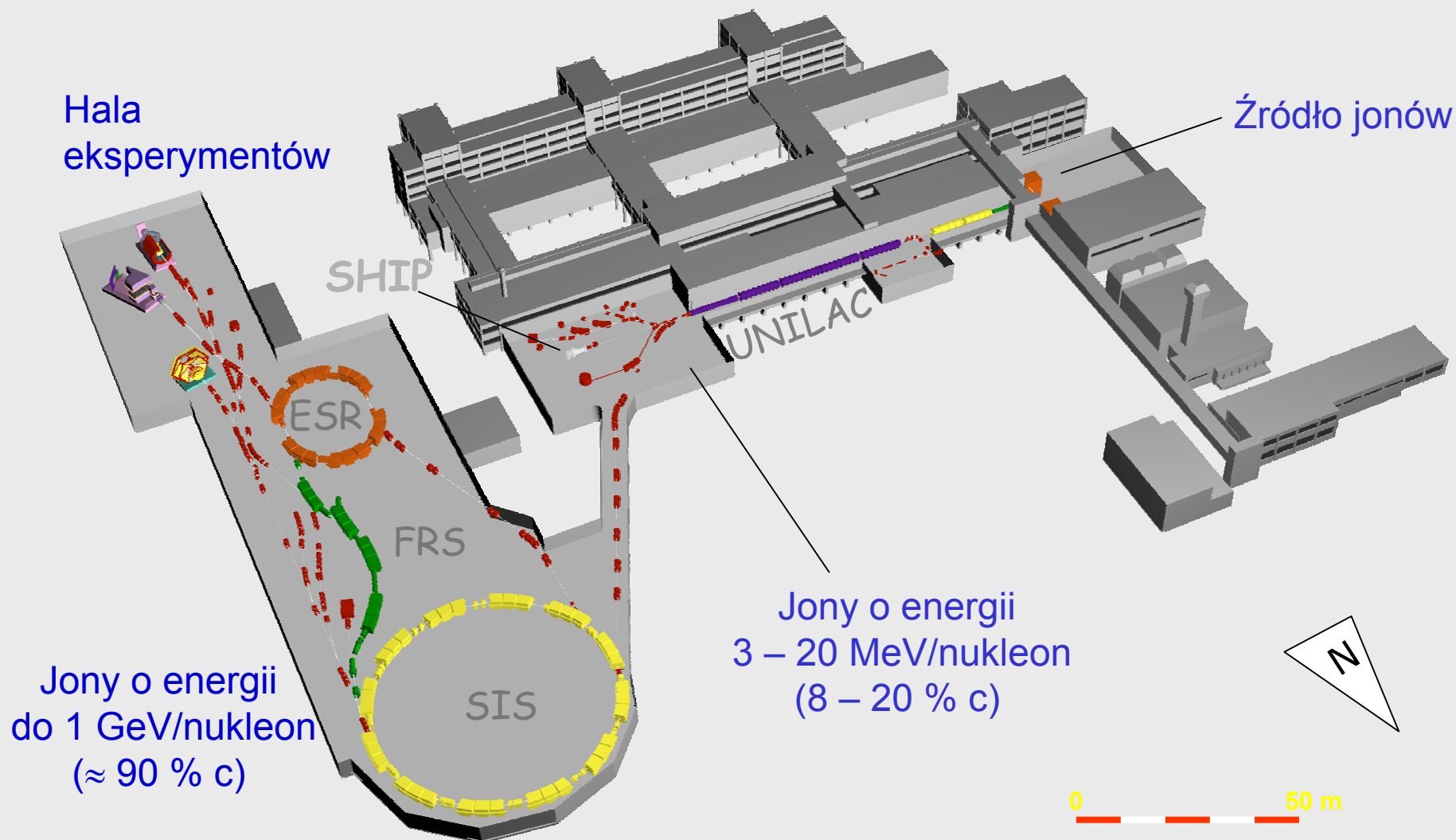
Schemat współczesnego eksperymentu



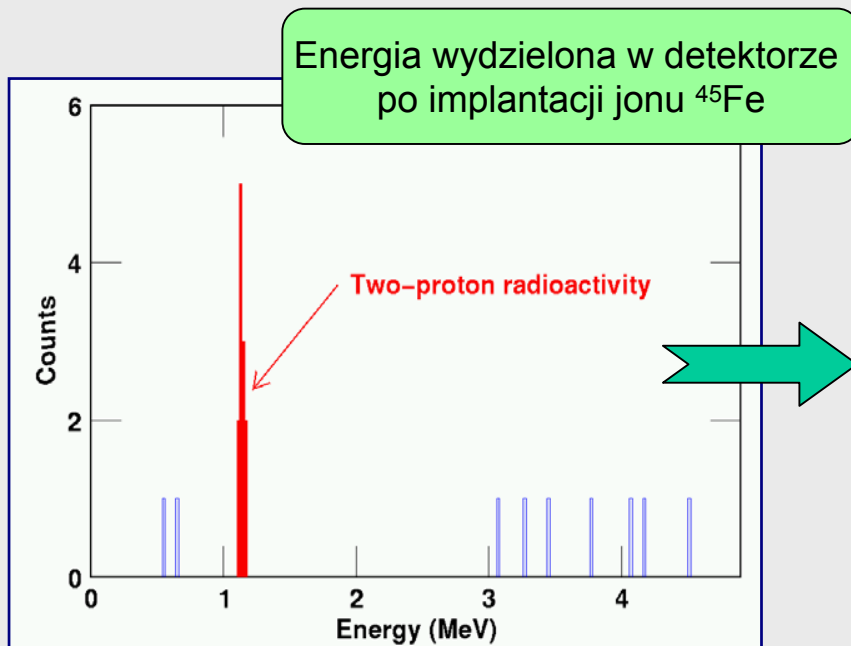
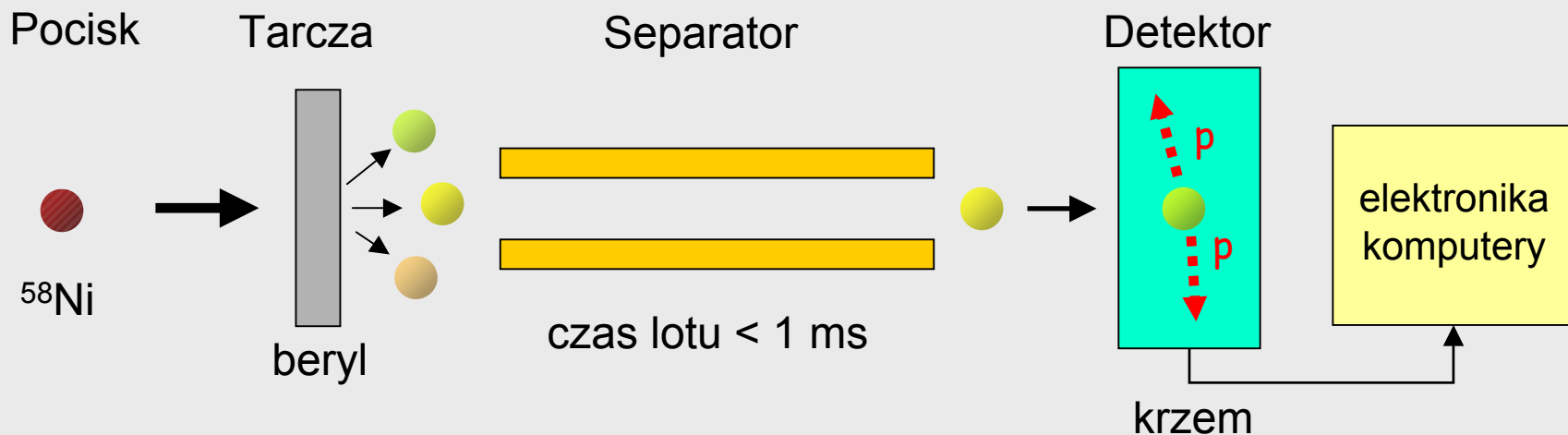
Laboratorium GSI w Darmstadt



Laboratorium GSI Darmstadt



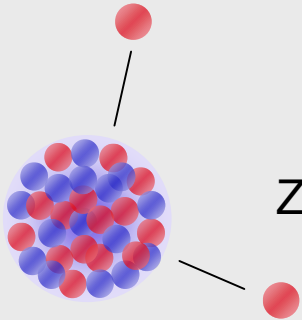
Pierwsze badania ^{45}Fe



Wyniki :

- wydzielona energia, $E = 1.1 \text{ MeV}$
- półokres rozpadu, $T_{1/2} \approx 3 \text{ ms}$
- ➔ zgodne tylko z hipotezą emisji 2p !

Prawdziwe wyzwanie

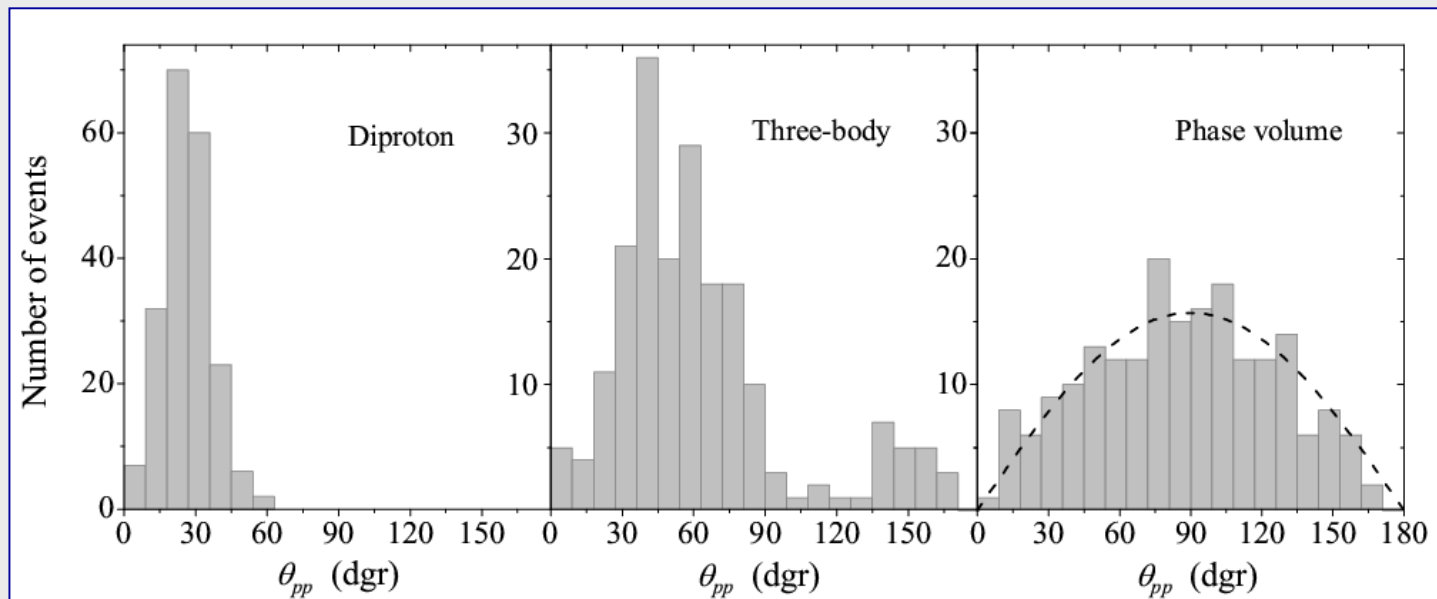


Udowodnić, że wylatują dwa protony!

Zarejestrować je oddzielnie, najlepiej ich tory

Zmierzyć ich energie oraz kąt między kierunkami ich emisji

Przewidywany kąt między pędami obydwu protonów z ^{45}Fe



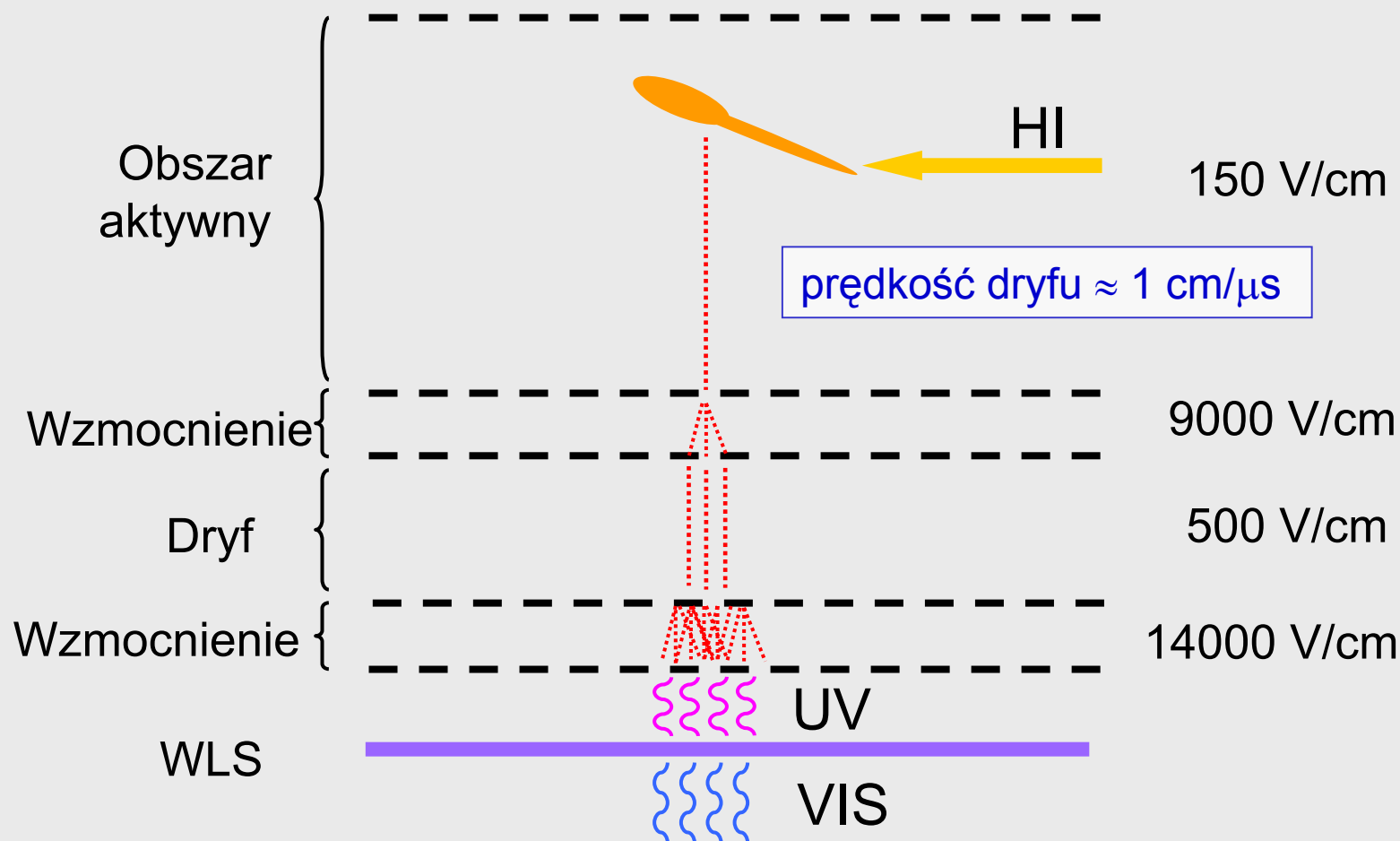
Symulacja 200 zdarzeń

Rozwiązanie: czarna skrzynka



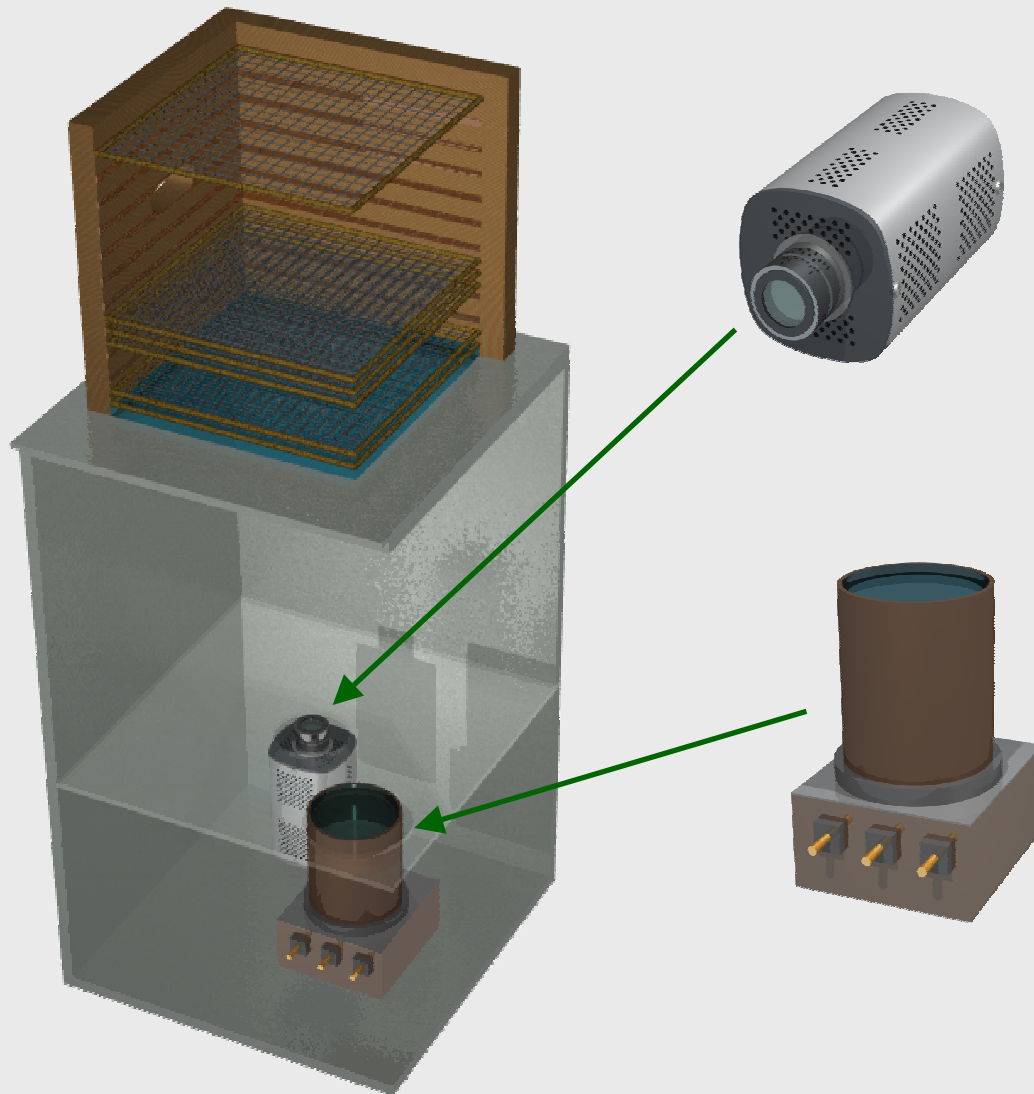
Komora dryfowa z odczytem optycznym
(OTPC – optical time projection chamber)

Zasada działania OTPC



Mieszanka gazowa: 66% He + 32% Ar + 1% N₂ + 1% CH₄

Pełny układ



➤ Kamera CCD 2/3"

- 1000×1000 pix
- 12-bitów
- wzmacniacz obrazu (x2000)

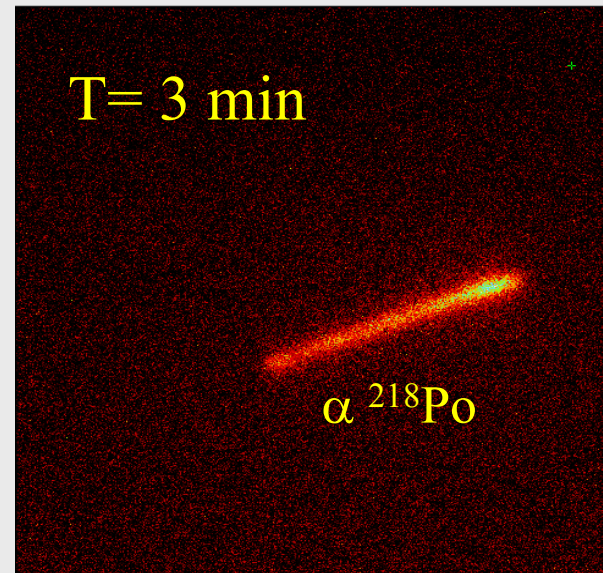
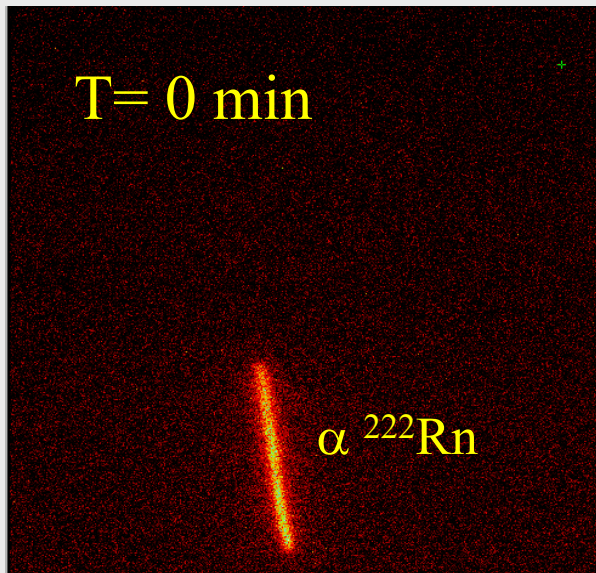
➔ Obraz rzutu na płaszczyznę

➤ Fotopowielacz 5"

➔ Zapis intensywności światła
w funkcji czasu (informacja
o położeniu w kierunku
prostopadłym do obrazu)

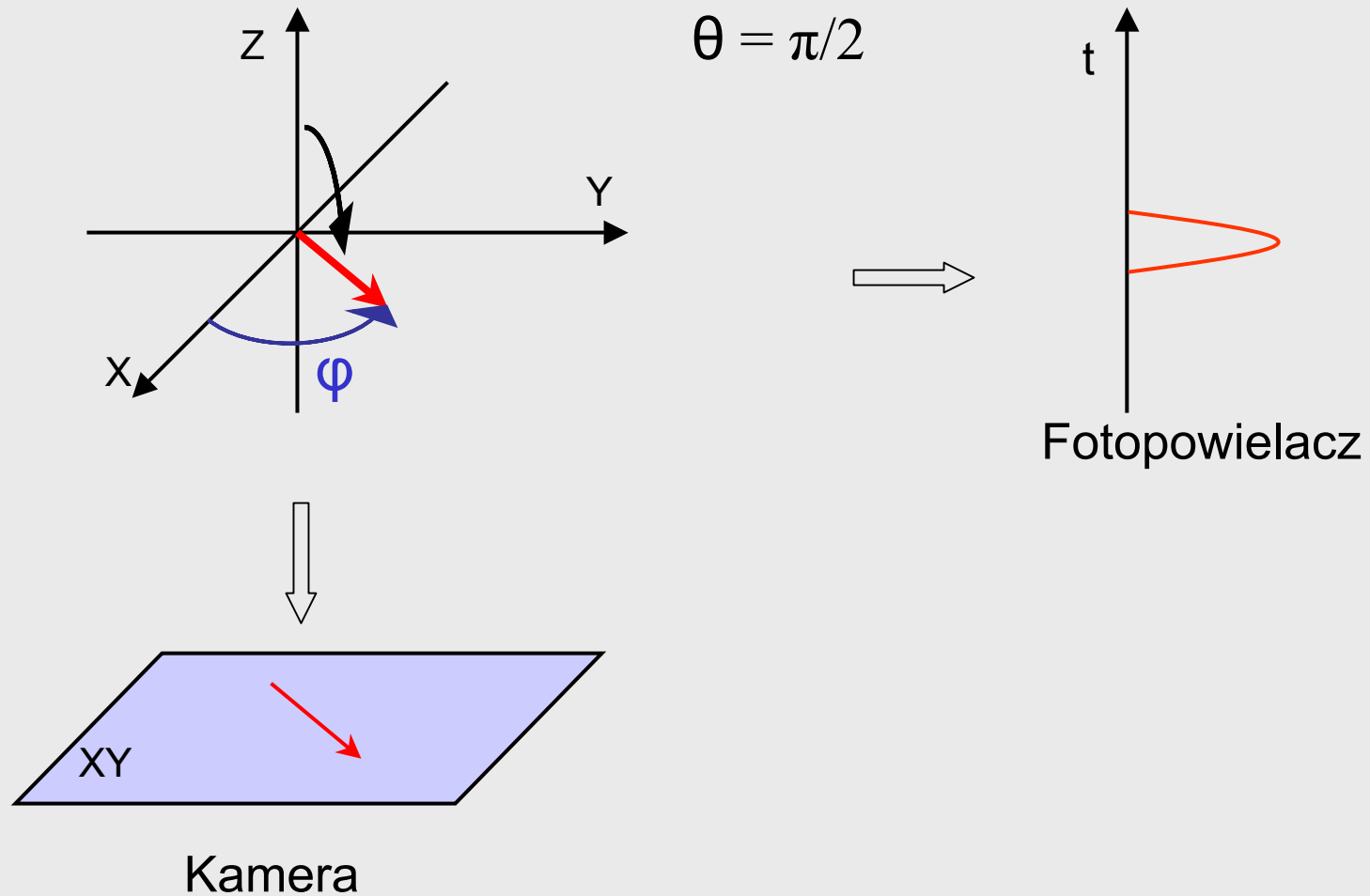
Pierwsze zdjęcia

Promieniotwórczość naturalna z szeregu uranowo-radowego!

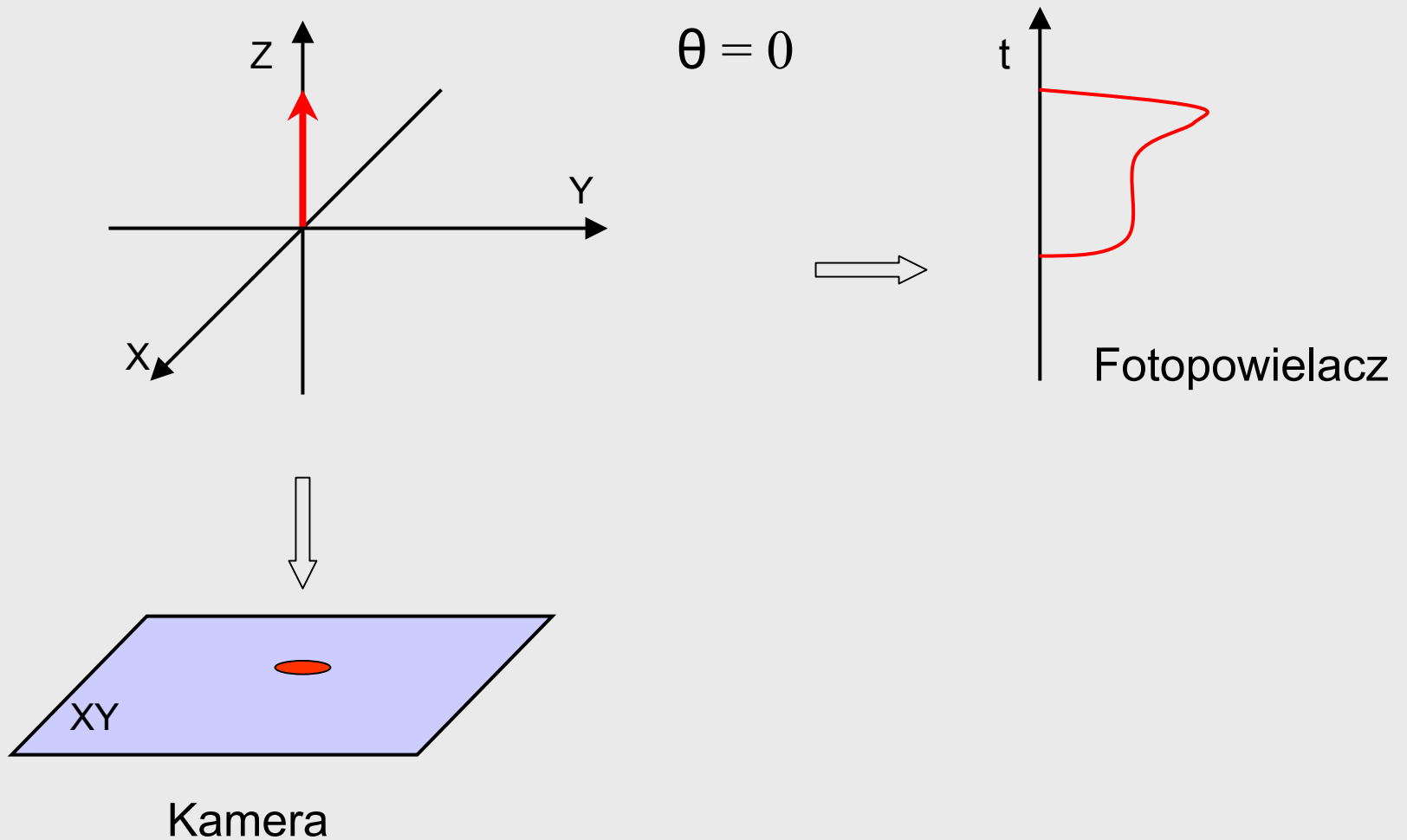


tory wychodzą z tego samego miejsca,
ich długość zgadza się z energiami cząstek α ^{222}Rn and ^{218}Po

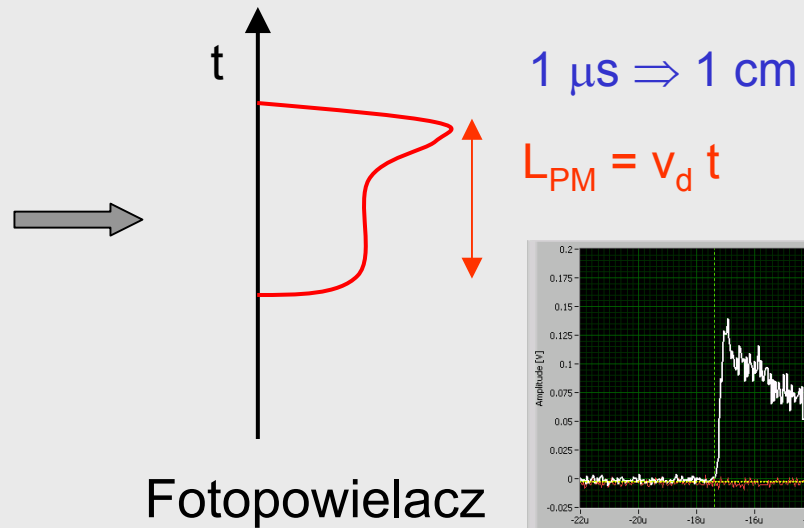
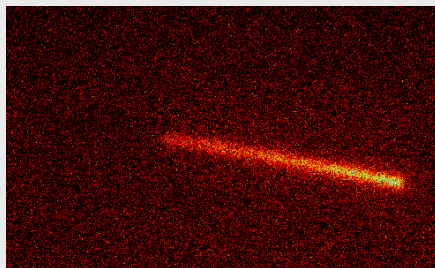
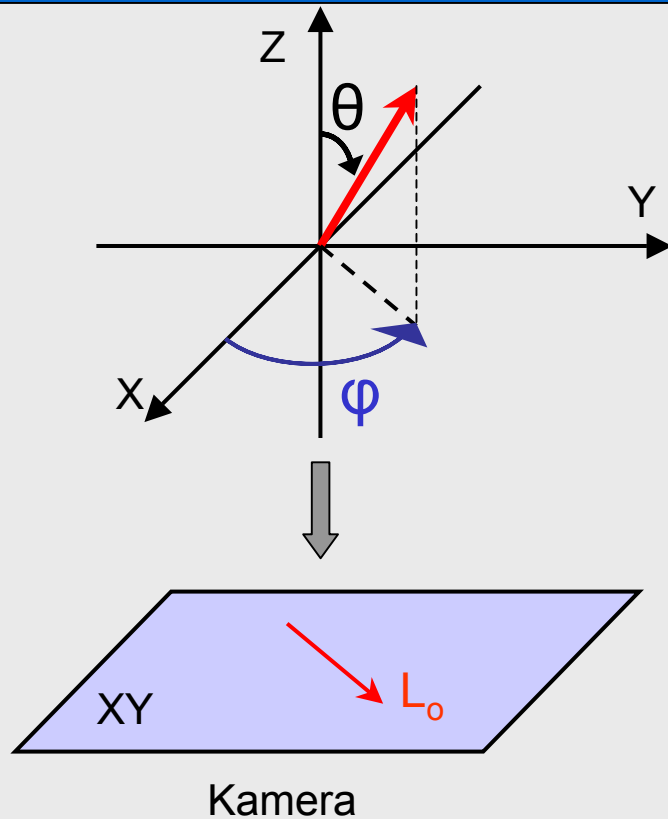
Rekonstrukcja toru cząstki



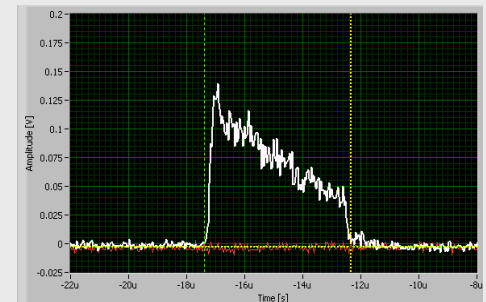
Rekonstrukcja toru cząstki



Rekonstrukcja toru cząstki



Fotopowielacz



Cząstka α została wyrzucona pod pewnym kątem do osi z

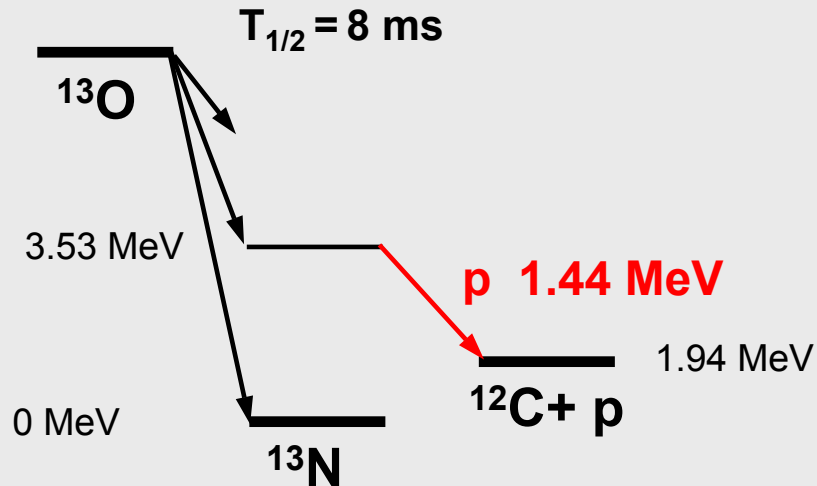
Jony z cyklotronu warszawskiego



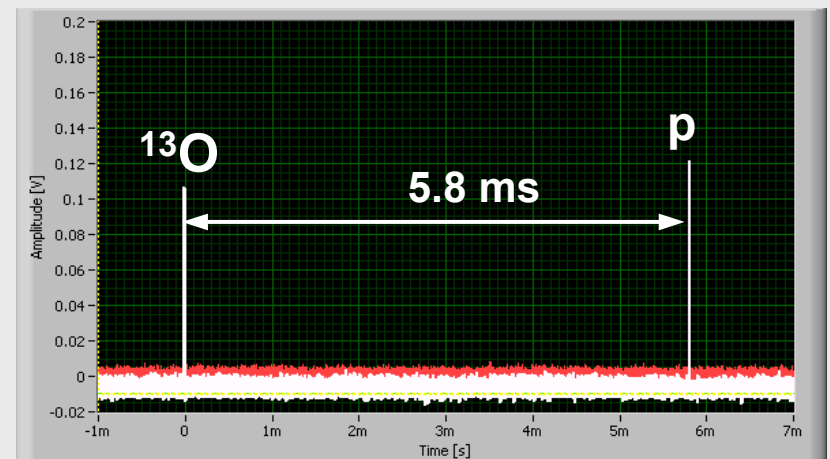
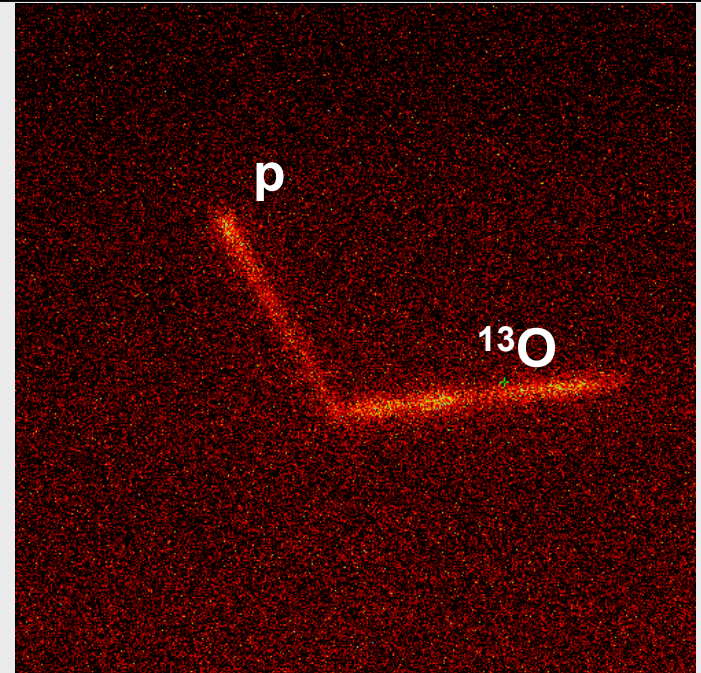
Jony ^{12}C zatrzymują się w detektorze OTPC.

Ekran komputera filmowany był zwykłym aparatem cyfrowym.

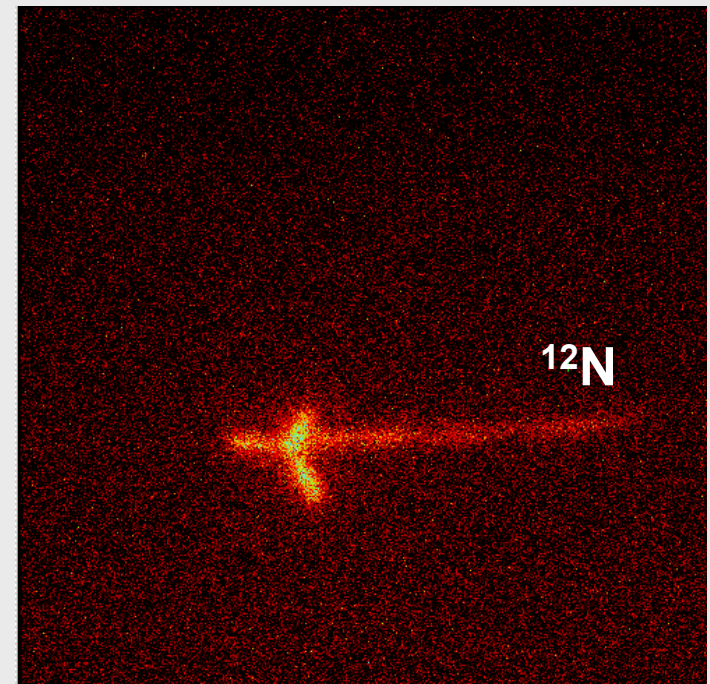
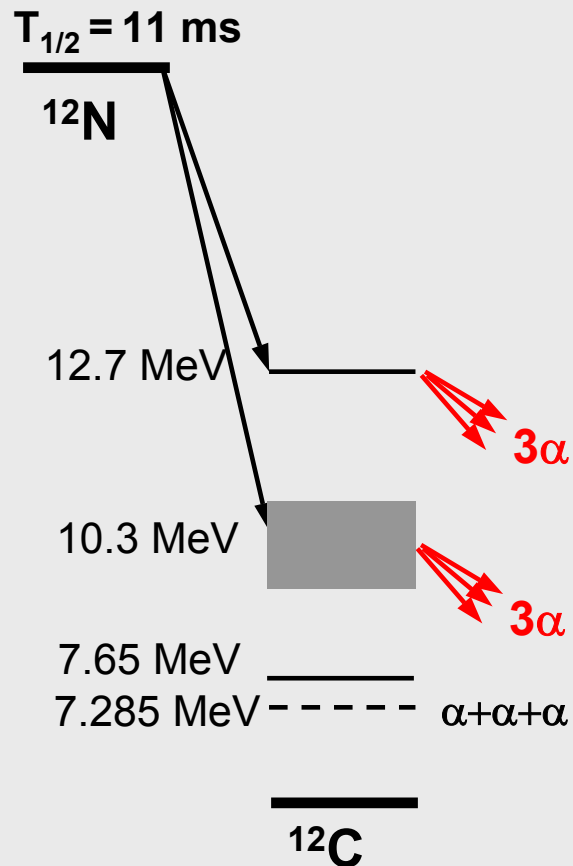
Test w Dubnej



Przemiana β ^{13}O czasem prowadzi do stanu wzbudzonego, z którego emitowany jest proton.

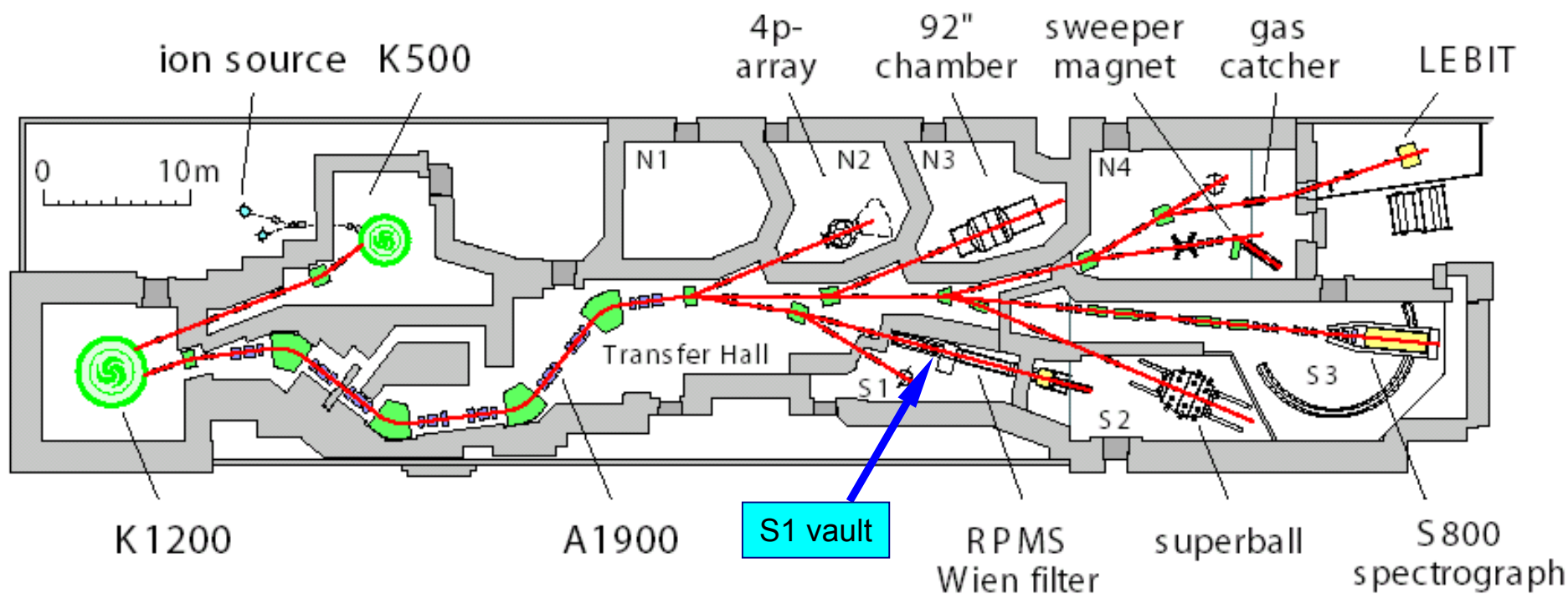


Rozpad 3α wzbudzonego ^{12}C



Przemiana β ^{12}N prowadzi do stanów wzbudzonych ^{12}C , które rozpadają się na 3 cząstki α !

Eksperyment w NSCL/MSU

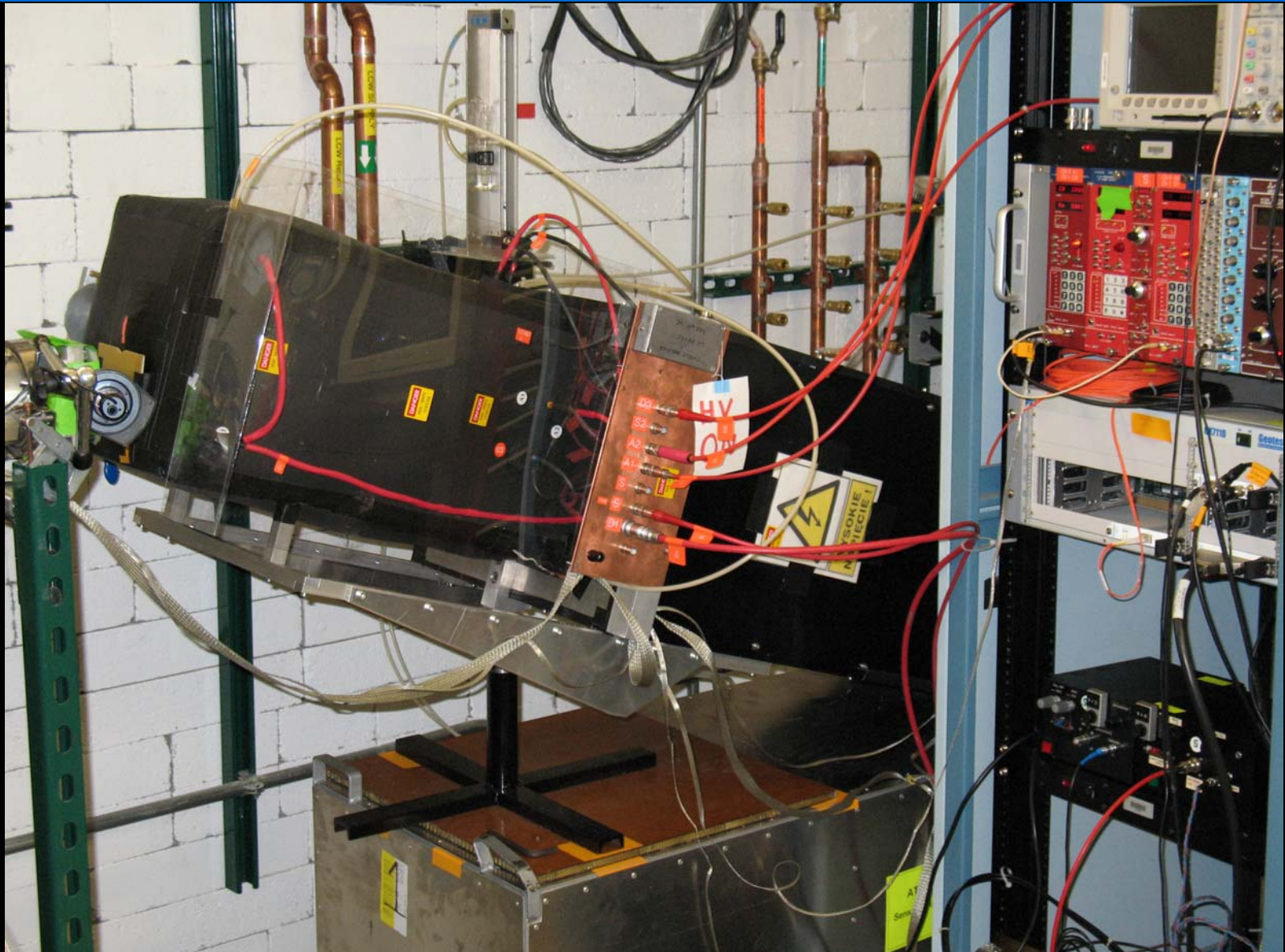


Reakcja: ^{58}Ni at 161 MeV/u + $^{\text{nat}}\text{Ni} \rightarrow ^{45}\text{Fe}$

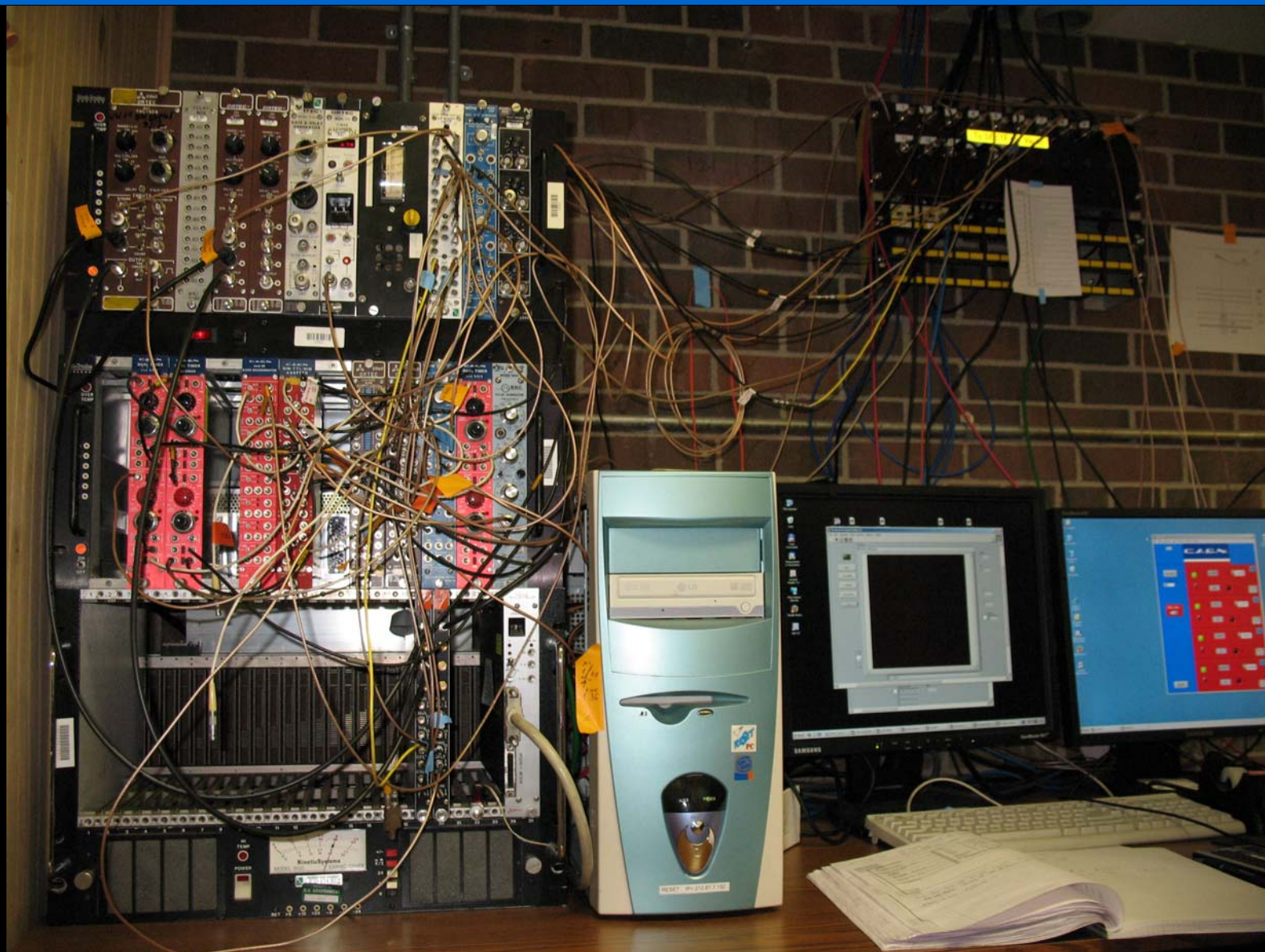
Identyfikacja jonów w locie przez pomiar ΔE + TOF

Ready to go!

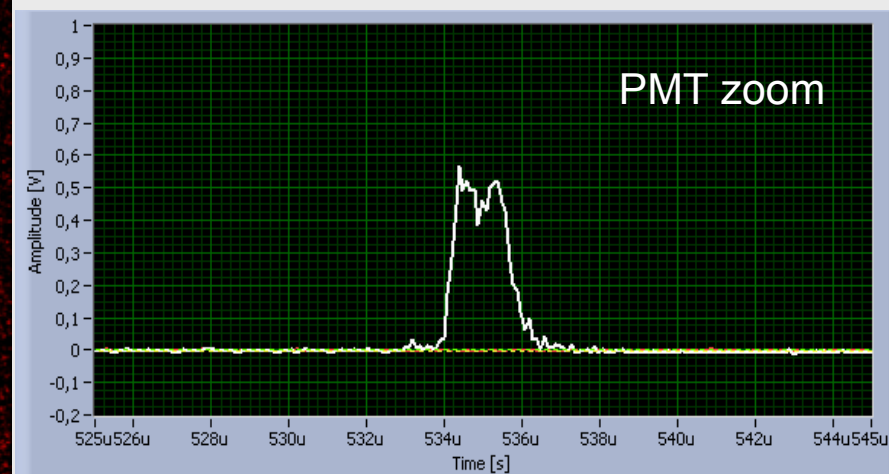
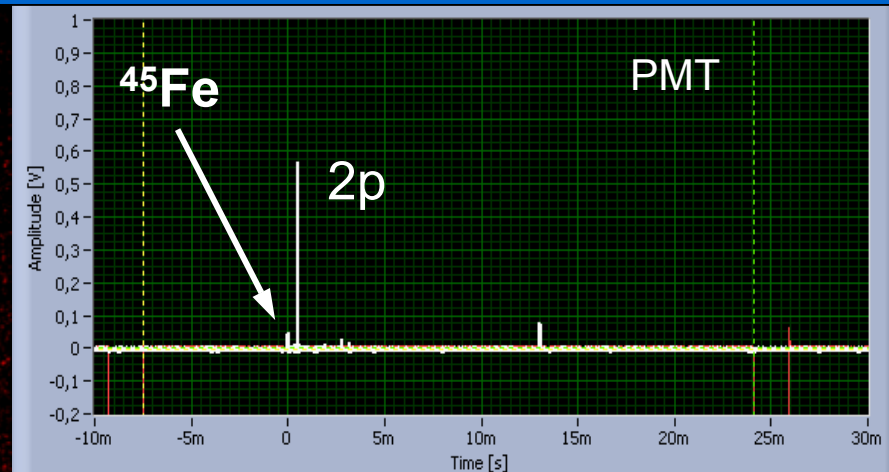
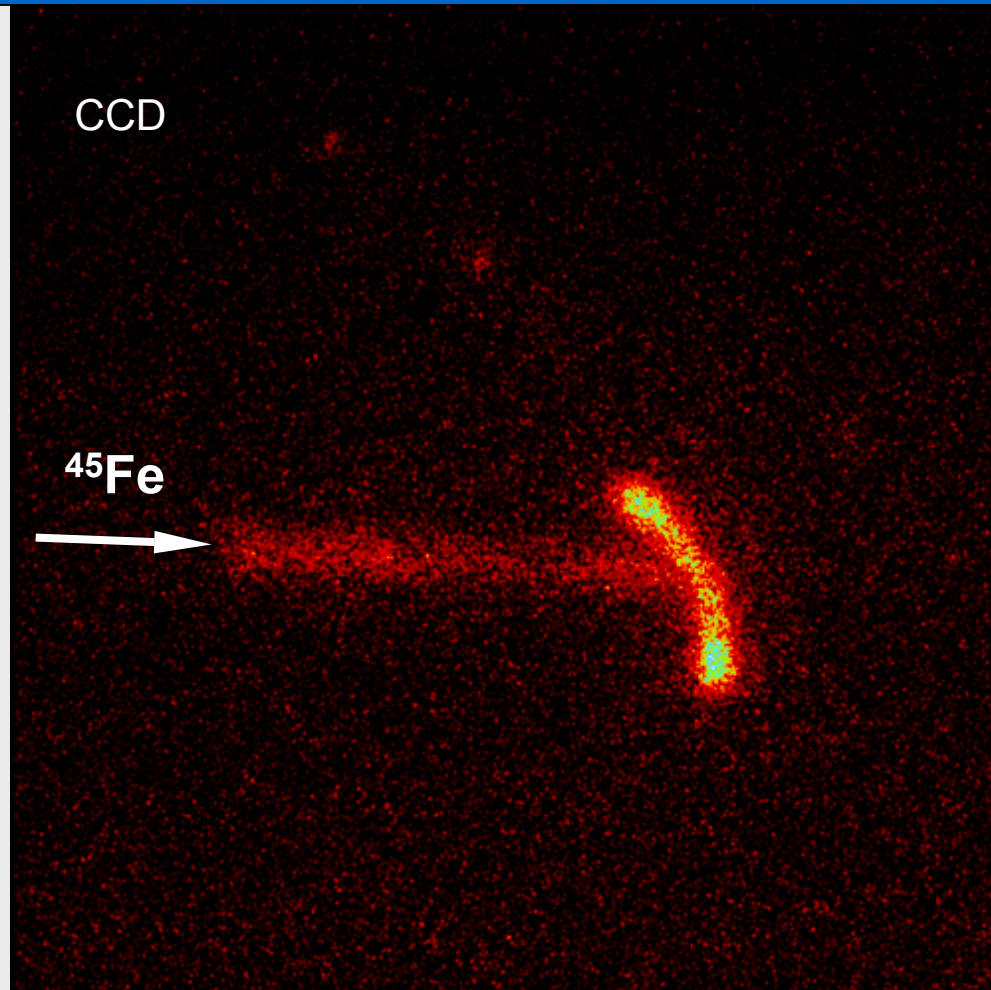
February 2007



Elektronika pomiarowa

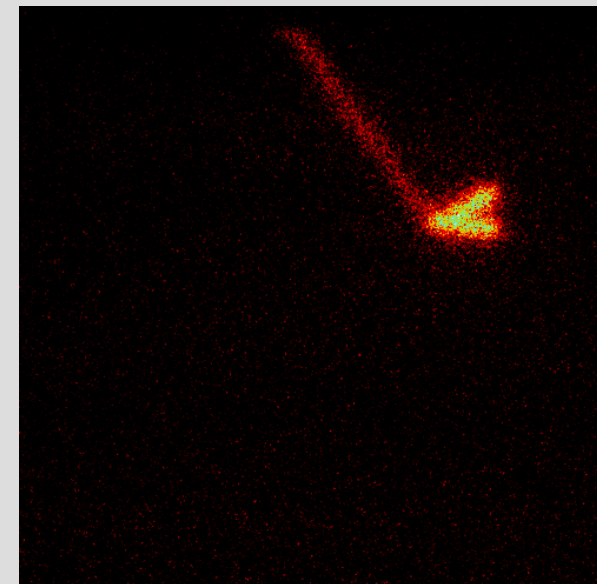
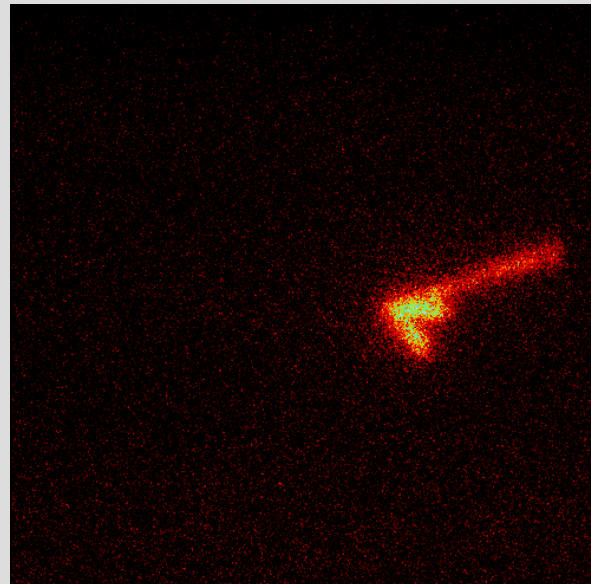
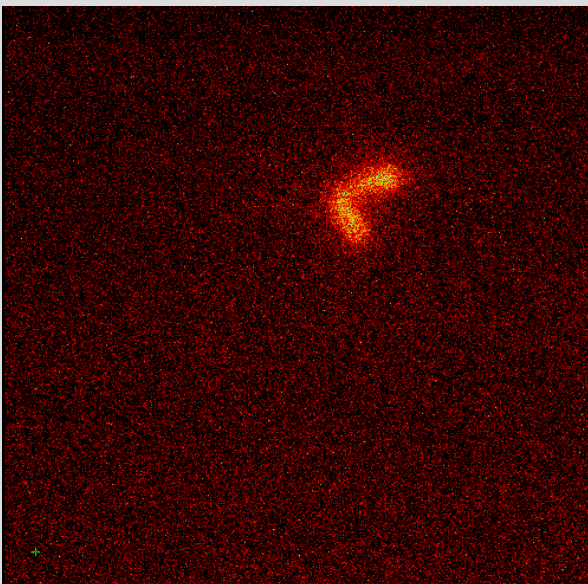
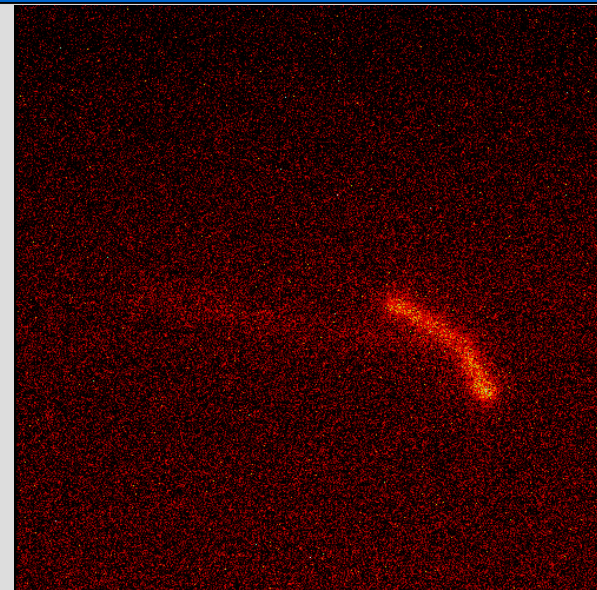
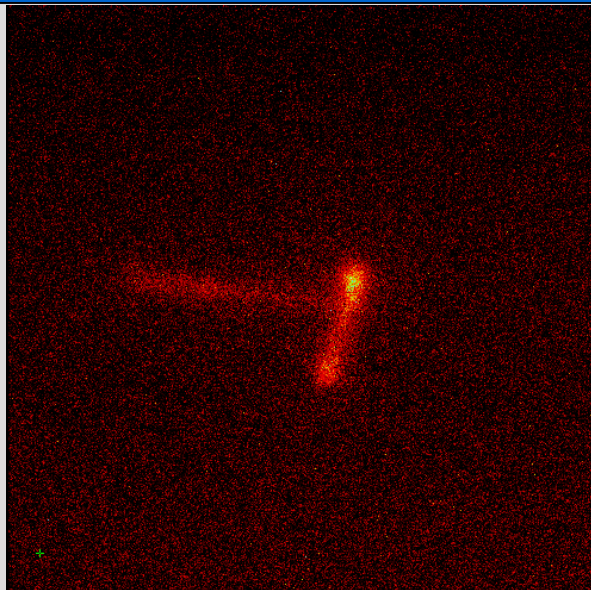
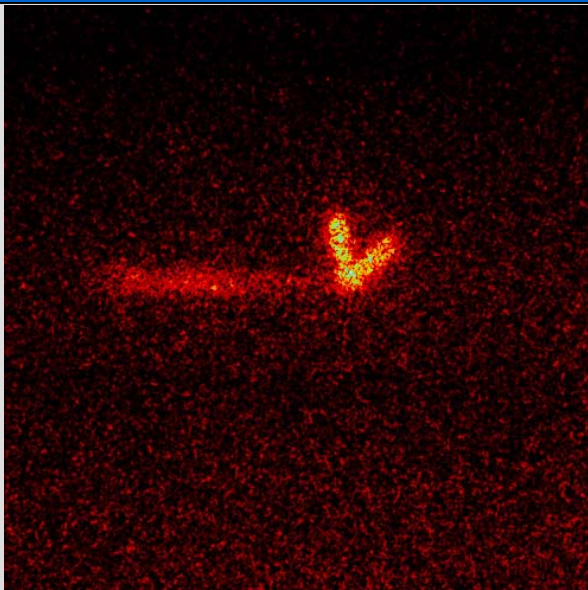


Rozpad $2p$ ^{45}Fe

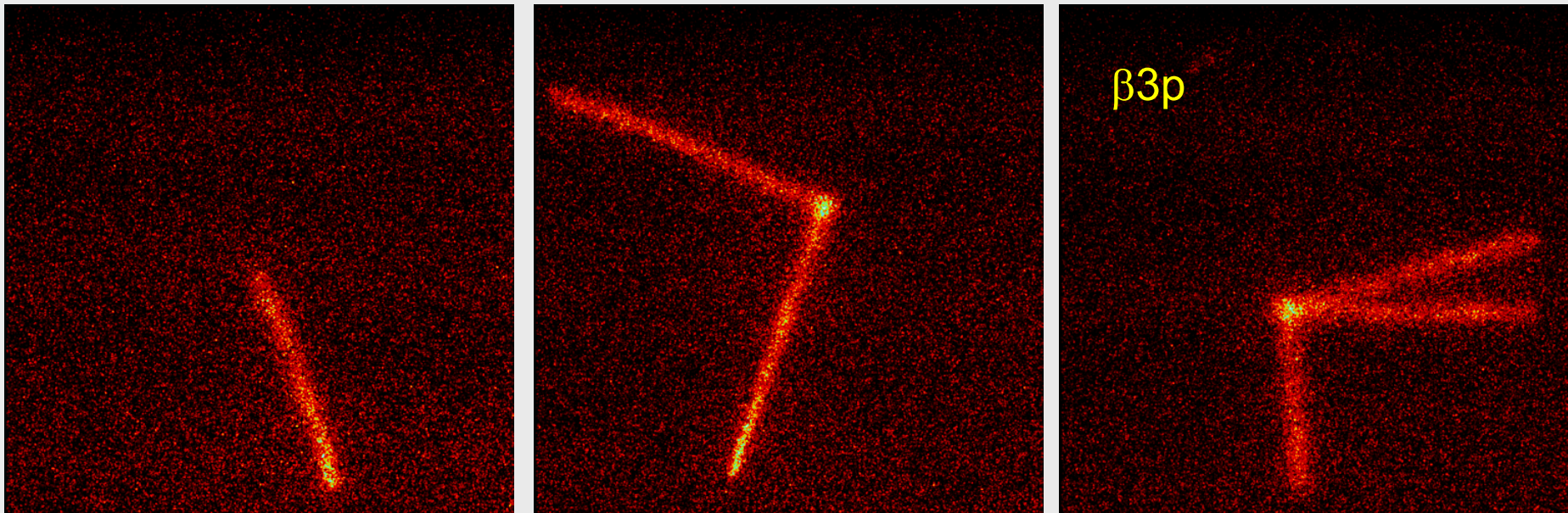


rozpad 0.53 ms after implantation

Galeria przypadków 2p

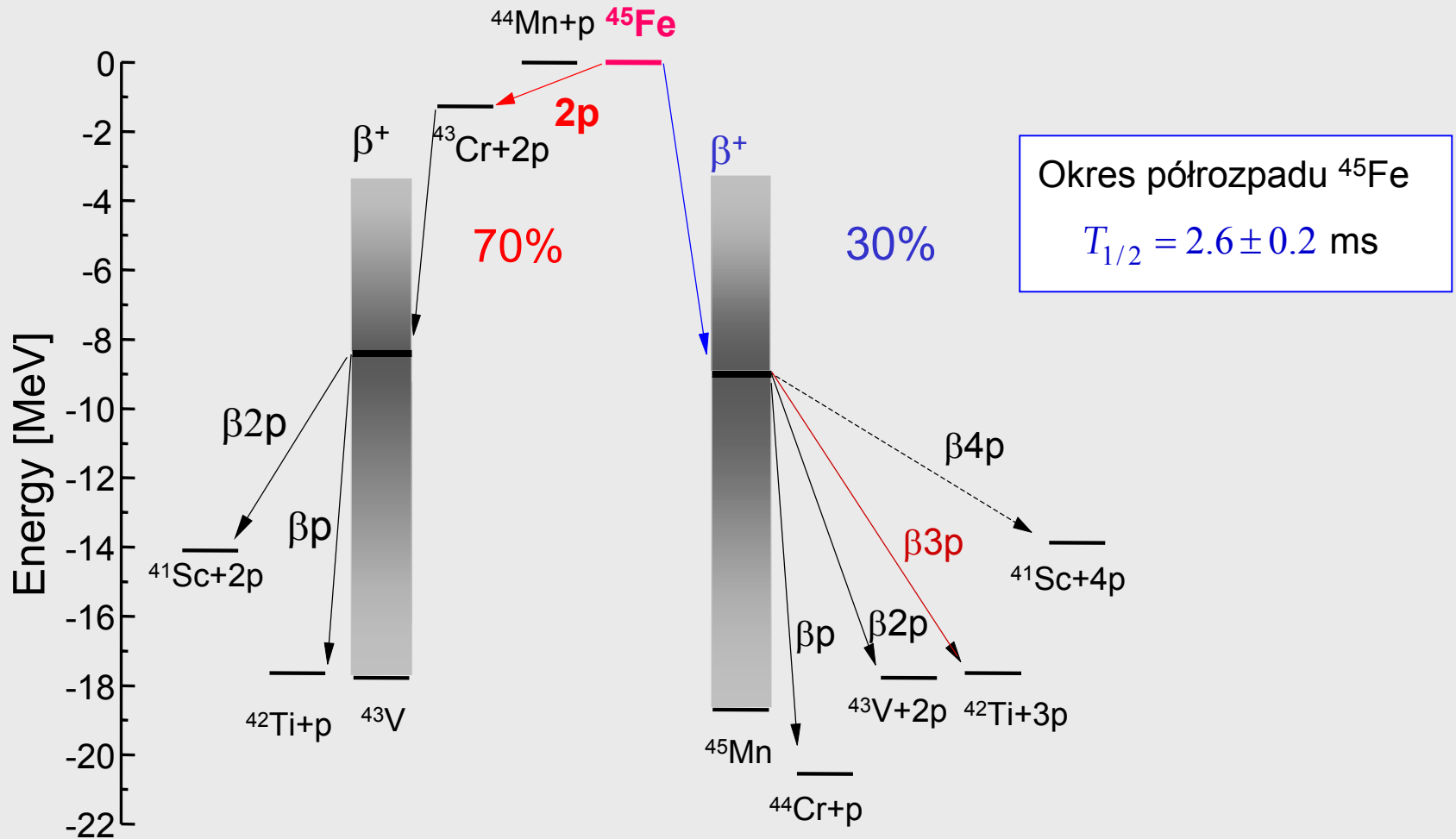


Czasem zachodzi przemiana β^+



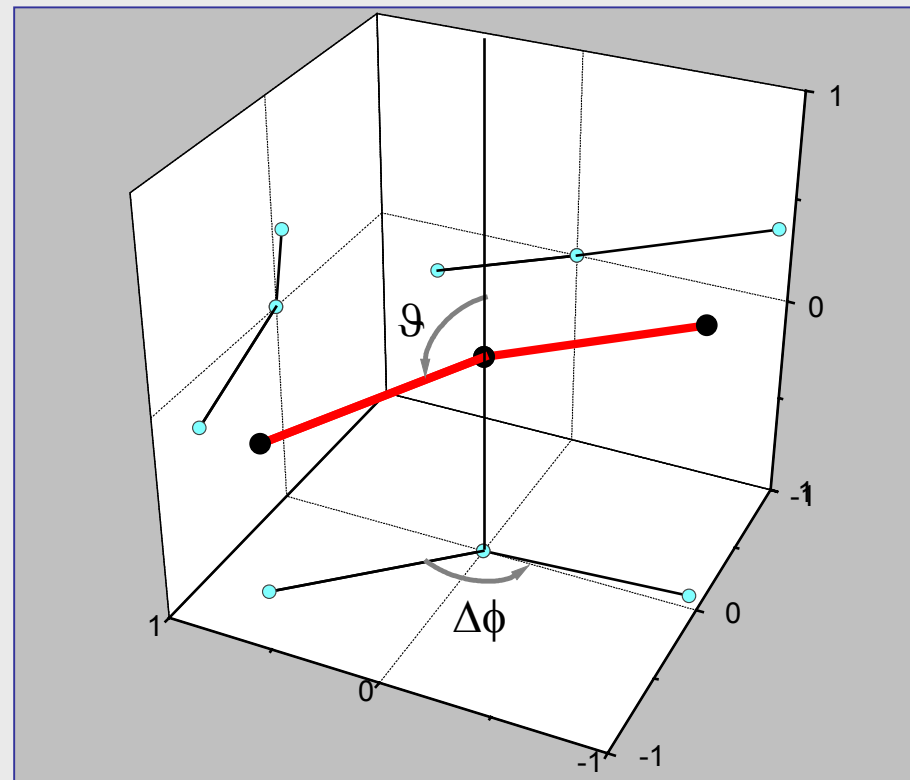
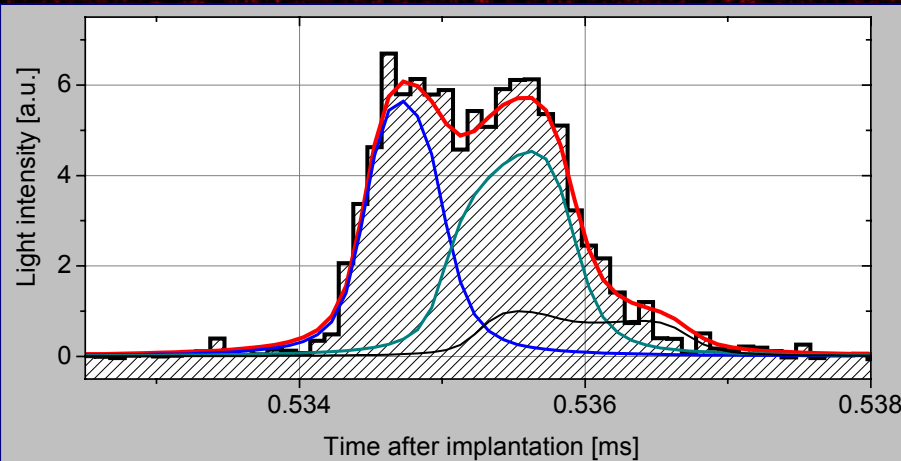
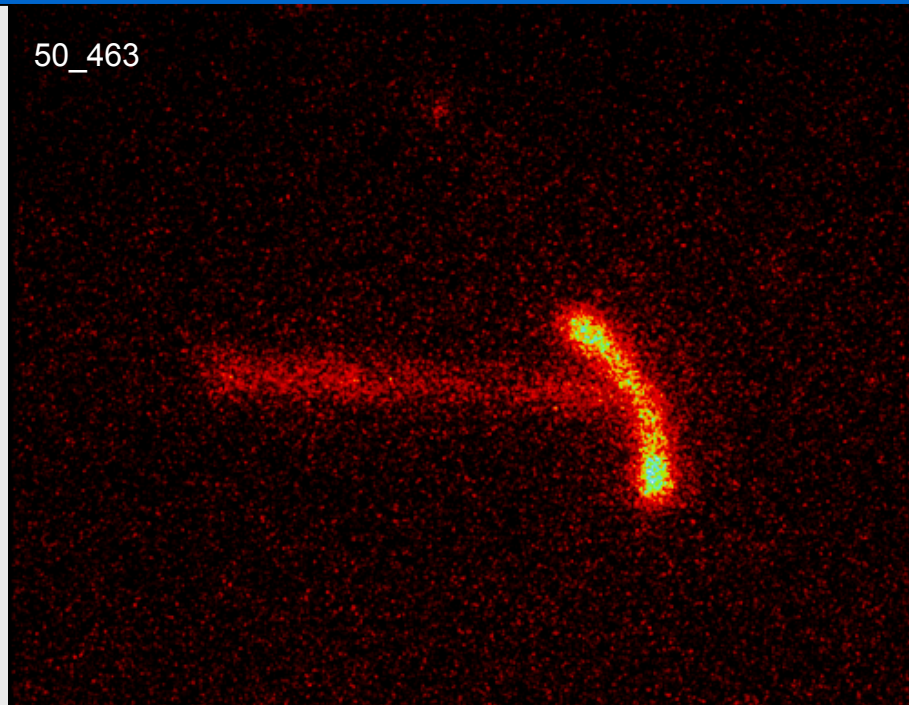
Przemiana β^+ ^{45}Fe prowadzi do stanów wzbudzonych ^{45}Mn , z których wyrzucane są protony o dużej energii, najczęściej jeden, czasem dwa, a nawet **trzy**!

Schemat rozpadu ^{45}Fe



Rekonstrukcja przestrzenna

50_463

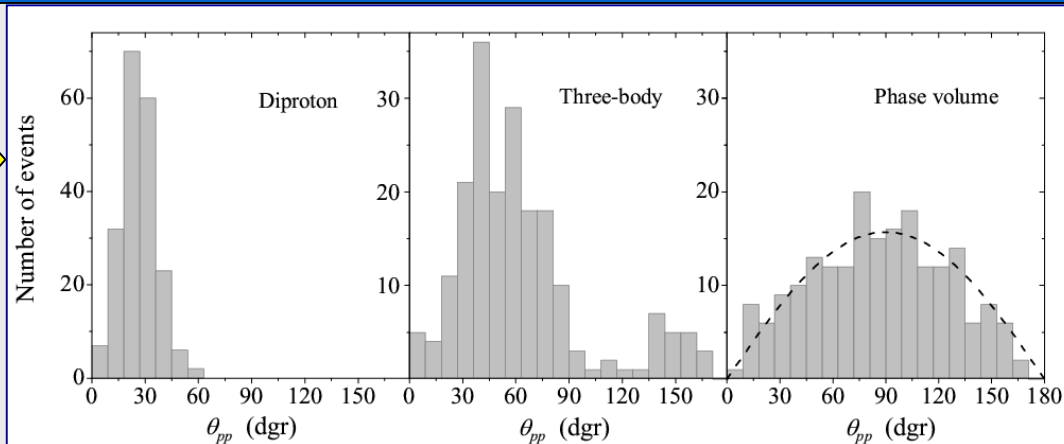


$$\vartheta_1 = (104 \pm 2)^\circ, \quad \vartheta_1 = (70 \pm 3)^\circ$$

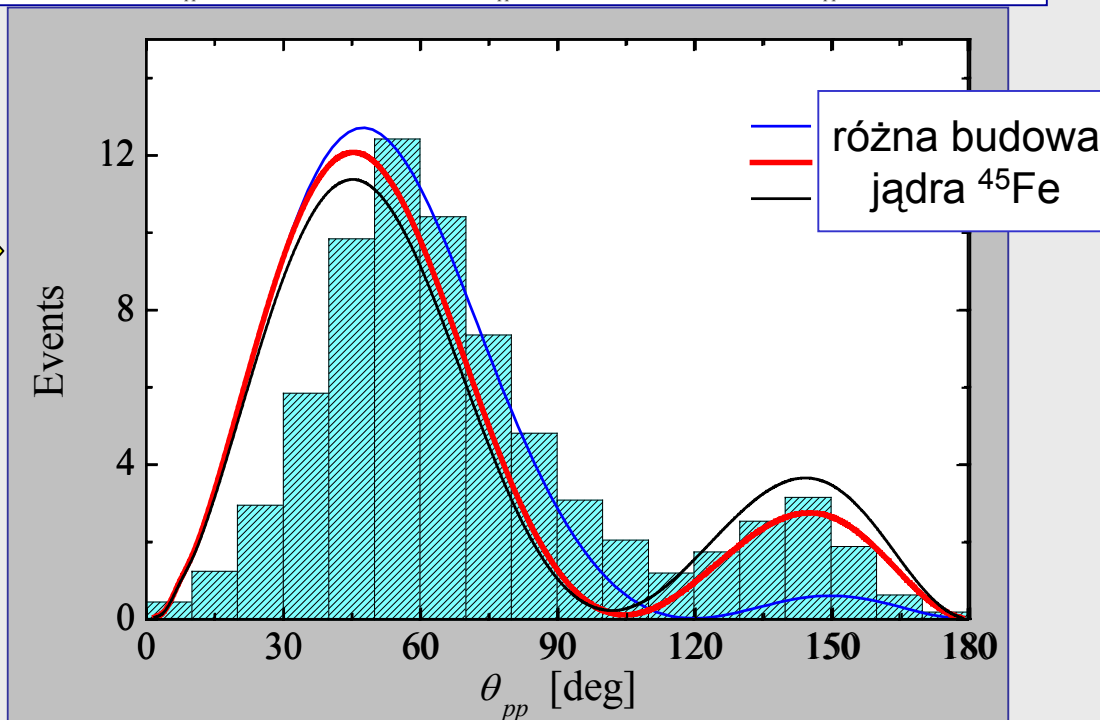
$$\Delta\phi = (142 \pm 3)^\circ \rightarrow \theta_{pp} = (143 \pm 5)^\circ$$

Kąt między torami protonów

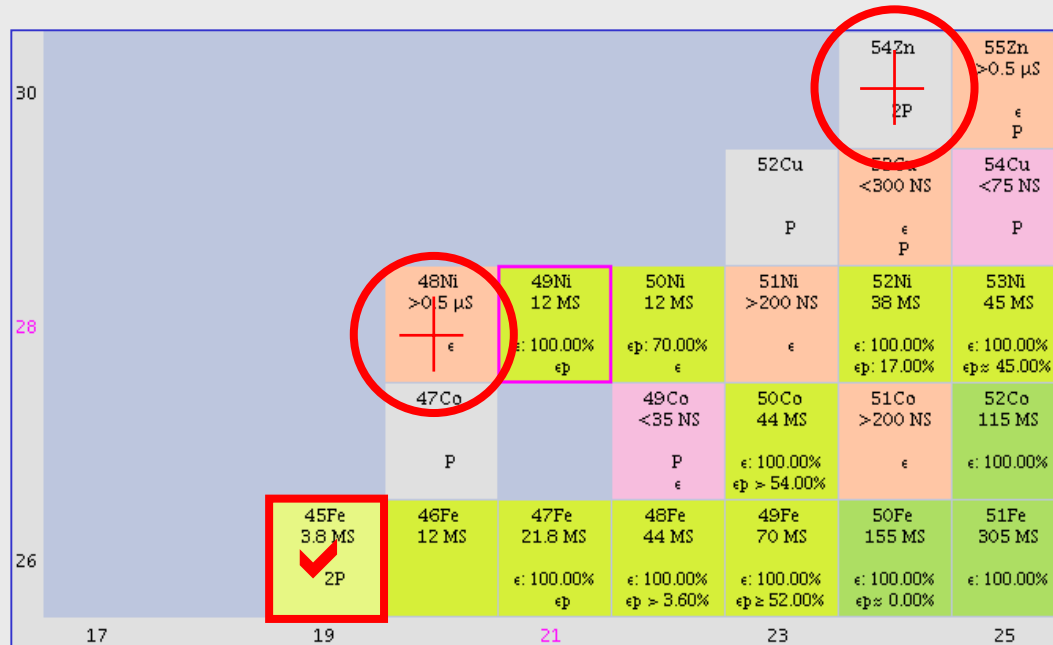
Pytanie



Odpowiedź



Następne kroki



- Wiadomo, że ^{54}Zn ulega przemianie 2p.
- ^{48}Ni jest o to bardzo podejrzany.
- ➔ Chcemy zbadać te przypadki, a także szukać przemiany 2p wśród jąder cięższych.

Nowa metoda obserwacji i rejestracji rozpadów jądrowych otworzyła nowe pole do badań. Będziemy je eksplorować. Niespodzianki są możliwe 😊

Ekscytująca perspektywa

Projekt rozbudowy GSI → <http://www.gsi.de>



Zapraszamy do współpracy!



Q: What happens when electrons lose their energy?

A: They get Bohr'ed.