

Jądra dalekie od stabilności

1. Model kropłowy jądra atomowego
2. Ścieżka stabilności β
3. Granice „Świata” nuklidów
4. Rozpady z emisją ciężkich cząstek naładowanych
 - a) rozpad α
 - b) rozpad protonowy
 - c) rozpad dwuprotonowy
 - d) rozpad egzotyczny

Model kroplowy jądra atomowego

Założenie:

jądro sferyczne $R=r_0 A^{1/3}$ - kropla cieczy nukleonowej

Podstawa analogii:

- stała gęstość materii jądrowej w jądrze
- prawie stała wartość energii wiązania w przeliczeniu na jeden nukleon

Cel:

sformułowanie wzoru na energię wiązania jąder $B(A,Z)$

Model kropłowy jądra atomowego

energia
wiązania

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

Model kropłowy jądra atomowego

**Proporcjonalność do A
wynika z krótkiego zasięgu sił
jądrowych (inaczej byłoby A^2).**

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

Model kroplowy jądra atomowego

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

**Ujemny wpływ powierzchni
(nukleony nie mają sąsiadów
do oddziaływania)**

Model kropłowy jądra atomowego

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

**Ujemny wpływ odpychania
elektrostatycznego protonów**
 Z^2/r

Model kropłowy jądra atomowego

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

Symetria między protonami i neutronami
(zmniejszenie energii wiązania przy asymetrii
liczby protonów względem liczby neutronów)

Model kropłowy jądra atomowego

energia
dwójkowania

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

Energia dwójkowania

$$\delta = \begin{cases} +\Delta & \text{jądra parzysto-parzyste (Z i N)} \\ 0 & \text{jądra nieparzyste (A)} \\ -\Delta & \text{jądra nieparzysto-nieparzyste (Z i N)} \end{cases}$$

- Energia dwójkowania wynika z faktu szczególnie dużej energii wiązania dla jąder o parzystej liczbie protonów i parzystej liczbie neutronów.
- Zależność $1/\sqrt{A}$ jest empiryczna.

Model kropłowy jądra atomowego

energia wiązania

Proporcjonalność do A wynika z krótkiego zasięgu sił jądrowych (inaczej byłoby A^2).

energia dwójkowania

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

Ujemny wpływ powierzchni (nukleony nie mają sąsiadów do oddziaływania)

Ujemny wpływ odpychania elektrostatycznego protonów Z^2/r

Symetria między protonami i neutronami (zmniejszenie energii wiązania przy asymetrii liczby protonów względem liczby neutronów)

**$B(A,Z)/A$
z modelu
kropłowego:
eksperyment
i obliczenia**

$$a_v = 15.67 \text{ MeV}$$

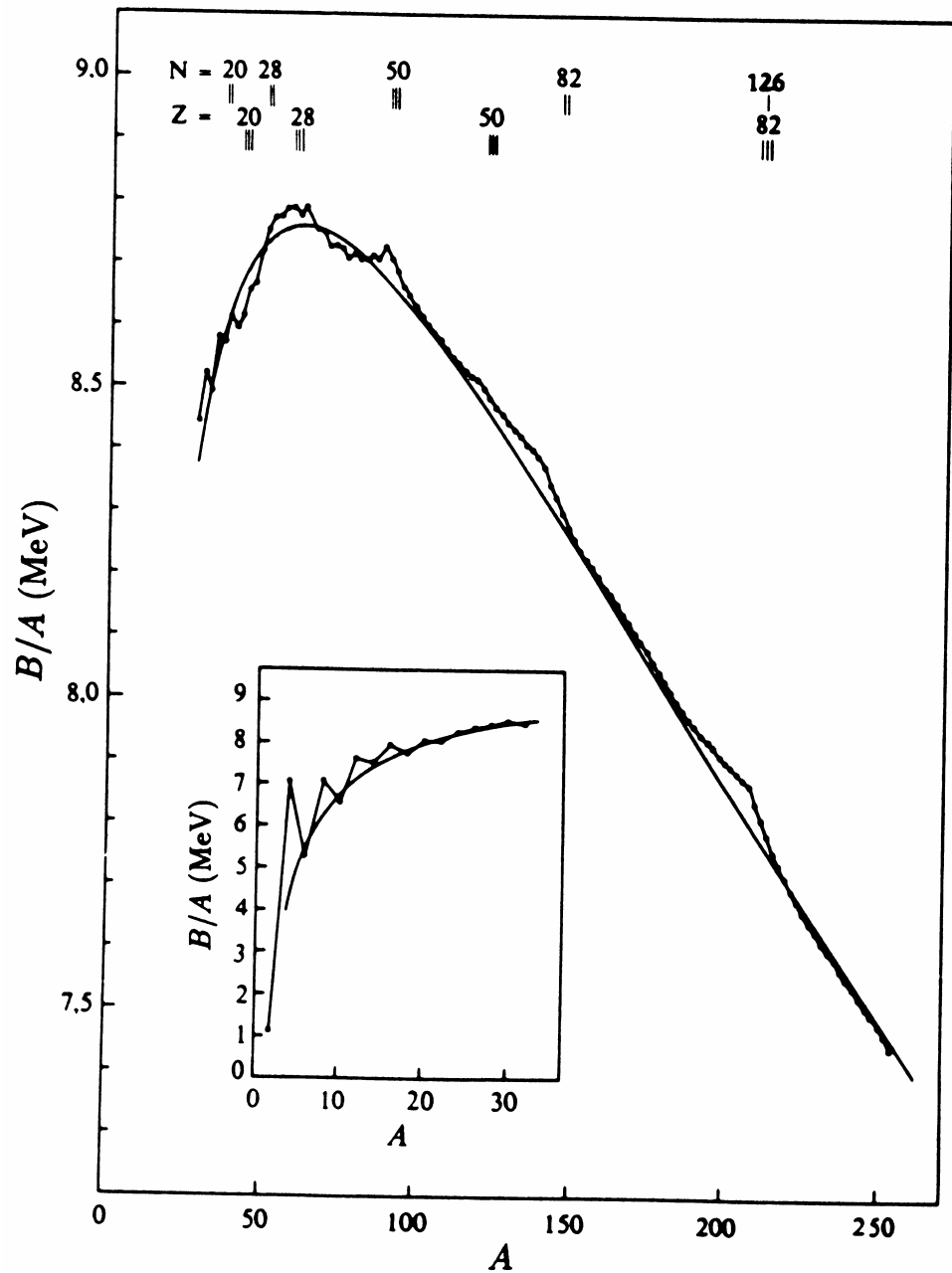
$$a_s = 17.23 \text{ MeV}$$

$$a_c = 0.714 \text{ MeV}$$

$$a_{SYM} = 23.29 \text{ MeV}$$

$$\Delta = 11.2 \text{ MeV}$$

Wartości są dopasowane
do danych doświadczalnych.



Jaki układ Z protonów i $(A-Z)$ neutronów będzie stabilny?

- Ze względu na oddziaływania **silne**: energia potrzebna do oderwania jednego bądź wielu nukleonów musi być dodatnia.
- Ze względu na oddziaływania **słabe**: układ A nukleonów musi odnaleźć swoje minimum energii całkowitej zmieniając neutrony na protony lub odwrotnie.
Minimum może być lokalne.

Stabilność ze względu na oddziaływania słabe

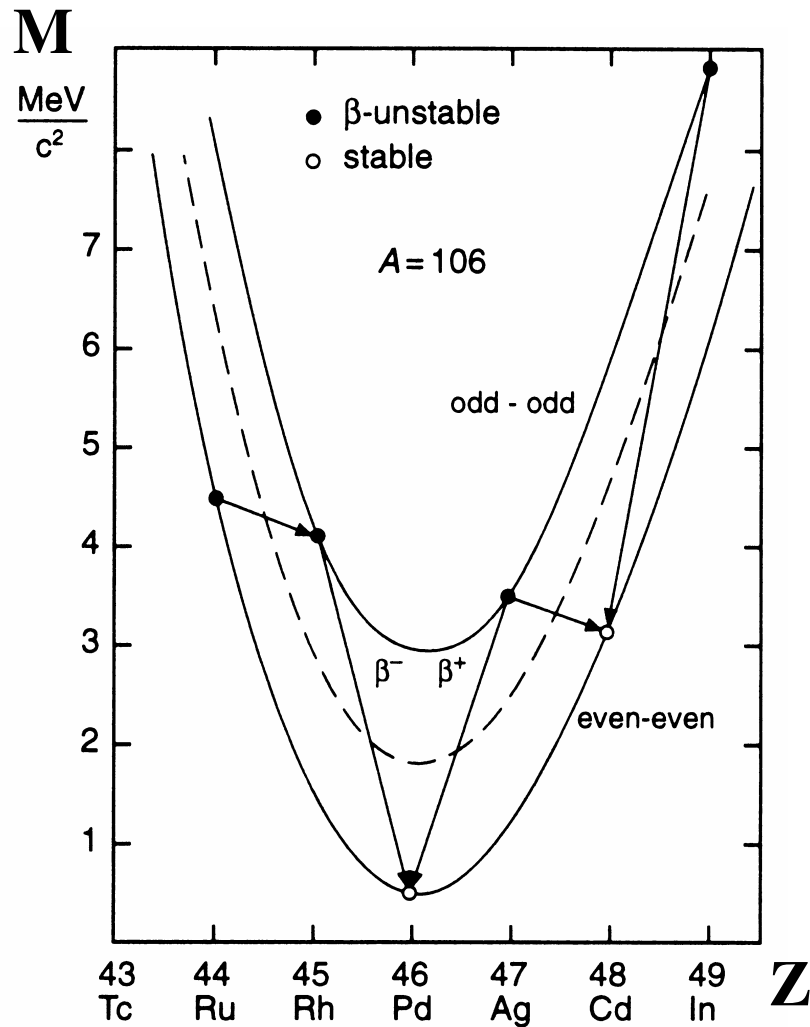
$$M(A, Z) = ZM_H + (A - Z)m_n - B(A, Z)$$

$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

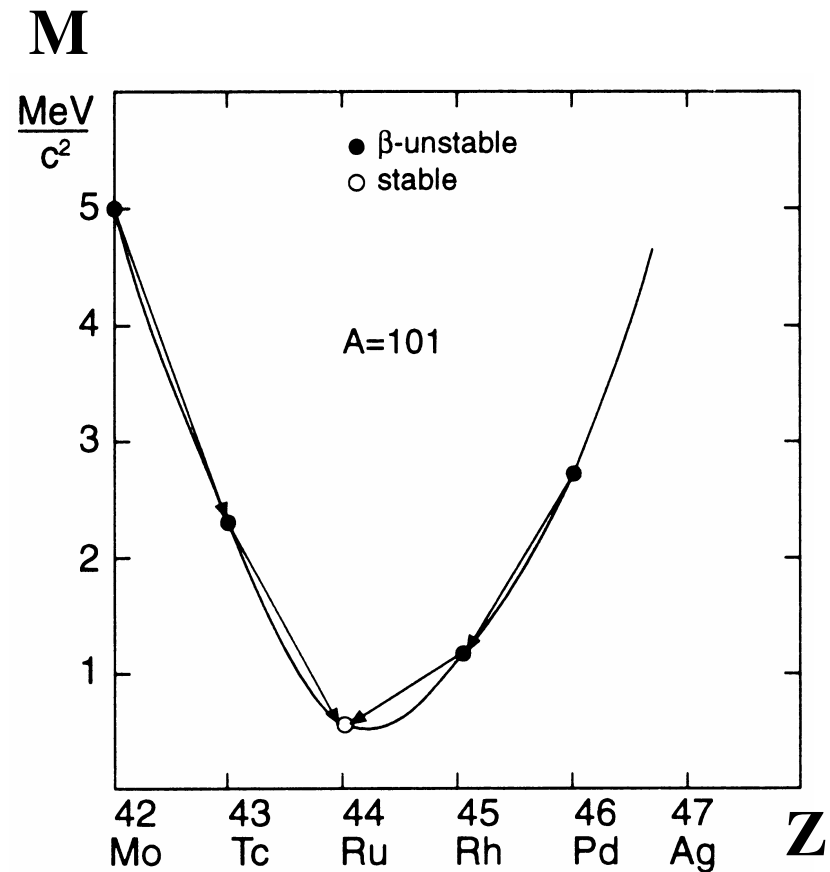
$$A = \text{const}$$

$$M(A, Z) = \alpha + \beta Z + \gamma Z^2 - \delta/A^{1/2}$$

A parzyste i A nieparzyste



$$\delta = +\Delta \text{ i } \delta = -\Delta$$



$$\delta = 0$$

A = const: ile protonów?

Dla $A = \text{const}$ zależność masy układu A nukleonów jest zależnością paraboliczną w funkcji liczby protonów Z .

Istnieje minimum: układ stabilny

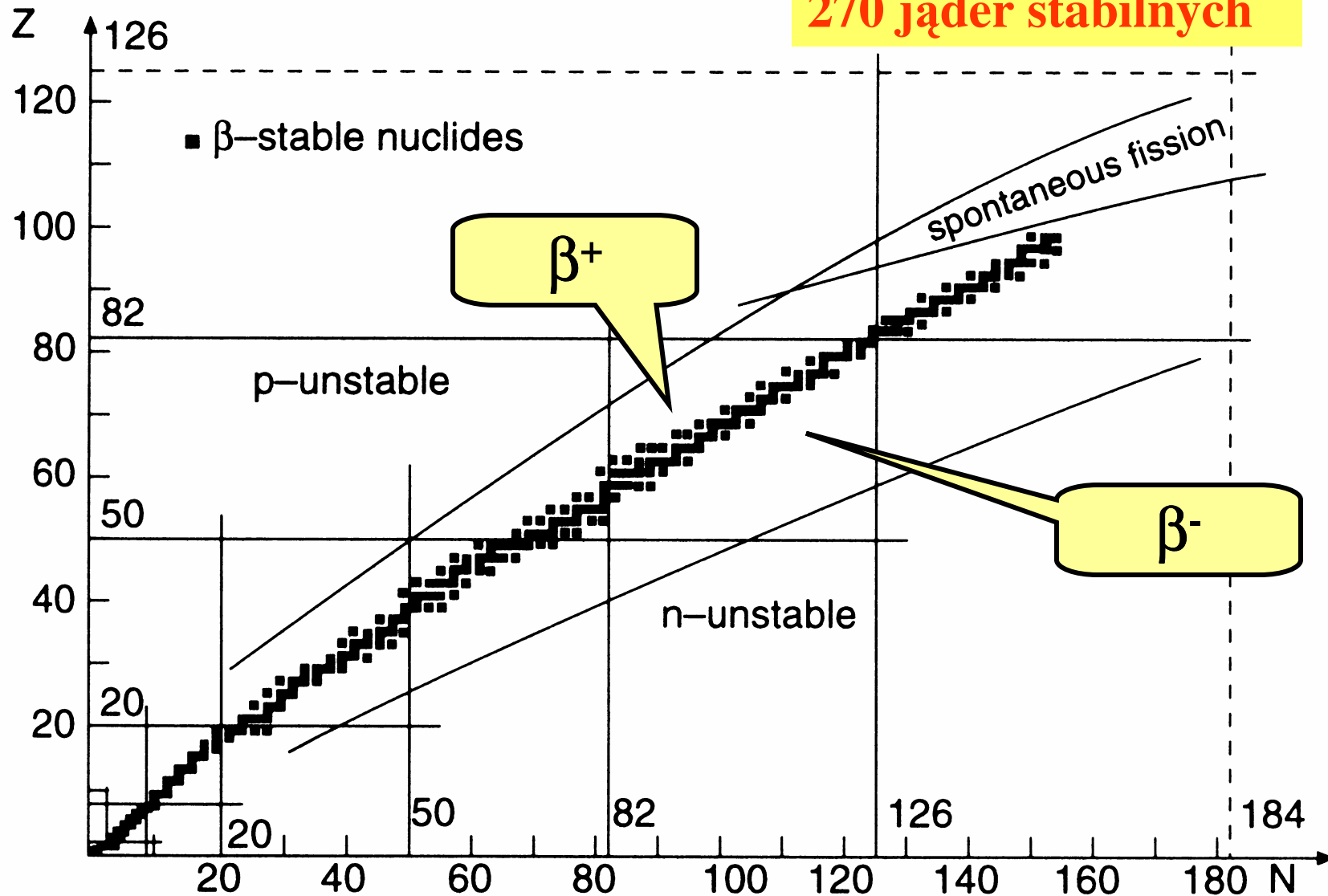
$$\partial M / \partial Z = 0 \text{ dla } A = \text{const}$$

ścieżka stabilności β :

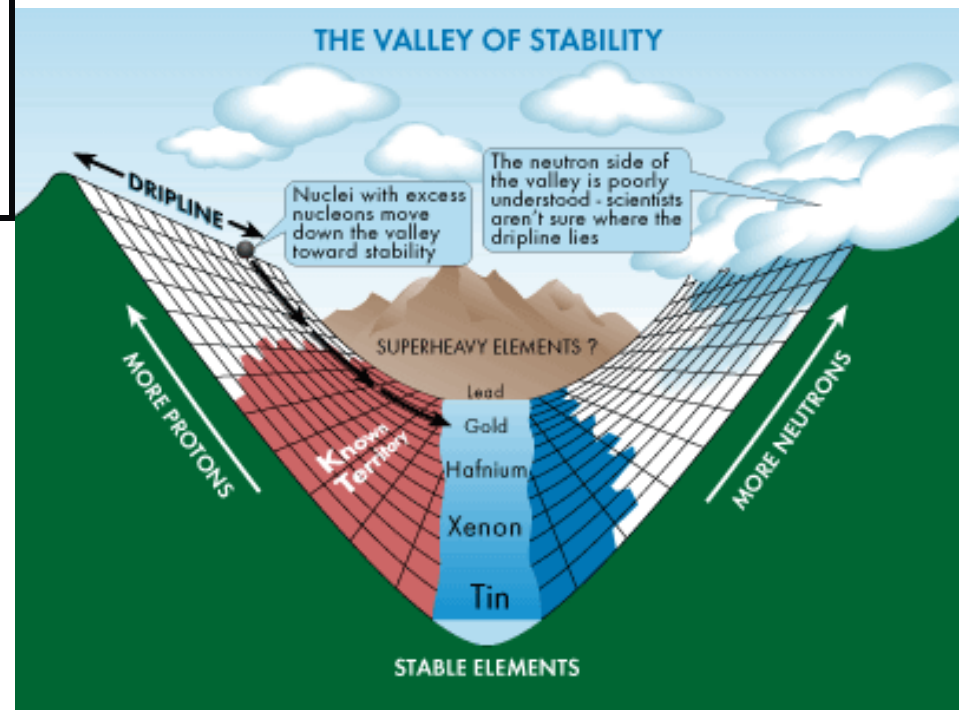
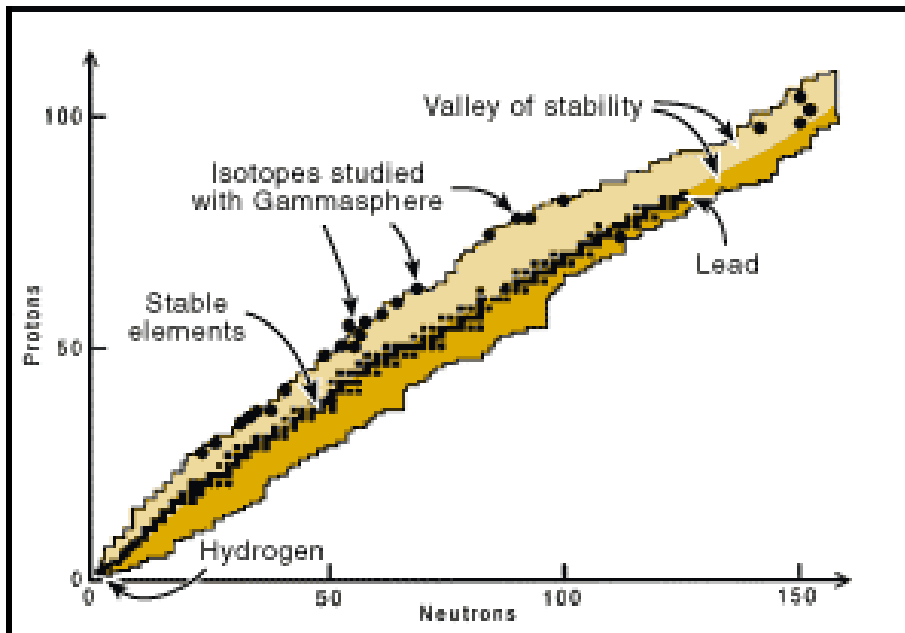
$$Z \approx N - 0,4 A^2 / (A + 200)$$

Ścieżka stabilności

270 jąder stabilnych



Ścieżka stabilności jąder atomowych



Stabilność ze względu na oddziaływania silne

energia separacji neutronu

$$M(A, Z) + S_N = M(A-1, Z) + m_N$$

$$Z \times M_H + (A - Z)m_N - B(A, Z) + S_N =$$

$$= Z \times M_H + (A - 1 - Z)m_N - B(A - 1, Z) + m_N$$

$$- B(A, Z) + S_N = -B(A - 1, Z)$$

$$S_N = B(A, Z) - B(A - 1, Z)$$

$$S_P = B(A, Z) - B(A - 1, Z - 1)$$

energia separacji protonu

Granice „Świata” nuklidów

1. Linia oderwania protonu $S_P = 0$

$$S_P = \Delta B = \Delta B \Delta Z / \Delta Z \approx \Delta Z \partial B / \partial Z$$

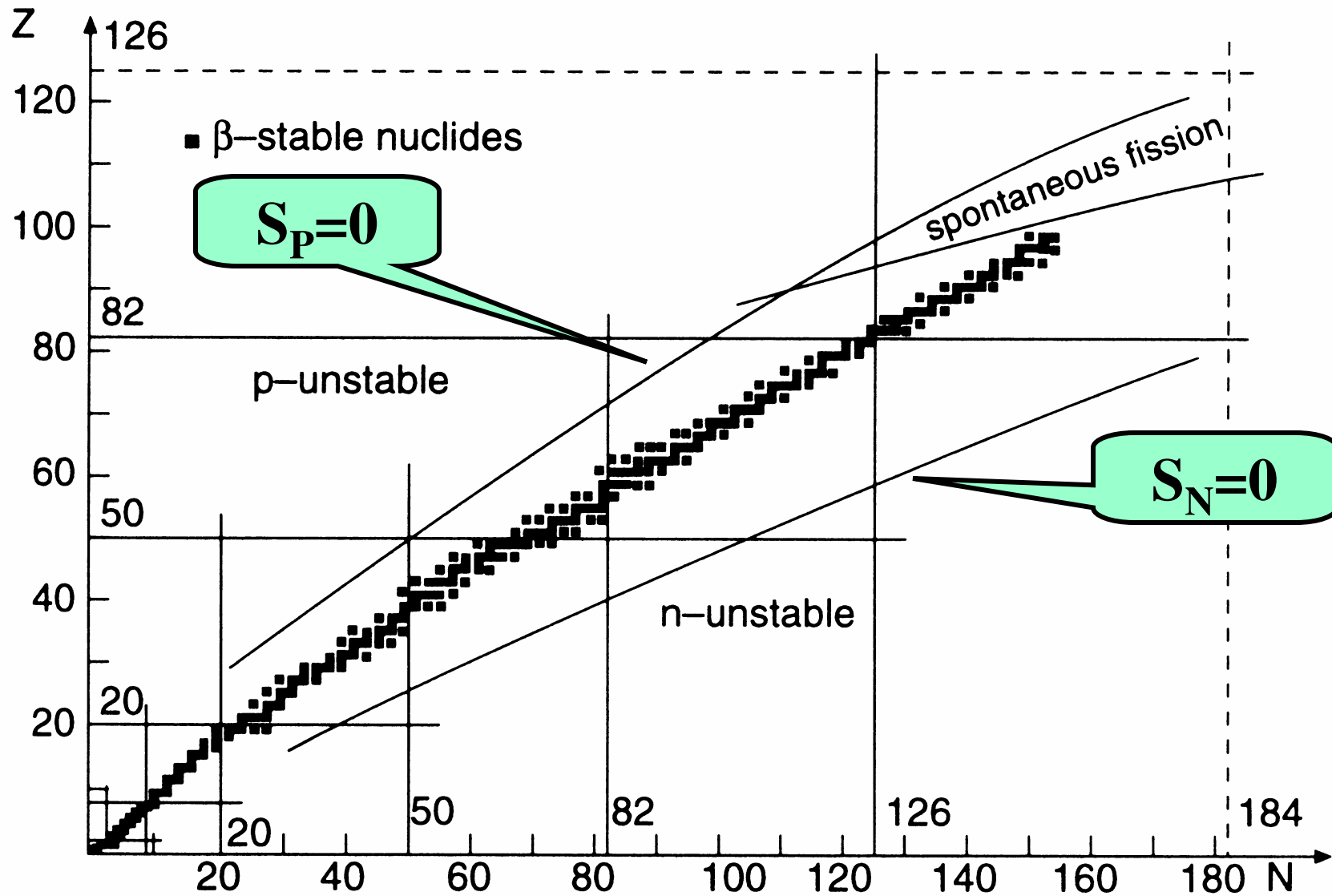
$$\partial B / \partial Z = 0 \text{ dla } N = \text{const}$$

2. Linia oderwania neutronu $S_N = 0$

$$S_N = \Delta B = \Delta B \Delta N / \Delta N \approx \Delta N \partial B / \partial N$$

$$\partial B / \partial N = 0 \text{ dla } Z = \text{const}$$

Ścieżka stabilności



Instytut Radowy w Paryżu

11 rue Pierre-et-Marie-Curie

22 avril

$Cl + Ca^{2+} = 14,746,05$
 $id + Ra d^e = 14,857,3$ $Ra d^e = 0,109,25$

$Ce^{2+} + Ag d^e = 10,314,65$ $Ag d^e = 0,10649$
 $Cl + Ag d^e = 10,421,12$

$\frac{7.39270}{7.02723}$	$\frac{0.10925}{0.02630}$	0.2694
$\frac{2.41993}{2.41993}$	$\frac{Ra}{0.08295}$	0.2723

$\frac{2.91882}{2.41993}$	$\frac{1.85003}{0.49889}$
0.49889	2.34892

$\frac{Ra}{Cl} = 3.154$

$Ra = 223.3$

Déposit réduit avec Li et HCl , Ag et
 le Ca^{2+} , Ag

$Ca^{2+} + Ag^{2+} = 10.3942$
 10.31461
 $Ag = 0.07955$
 ~~$Cl = 0.02530$~~

$Cl = 0.10564$

Différence avec Cl donné précédemment
 $0.0083 m$

y a-t-il un peu de Ag non adhérent au Ca^{2+} ?



wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Krótką historia promieniotwórczości (I)

- α , β – Rutherford, 1899
 γ – Villard, 1900

Naturę tego promieniowania wyjaśniono później :

1902 - promienie β to elektrony (Kaufmann)

1908 - cząstki α to jony helu (Rutherford)

1914 - promienie γ tej samej natury co X (Rutherford i Andrade)

1934 - odkrycie przemiany β^+ (Curie i Joliot)

- Spontaniczne rozszczepienie - Flerov i Pietrzak, 1940

Zagadka przemiany α

^{238}U

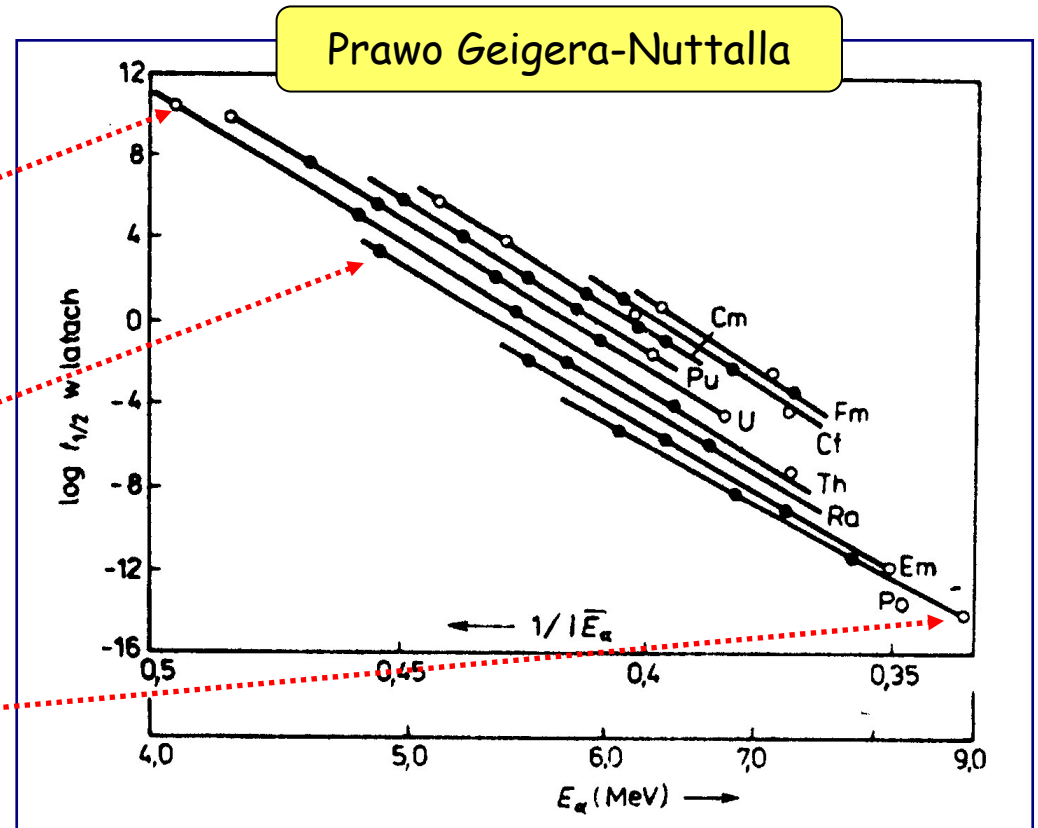
$E_\alpha = 4.2 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 4.5 \text{ mld lat}$

^{226}Ra

$E_\alpha = 5 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 1600 \text{ lat}$
($v = 0.05 c = 15000 \text{ km/s}$!)

^{212}Po

$E_\alpha = 8.8 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 0.3 \mu\text{s}$



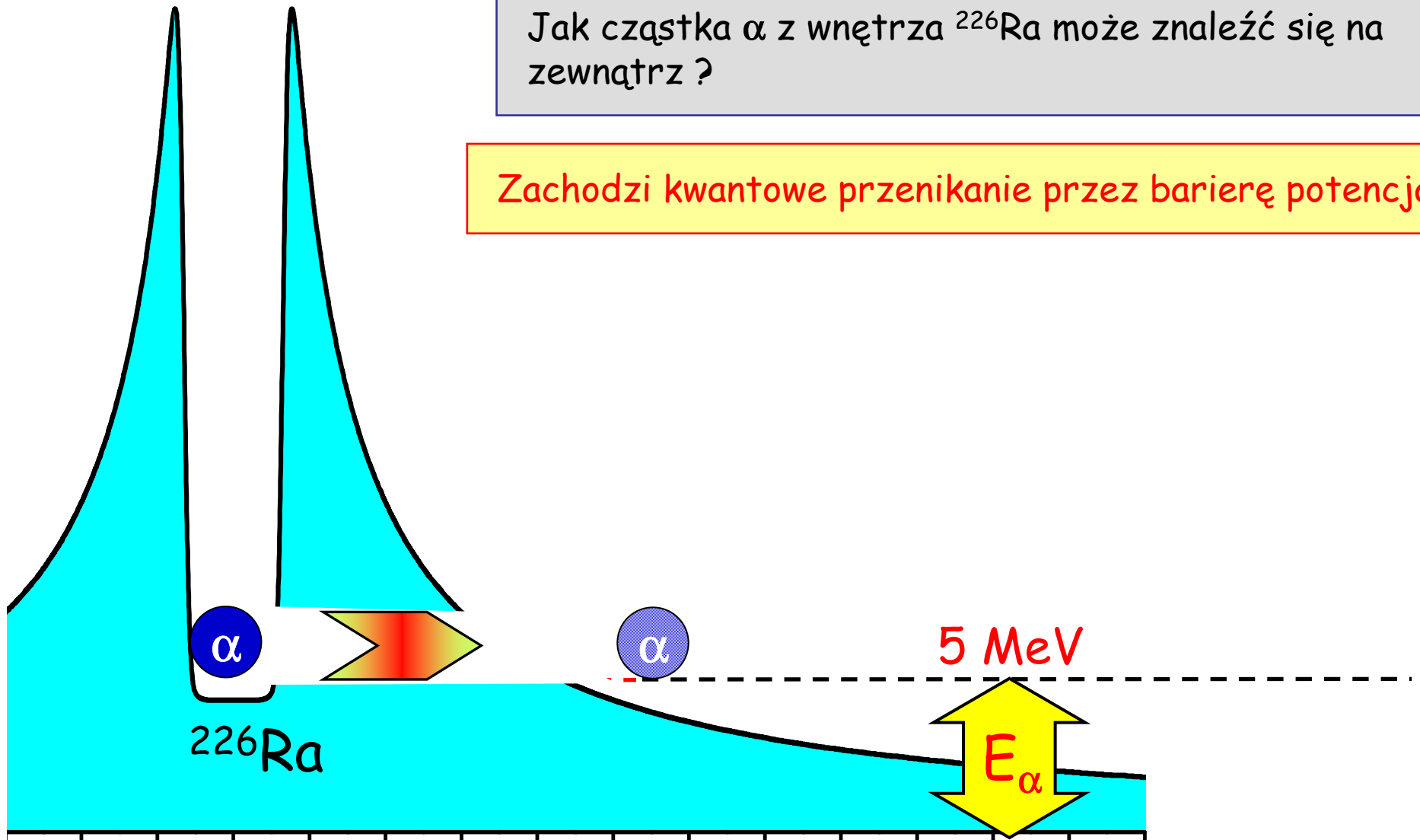
Dlaczego półokresy rozpadu tak bardzo się różnią?

wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Zagadka przemiany α

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

Zachodzi kwantowe przenikanie przez barierę potencjału



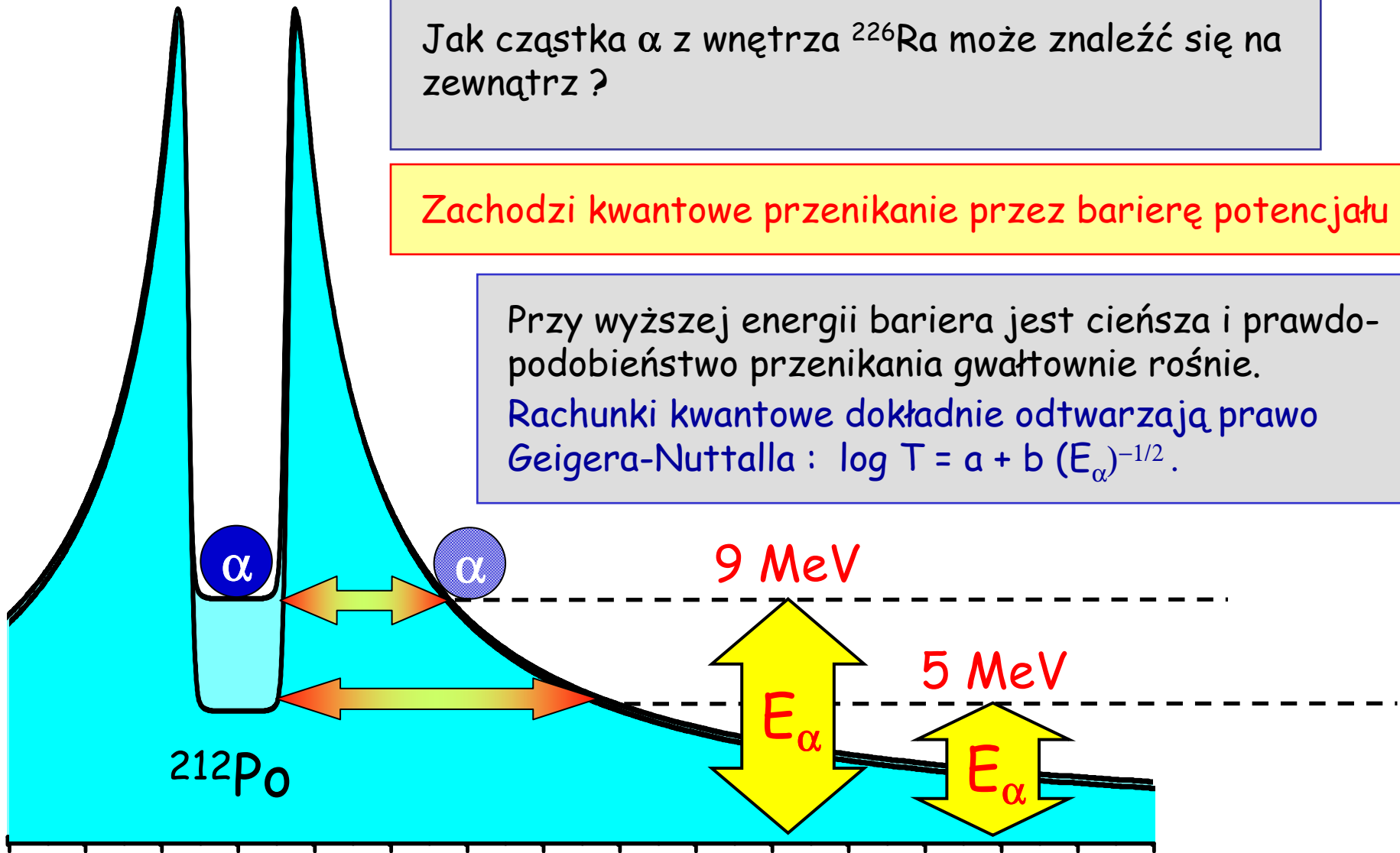
wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Zagadka przemiany α

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

Zachodzi kwantowe przenikanie przez barierę potencjału

Przy wyższej energii bariera jest cieńsza i prawdopodobieństwo przenikania gwałtownie rośnie.
Rachunki kwantowe dokładnie odtwarzają prawo Geigera-Nuttalla : $\log T = a + b (E_\alpha)^{-1/2}$.

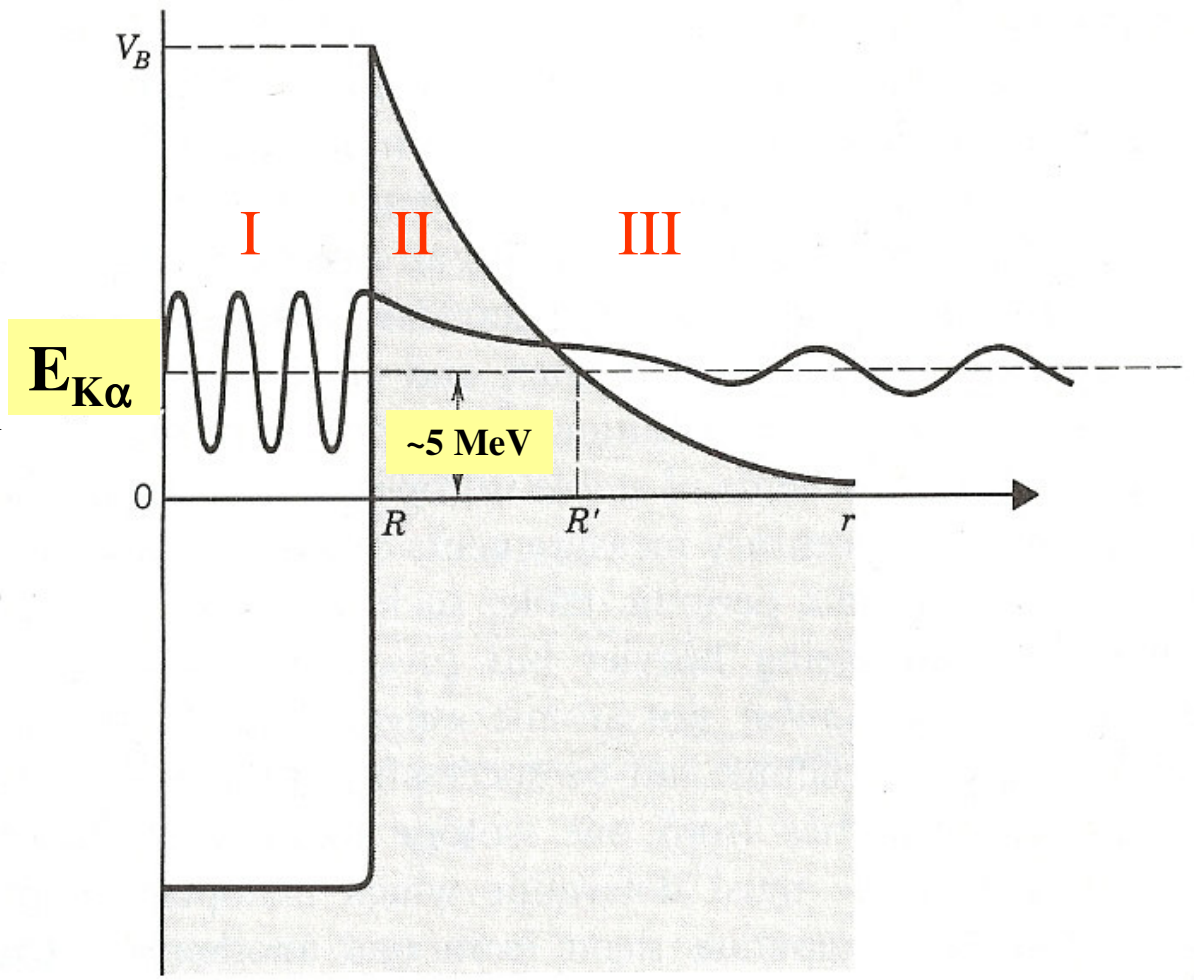


wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Rozpady z emisją ciężkich cząstek naładowanych

Rozpad α

- I** $\psi(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$
- II** $\psi(x) = Fe^{-\xi x} + Ge^{\xi x}$
- III** $\psi(x) = Ce^{ikx}$



Energia rozpadu α $^{226}\text{Ra}_{88} \rightarrow ^{222}\text{Rn}_{86} + ^4\text{He}_2$

$$Q_\alpha = [M(^{226}\text{Ra}) - M(^{222}\text{Rn}) - M(^4\text{He})] c^2 = 4,869 \text{ MeV}$$

$$Q_\alpha > 0 \qquad S_\alpha = -Q_\alpha$$

**Spontaniczny rozpad α zachodzi dla
 $Q_\alpha > 0$ dla $Z > 73$**

$$Q_\alpha = E_{K\alpha} + E_{K\text{odrz}}$$

$$2m_\alpha E_{K\alpha} = p^2 = 2 M E_{K\text{odrz}} \qquad M = M(^{222}\text{Rn})$$

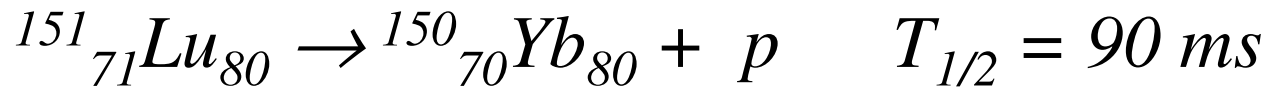
$$Q_\alpha = E_{K\alpha} + E_{K\alpha} (m_\alpha/M)$$

$$E_{K\alpha} = Q_\alpha / (1 + 4/222)$$

$$E_{K\alpha} = 4,782 \text{ MeV}$$

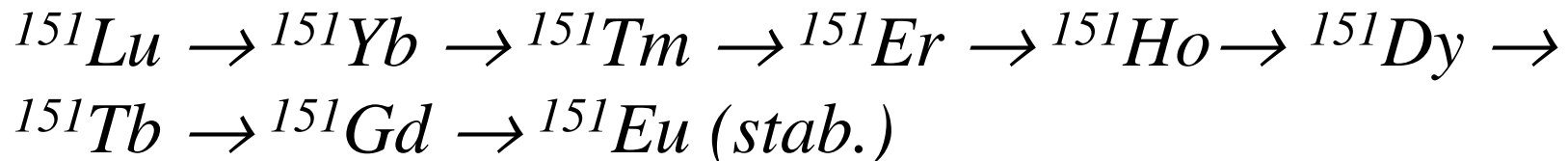
Rozpad protonowy

Trwały izotop lutetu: ^{175}Lu



Rozpad protonowy jądra poza linią oderwania protonu,
 $S_p < 0$ (ze stanu podstawowego)

konkurencja: rozpad β^+ ($p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$)
i/lub wychwyt elektronu ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$)



Energia rozpadu protonowego

$$Q_P = [M(^{151}\text{Lu}) - M(^{150}\text{Yb}) - M(^1\text{H})] c^2 = 1,241 \text{ MeV}$$

$$Q_P = E_{KP} + E_{Kodrz}$$

$$2m_P E_{KP} = p^2 = 2 M E_{Kodrz} \quad M = M(^{150}\text{Yb})$$

$$Q_P = E_{KP} + E_{KP} (m_P / M)$$

$$Q_P = E_{KP} (1 + 1 / 150) \quad E_{KP} = 1,233 \text{ MeV}$$

$$\text{Energia separacji protonu} \quad S_P = - Q_P$$

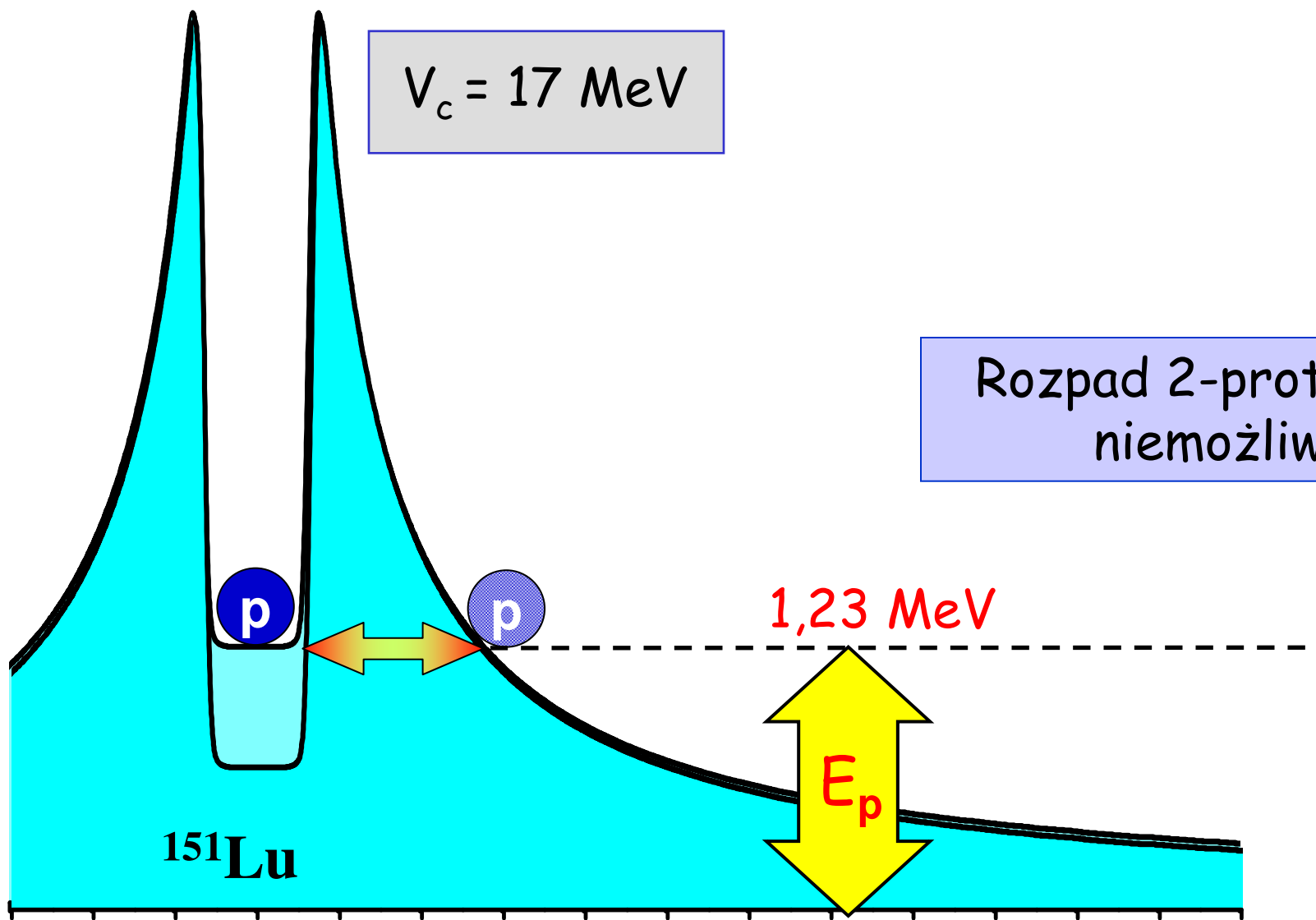
Bariera potencjału dla $^{150}\text{Yb} + p$
(kulombowska + odśrodkowa)

$$V = 17 \text{ MeV}$$

Energia układu $^{150}\text{Yb} + p$

$$V_c = 17 \text{ MeV}$$

Rozpad 2-protonowy
niemożliwy



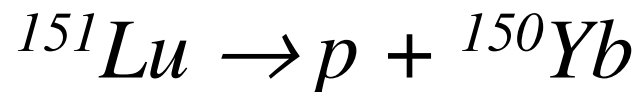
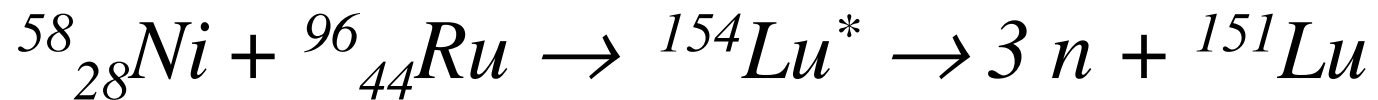
Rozpad protonowy

Promieniotwórczość protonowa

Eksperyment w GSI Darmstadt, 1981 rok
(przy współudziale polskich fizyków)

pociski: $^{58}_{28}\text{Ni}_{30}$ ciężkie jony
energia: 300 MeV

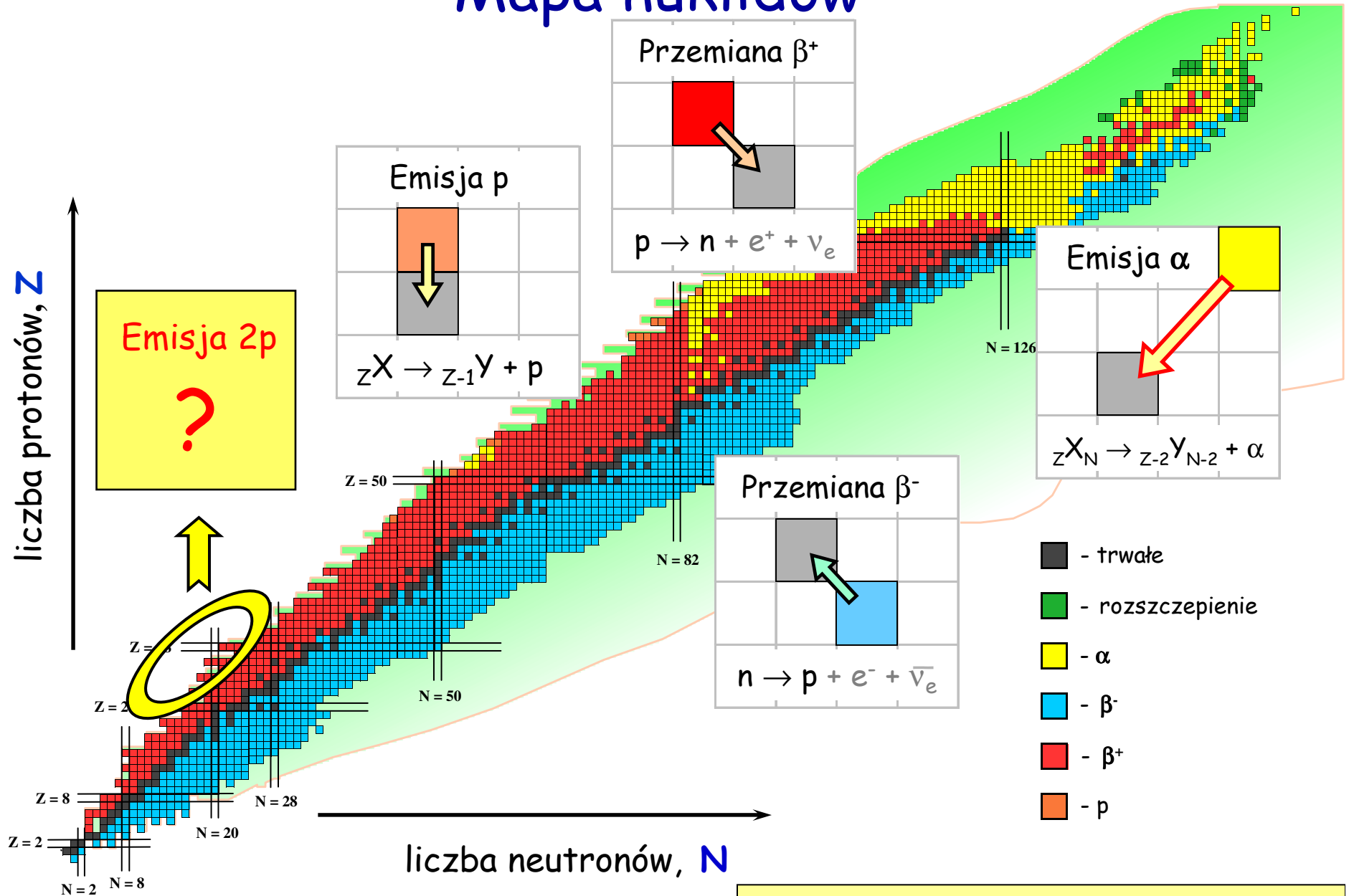
reakcja:



$$S_p = -1,241 \text{ MeV}$$

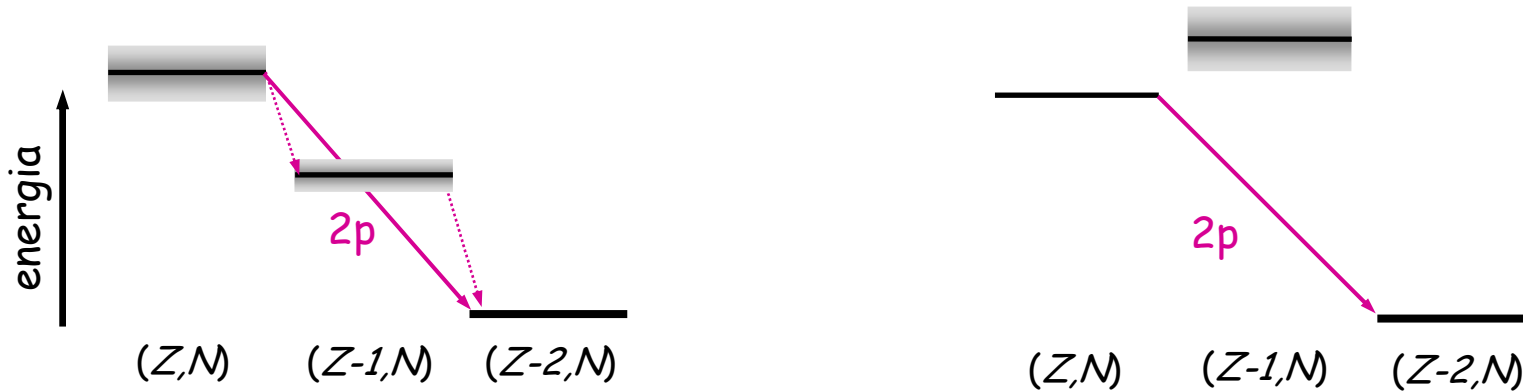
Obecnie ok. 40 przypadków
promieniotwórczości protonowej

Mapa nuklidów



wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Emisja dwóch protonów z jądra atomowego

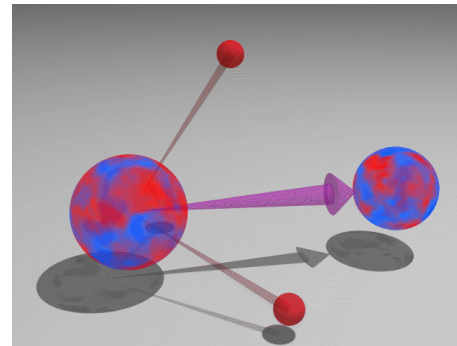
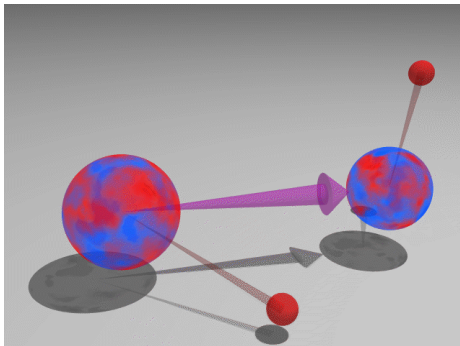


Stany jądrowe

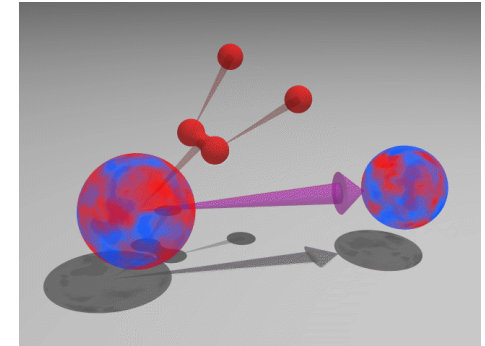
- wzbudzone : ^{22}Mg , ^{26}Si (83), ..., ^{14}O (96)
- podstawowe : ^6Be (89), ^{12}O (94)

Poszukiwany !

- podejrzani : ^{45}Fe , ^{48}Ni , ^{54}Zn



?



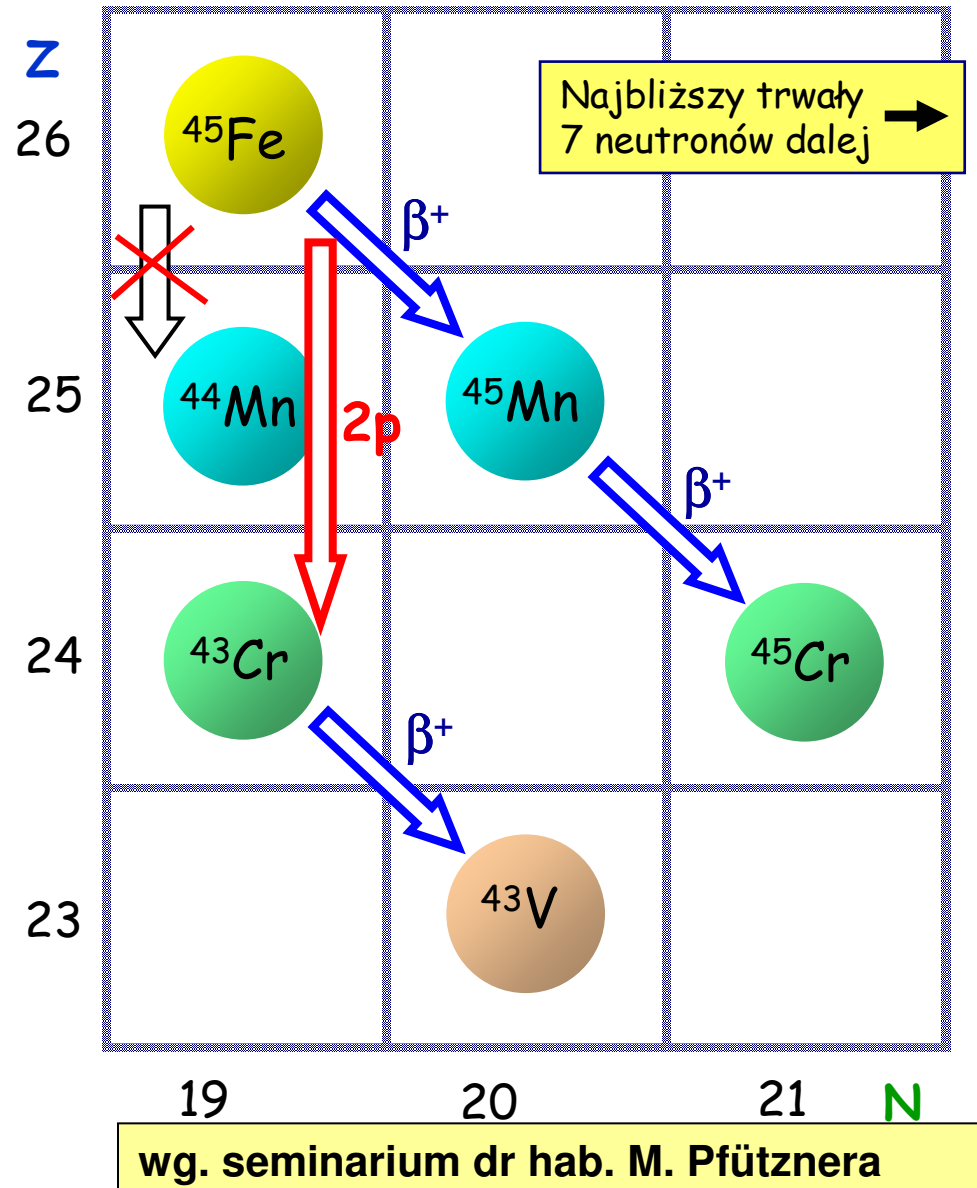
wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Jak rozpada się ^{45}Fe ?

Aby doszło do emisji $2p$ oba protony muszą przetunelować przez barierę zanim zajdzie przemiana β^+
 $\rightarrow 1 \mu\text{s} < T_{2p} < 10 \text{ ms}; E_{2p} \approx 1 \text{ MeV}$

Wyzwanie dla eksperymentu

- Bardzo trudno wytworzyć ^{45}Fe : można liczyć najwyżej na kilkanaście atomów.
- Dostrzec słaby sygnał (1 MeV) kilka μs po zatrzymaniu ^{45}Fe (1000 MeV).
- Odróżnić $2p$ od β^+ .



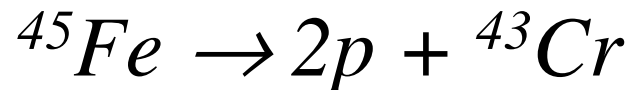
Rozpad 2-protonowy

Promieniotwórczość 2-protonowa

Eksperyment w GSI Darmstadt, 2001 rok
(przy silnym udziale polskich fizyków)

pociski: $^{58}_{28}\text{Ni}_{30}$ ciężkie jony
energia: 650 MeV/A

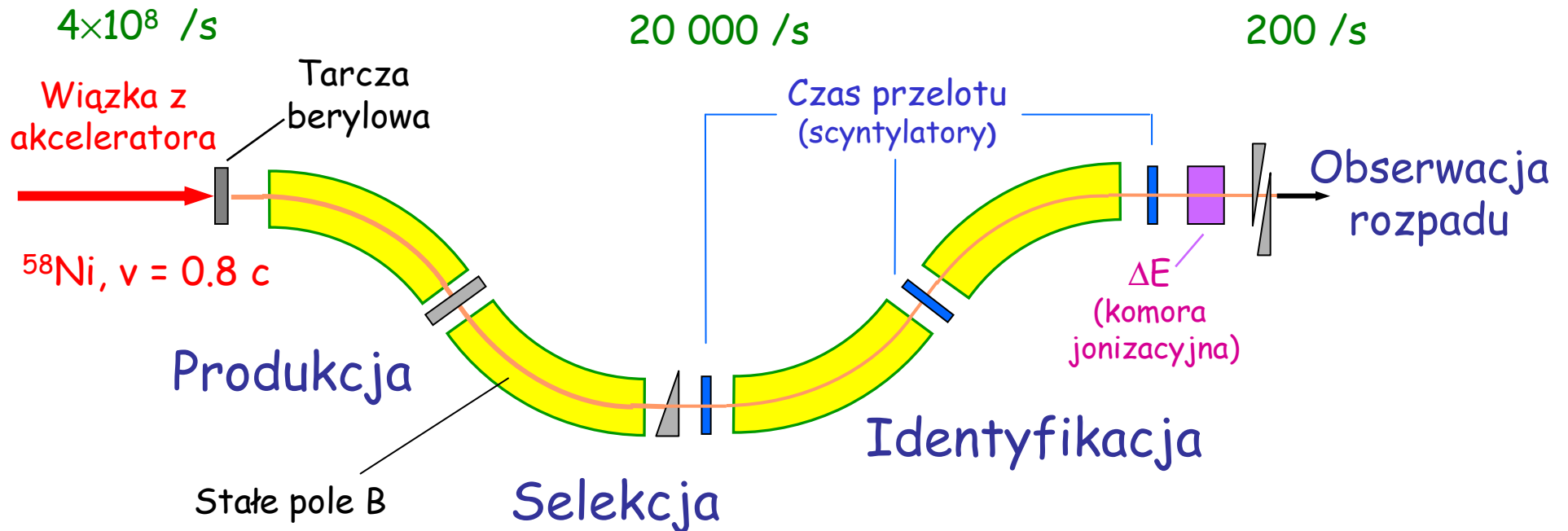
reakcja:



$$S_{2p} \approx -1,1 \text{ MeV}$$

Eksperyment w GSI Darmstadt

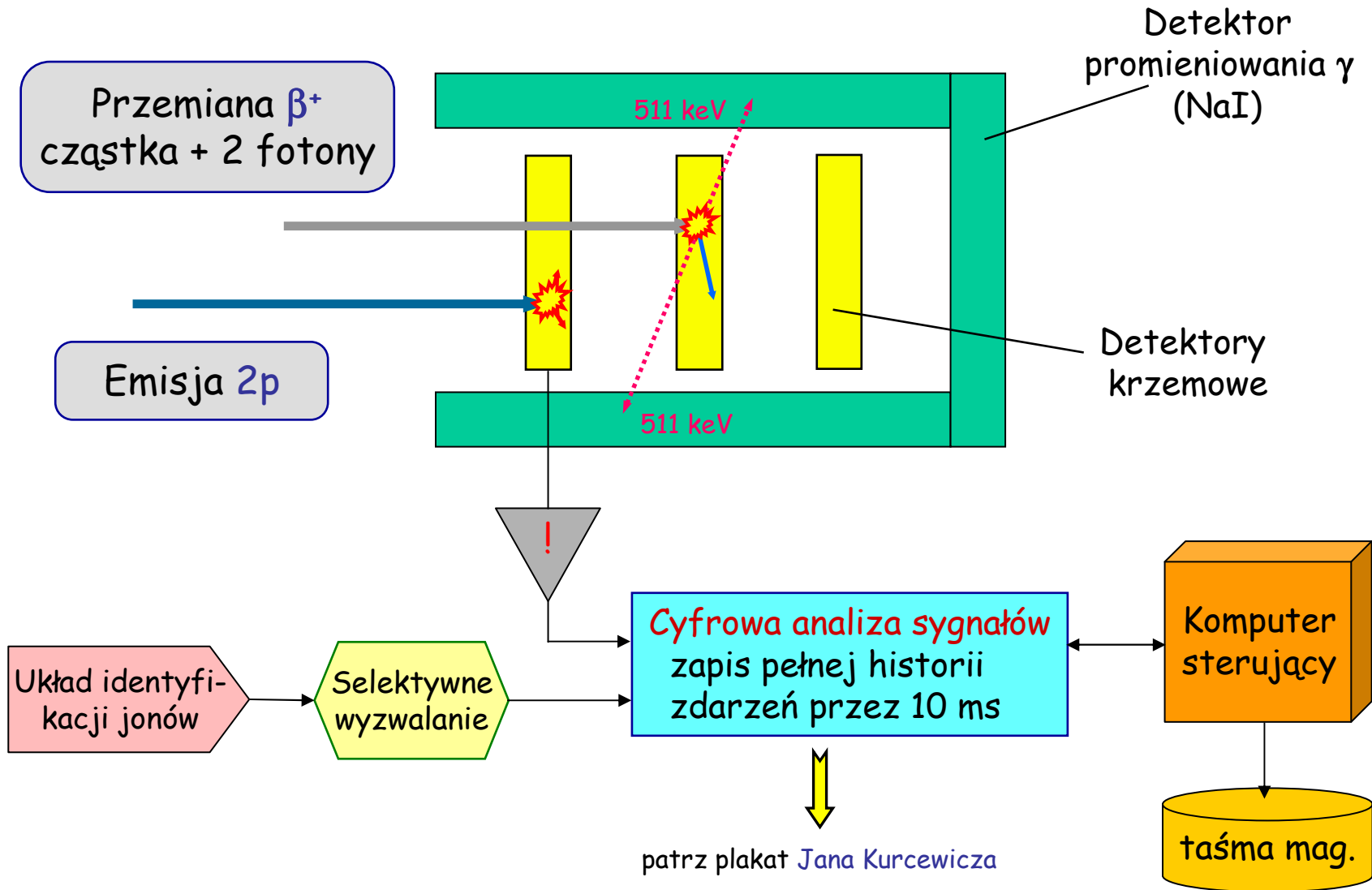
Separator fragmentów FRS



Pomiar czasu przelotu i strat energii pozwala zidentyfikować w locie każdy jon!

wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Detekcja rozpadu ^{45}Fe



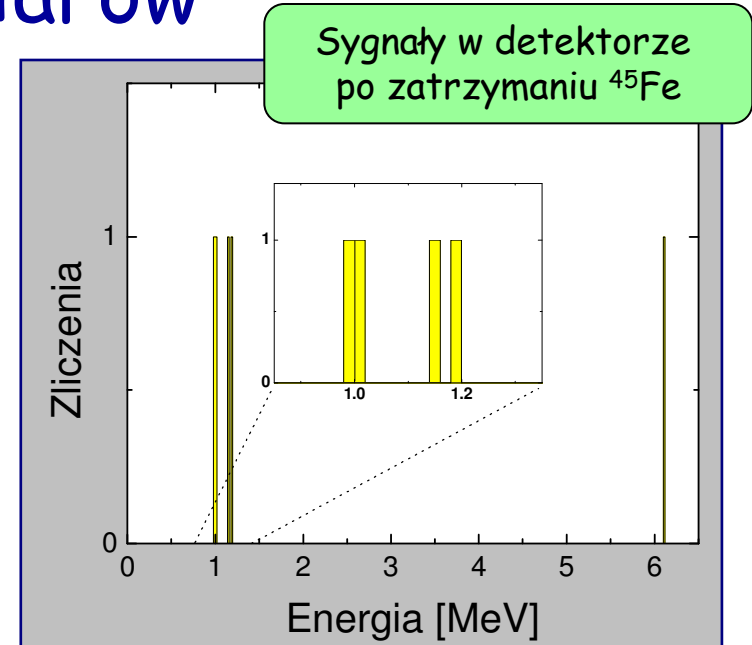
wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Wyniki pomiarów

Eksperyment w GSI - VII 2001

- 5 dni pomiaru
- 2.5×10^{14} pocisków
- obserwacja 5 atomów ^{45}Fe
 - 4 przypadki : $E \approx 1$ MeV (brak γ)
 - 1 przypadek : duża energia i γ (β^+ ?)
 - półokres $T_{1/2} \approx 3$ ms

zgodne tylko z hipotezą emisji 2p !

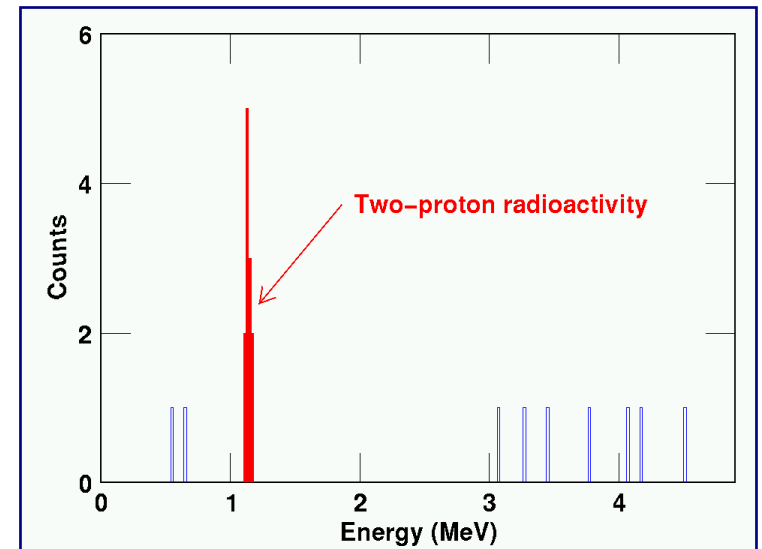


Eksperyment w GANIL (Caen) - V 2000

- obserwacja 22 atomów ^{45}Fe
 - 12 przypadków w pikie $E \approx 1.1$ MeV (brak β i γ)
 - półokres $T_{1/2} \approx 4$ ms

⇒ M. P. i in., Eur. Phys. J. A **14**, 279 (2002)

⇒ J. Giovinazzo i in., PRL **89**, 102501 (2002)



wg. seminarium dr hab. M. Pfütznera

Uczestnicy

W przygotowaniach i w eksperymencie brali udział fizycy z Warszawy, Darmstadt, Bordeaux, Oak Ridge, Knoxville i Caen.

Główną rolę w zaplanowaniu i przeprowadzeniu pomiarów oraz w analizie i interpretacji wyników odegrała grupa polska :

Marek Pfützner

Krzysztof Rykaczewski (elektronika cyfrowa !)

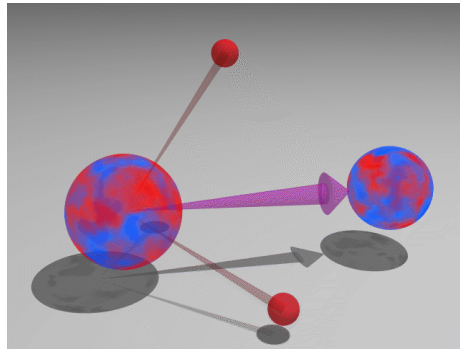
Robert Grzywacz

Zenon Janas

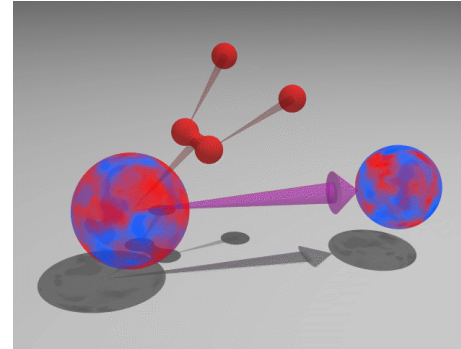
Jan Kurcewicz

Co dalej ?

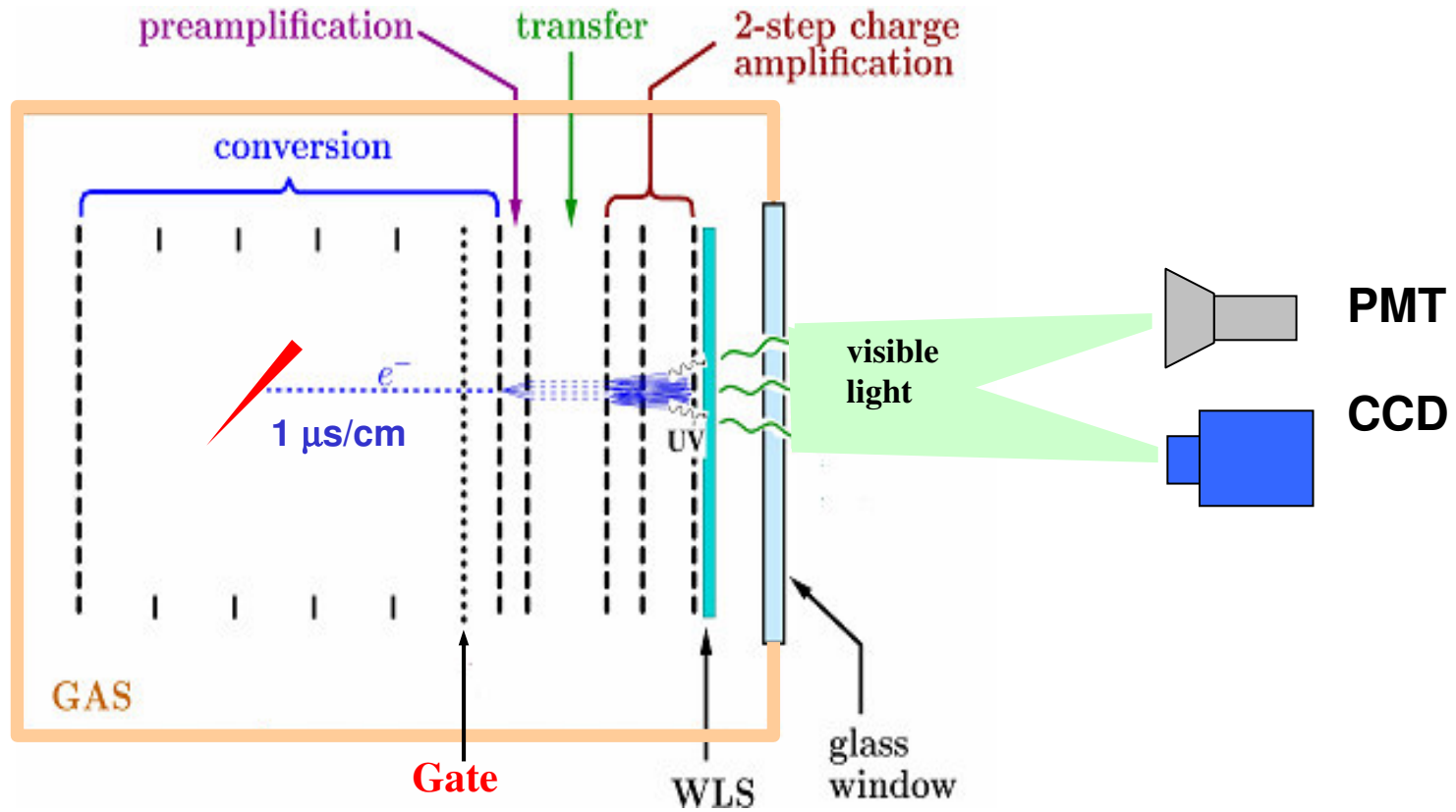
- Poszukiwania innych nuklidów emitujących 2p (^{48}Ni , $^{54}\text{Zn}, \dots$)
- Rejestracja obydwu protonów oddzielnie
 - ⇒ jaka jest ich korelacja kątowna i energetyczna ?
 - ⇒ jaki jest mechanizm promieniotwórczości 2p ?
 - ⇒ jakie są korelacje par protonów wewnątrz jądra ?



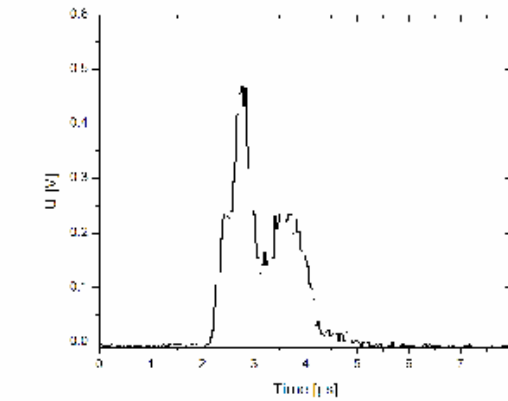
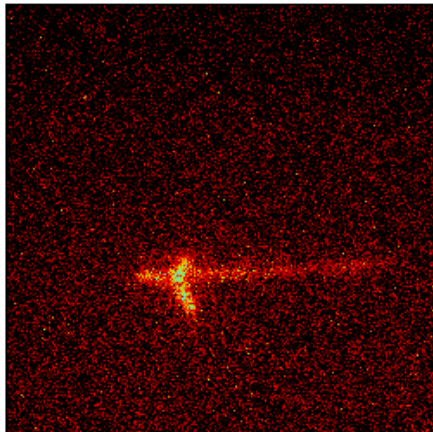
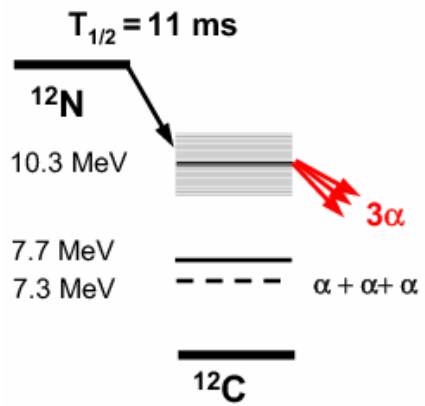
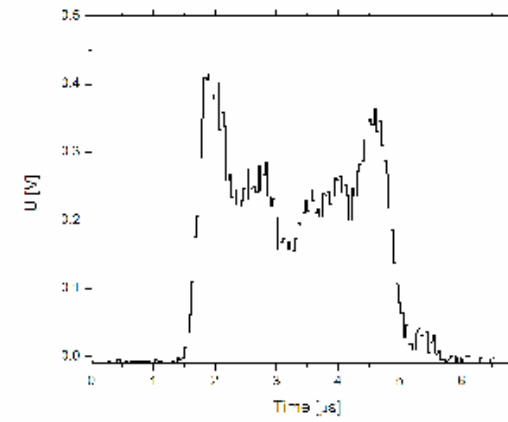
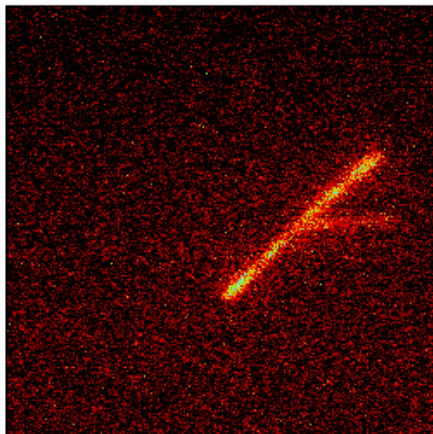
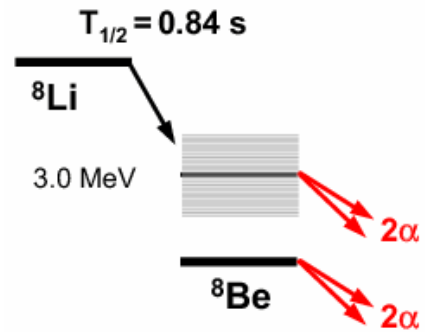
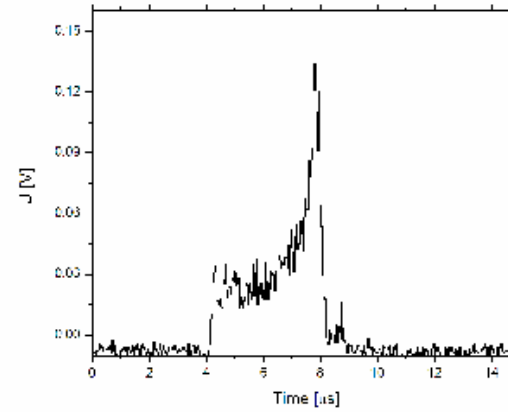
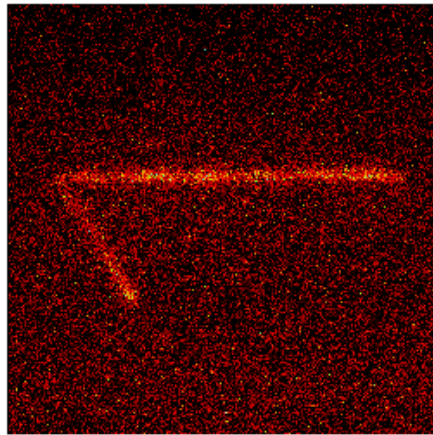
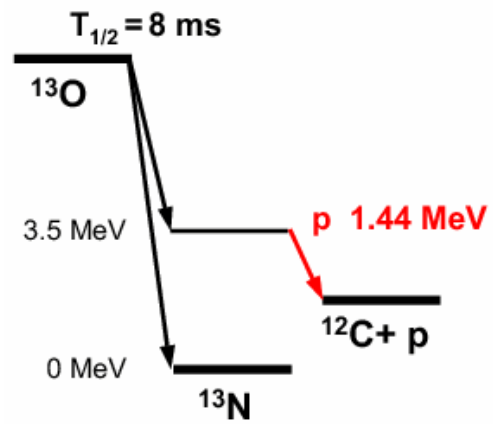
?



Optical Time Projection Chamber

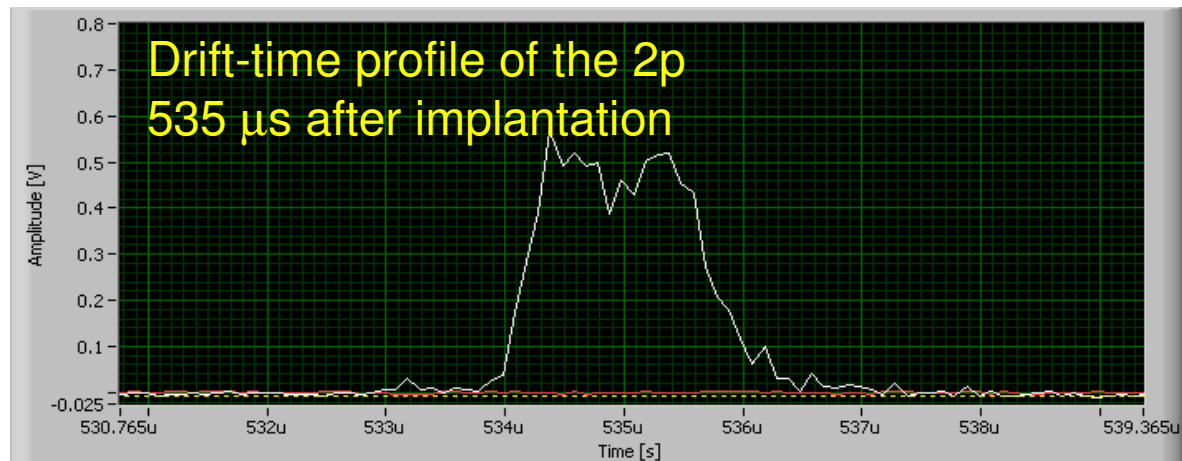
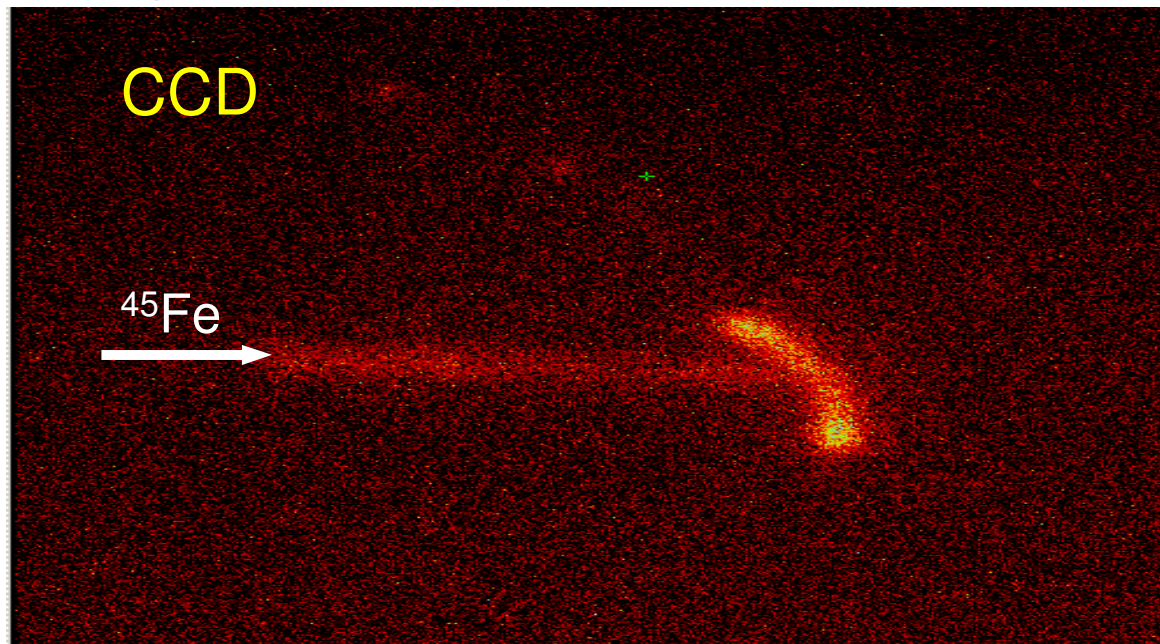


1 atm. gas: 49% He + 49% Ar + 1% N₂ + 1% CH₄



News from experiment 05016

A 2p decay event of ^{45}Fe recorded
in the Optical Time Projection Chamber



Rozpad egzotyczny

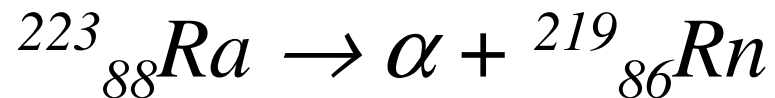
Samorzutna emisja z jądra cząstki cięższej od cząstki α : ^{14}C , ^{20}O , ^{23}F , ^{24}Ne , ^{25}Ne , ^{26}Ne , ^{28}Mg , ^{30}Mg , ^{32}Si i ^{34}Si .

Emisja następuje z jąder ciężkich z zakresu: ^{221}Fr do ^{242}Cm .

Prawdopodobieństwo emisji jest ok. 9 (emisja ^{14}C z ^{223}Ra) do ok. 16 (emisja ^{34}Si z ^{242}Cm) rzędów wielkości mniejsze od prawdopodobieństwa emisji α z tego samego jądra.

Rozpad egzotyczny z emisją ^{14}C

Eksperyment, 1984 rok



$$T_{1/2} = 11 \text{ d}$$

$$Q_{\alpha} = 5,98 \text{ MeV}$$

$10^{-7} \%$



$$V = 63 \text{ MeV}$$

Krótką historia promieniotwórczości (II)

- Przewidywanie emisji p i 2p – V. Goldansky 1960

- Odkrycie emisji p ze stanu
 - wzbudzonego ^{53m}Co – Jackson i in. 1970
 - podstawowego ^{151}Lu – Hofmann i in. 1981

- Dziś znamy ok. 40 emiterów p \Rightarrow bardzo ważne narzędzie !

- Przewidywanie emisji ^{14}C , – Sandulescu, Poenaru, Greiner 1981

- Obserwacja ^{14}C z ^{223}Ra , – Rose i Jones 1984

- Do dziś zbadano ponad 20 emiterów C, O, F, Ne, Mg i Si