

# Jądra dalekie od stabilności

1. Model kropłowy jądra atomowego
2. Ścieżka stabilności  $\beta$
3. Granice „Świata” nuklidów
4. Rozpady z emisją ciężkich cząstek naładowanych
  - a) rozpad  $\alpha$
  - 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**

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

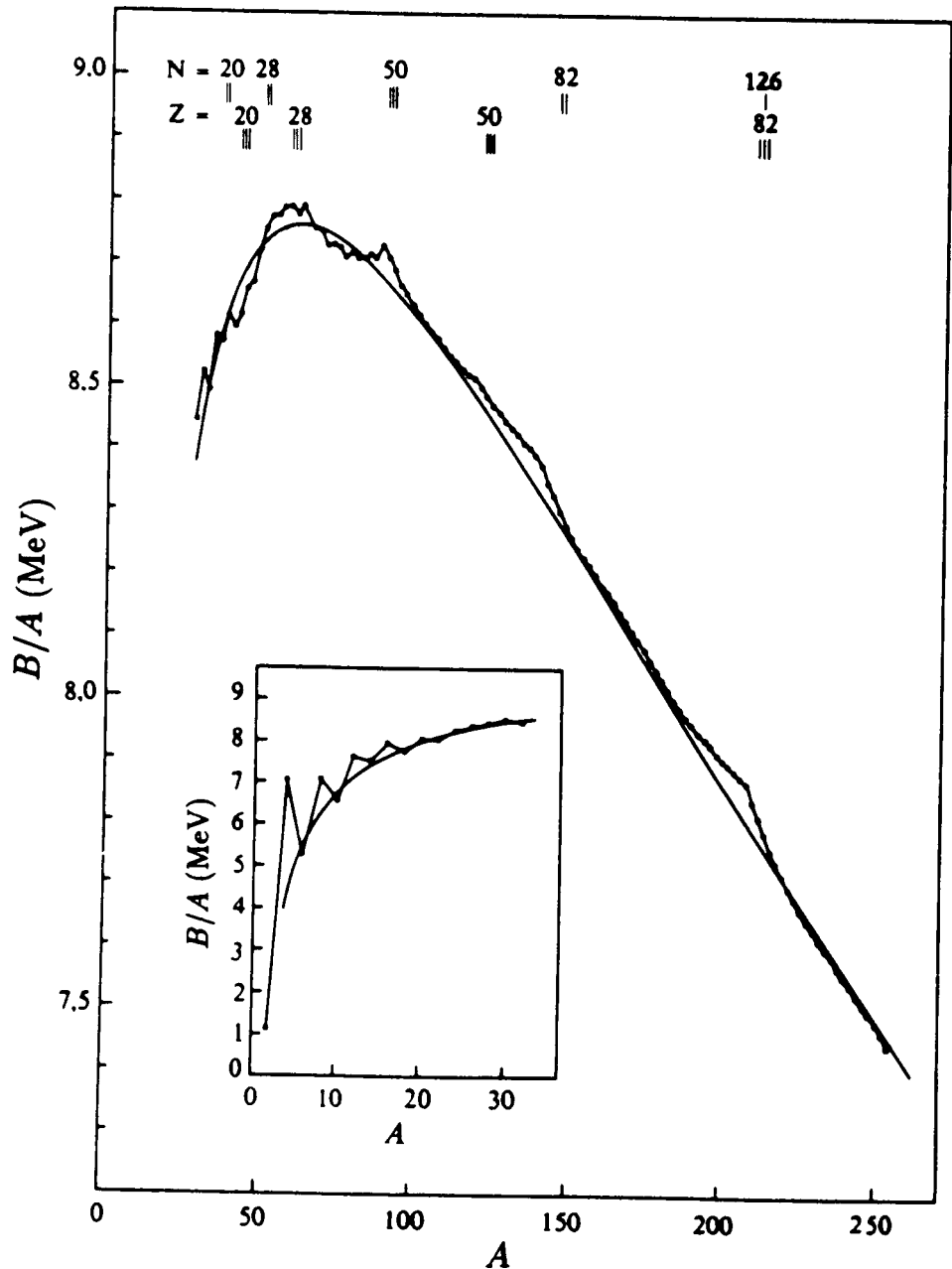
$$a_S = 17.23 \text{ MeV}$$

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

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

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

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

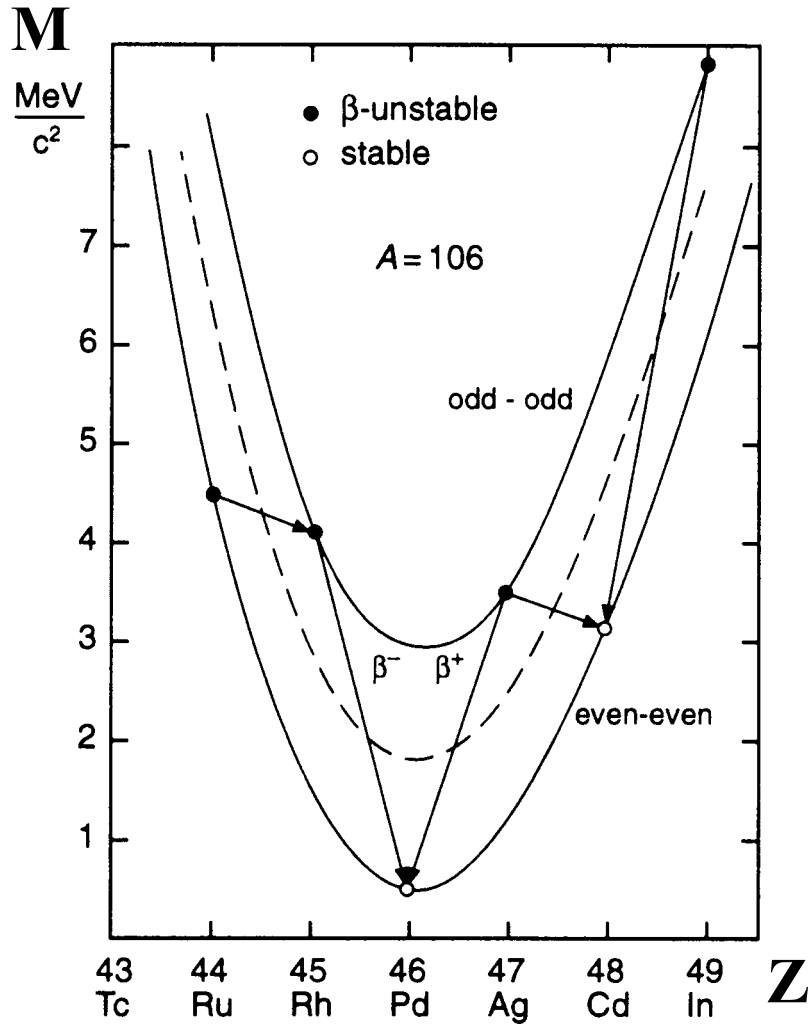
$$M(A, Z) = ZM_H + (A - Z)m_n - B(A, Z)$$

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

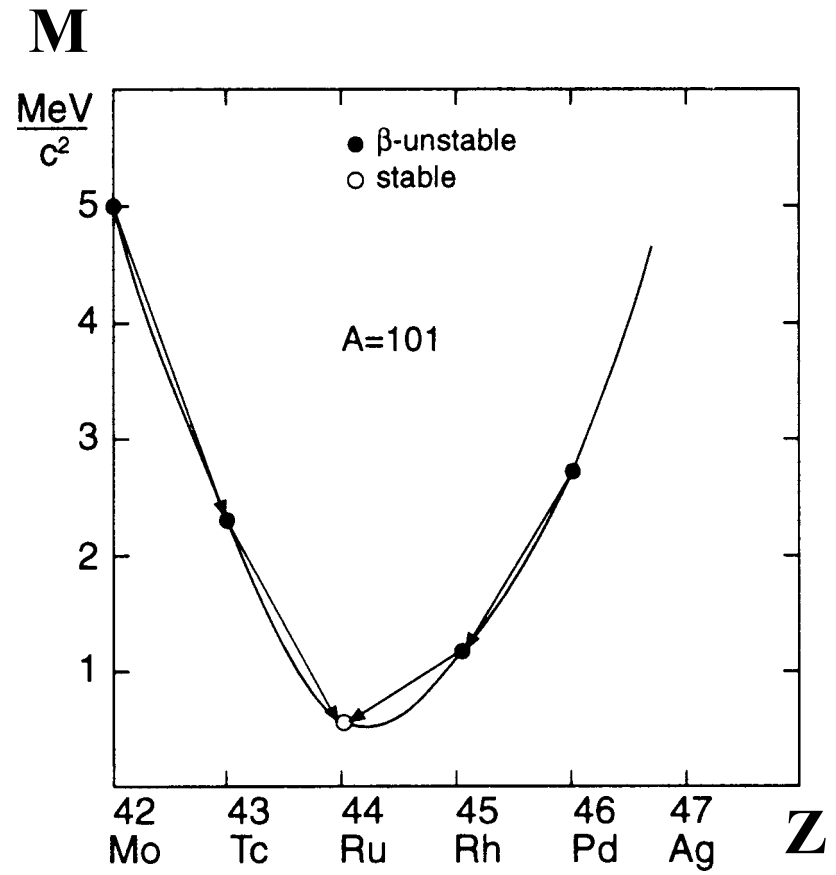
$$A = \text{const}$$

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

# 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**

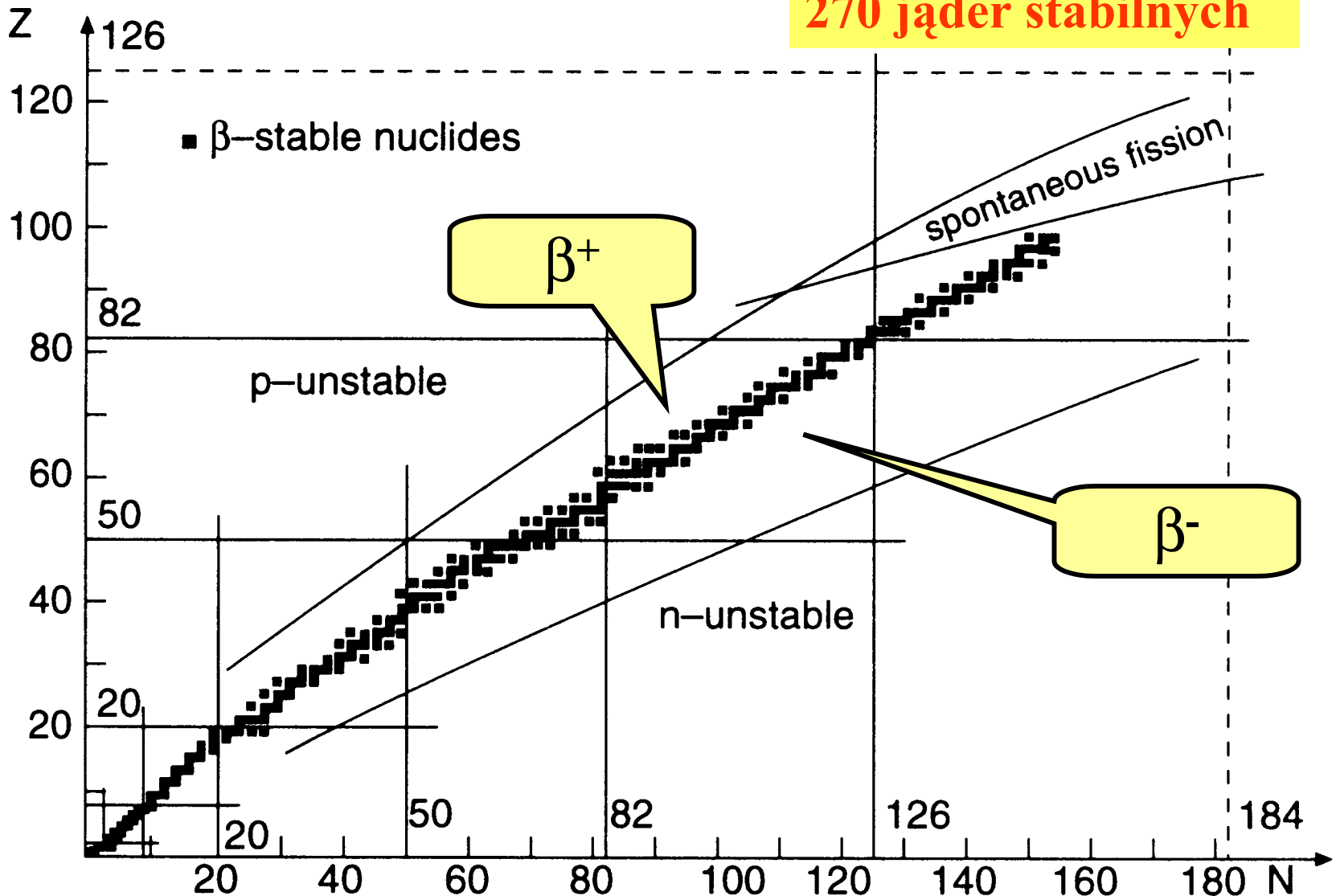
$$\partial M / \partial Z = 0 \text{ dla } A = \text{const}$$

*ścieżka stabilności  $\beta$ :*

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

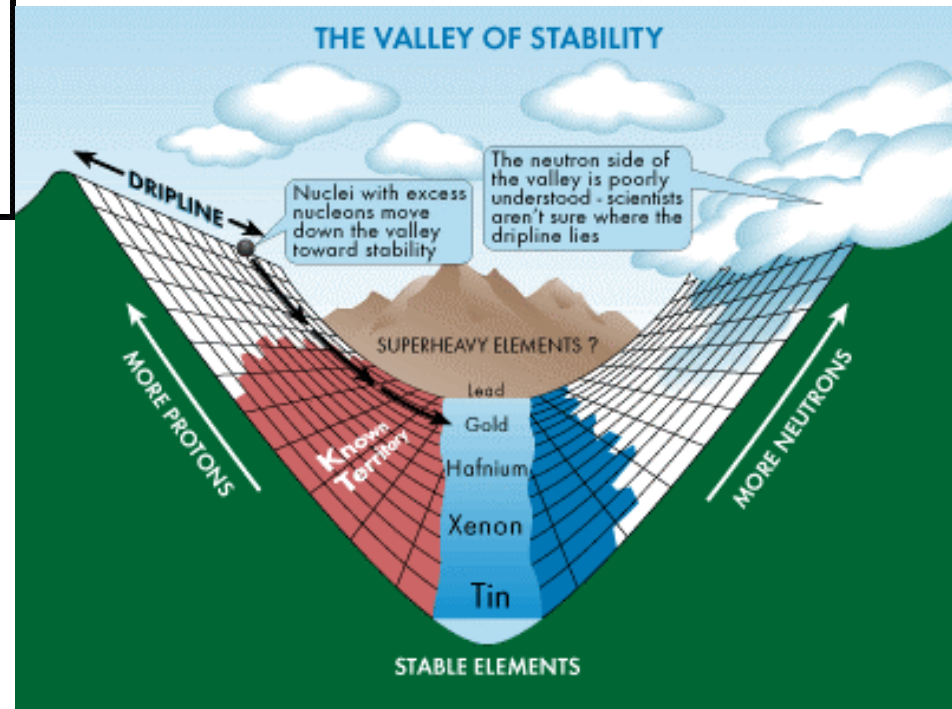
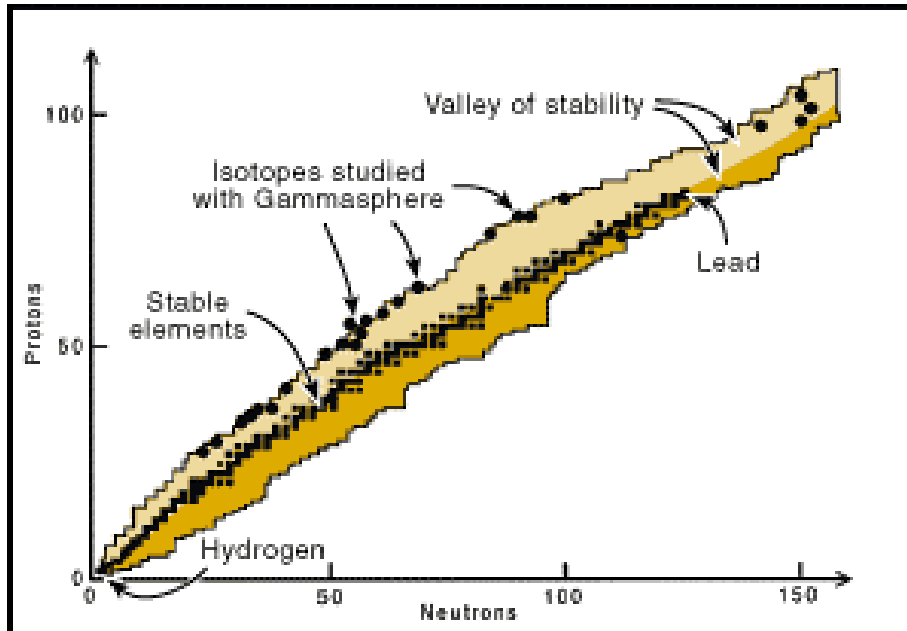
# Ścieżka stabilności

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  $S_P = 0$

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

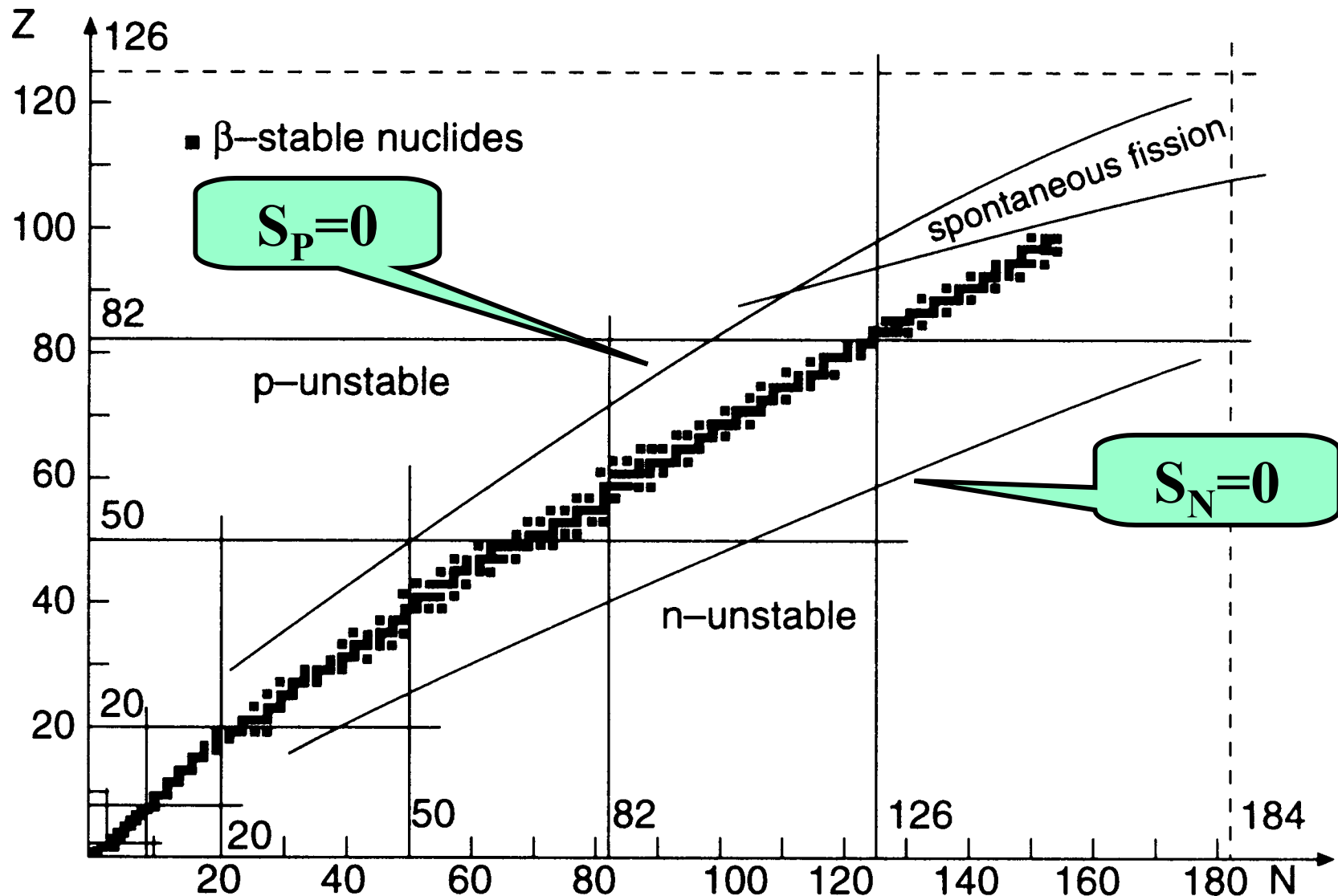
$$\partial B / \partial Z = 0 \text{ dla } N = \text{const}$$

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

27 avril

$Cl + Cauro = 14,748,05$   
 $id + Ra d^c = 14,857,3$   $Ra d^c = 0,109,25$

$Ceuret side = 10,314,65$   
 $Cr + Ag d^c = 10,427,12$   $Ag d^c = 0,10649$

$\frac{7.39270}{7.02723}$	$\frac{0.10925}{0.02830}$	$\frac{02894}{02723}$
$\frac{2.41993}{2.41993}$	$\frac{0.08295}{0.08295}$	

$\frac{2.91882}{2.41993}$	$\frac{0.49889}{0.49889}$
$\frac{Ra}{Cl} = 3.154$	$\frac{1.85003}{0.49889}$
	$\frac{2.34892}{2.34892}$

$Ra = 223.3$

Repart direct avec  $Cl$  et  $HCl$ , pour le ceuret, pour

$ceuret + argent = \frac{10.3942}{10.31461}$   
 $Ag = \frac{0.07955}{0.02530}$   
 $Cl = \frac{0.02530}{0.02530}$   
 $2^{ni} - Ra d^c = 0.10564$

différence avec  $d^c$  dans précédemment  
 $0.00083 m$

g et l en un feu de  $Ag$  non adhérent au ceuret?



# Krótką historia promieniotwórczości (I)

- $\alpha$ ,  $\beta$  – Rutherford, 1899  
 $\gamma$  – Villard, 1900

Naturę tego promieniowania wyjaśniono później :

1902 - promienie  $\beta$  to elektrony (Kaufmann)

1908 - cząstki  $\alpha$  to jony helu (Rutherford)

1914 - promienie  $\gamma$  tej samej natury co  $X$  (Rutherford i Andrade)

1934 - odkrycie przemiany  $\beta^+$  (Curie i Joliot)

- Spontaniczne rozszczepienie - Flerov i Pietrzak, 1940

# Zagadka przemiany $\alpha$

$^{238}\text{U}$

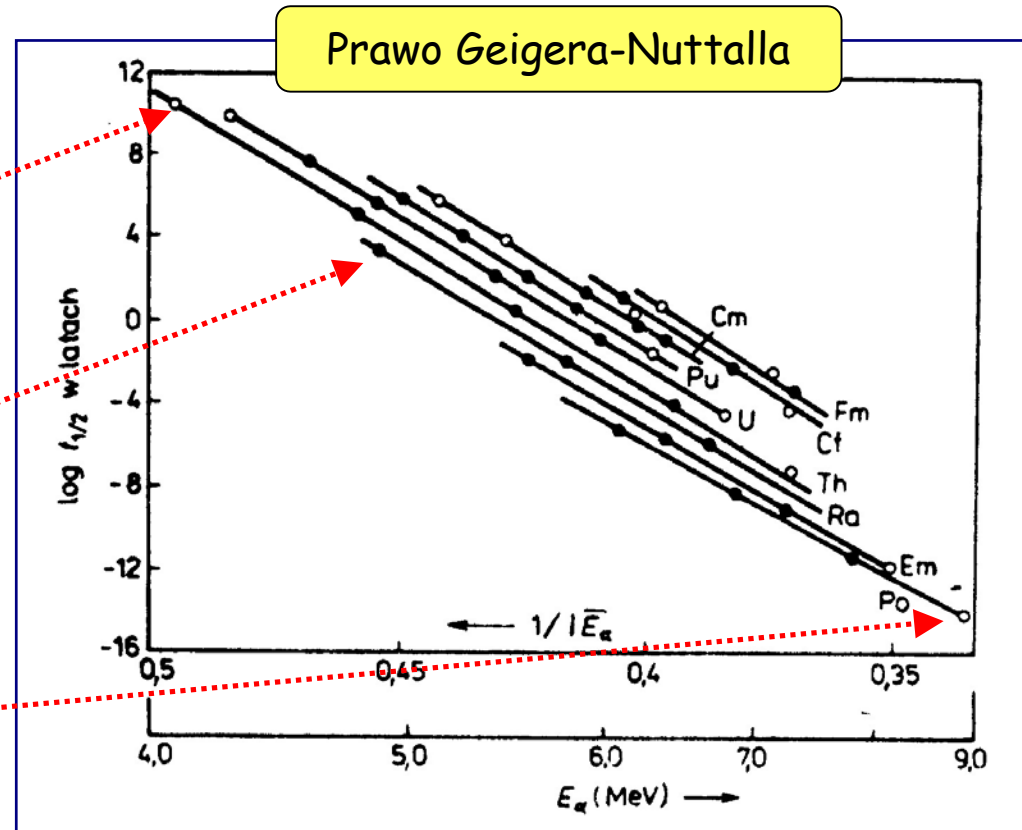
$E_\alpha = 4.2 \text{ MeV}$ ,  $T_{1/2} = 4.5 \text{ mld lat}$

$^{226}\text{Ra}$

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

$^{212}\text{Po}$

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

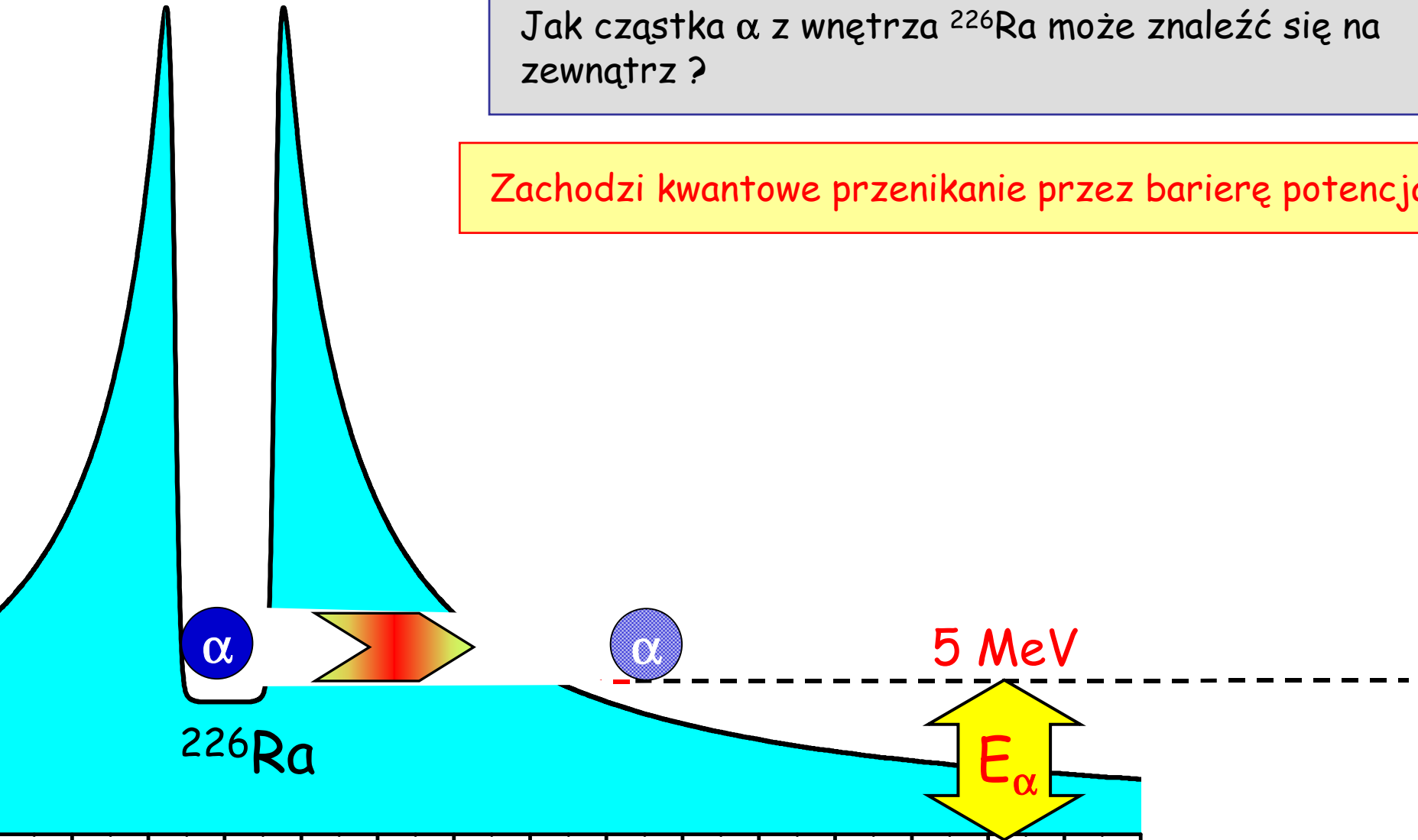


Dlaczego półokresy rozpadu tak bardzo się różnią?

# Zagadka przemiany $\alpha$

Jak cząstka  $\alpha$  z wnętrza  $^{226}\text{Ra}$  może znaleźć się na zewnątrz ?

Zachodzi kwantowe przenikanie przez barierę potencjału





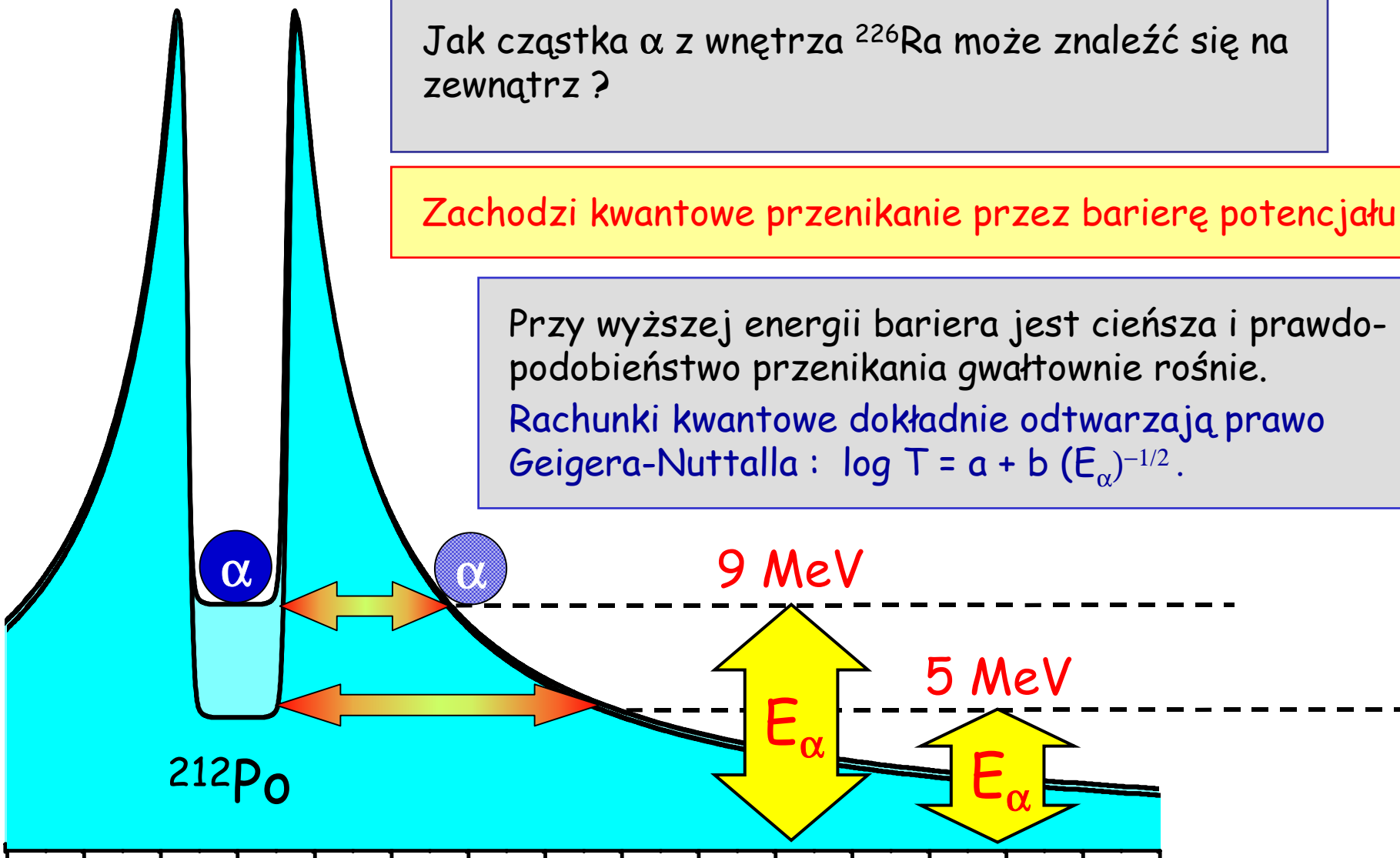
# Zagadka przemiany $\alpha$

Jak cząstka  $\alpha$  z wnętrza  $^{226}\text{Ra}$  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 :  $\log T = a + b (E_\alpha)^{-1/2}$ .



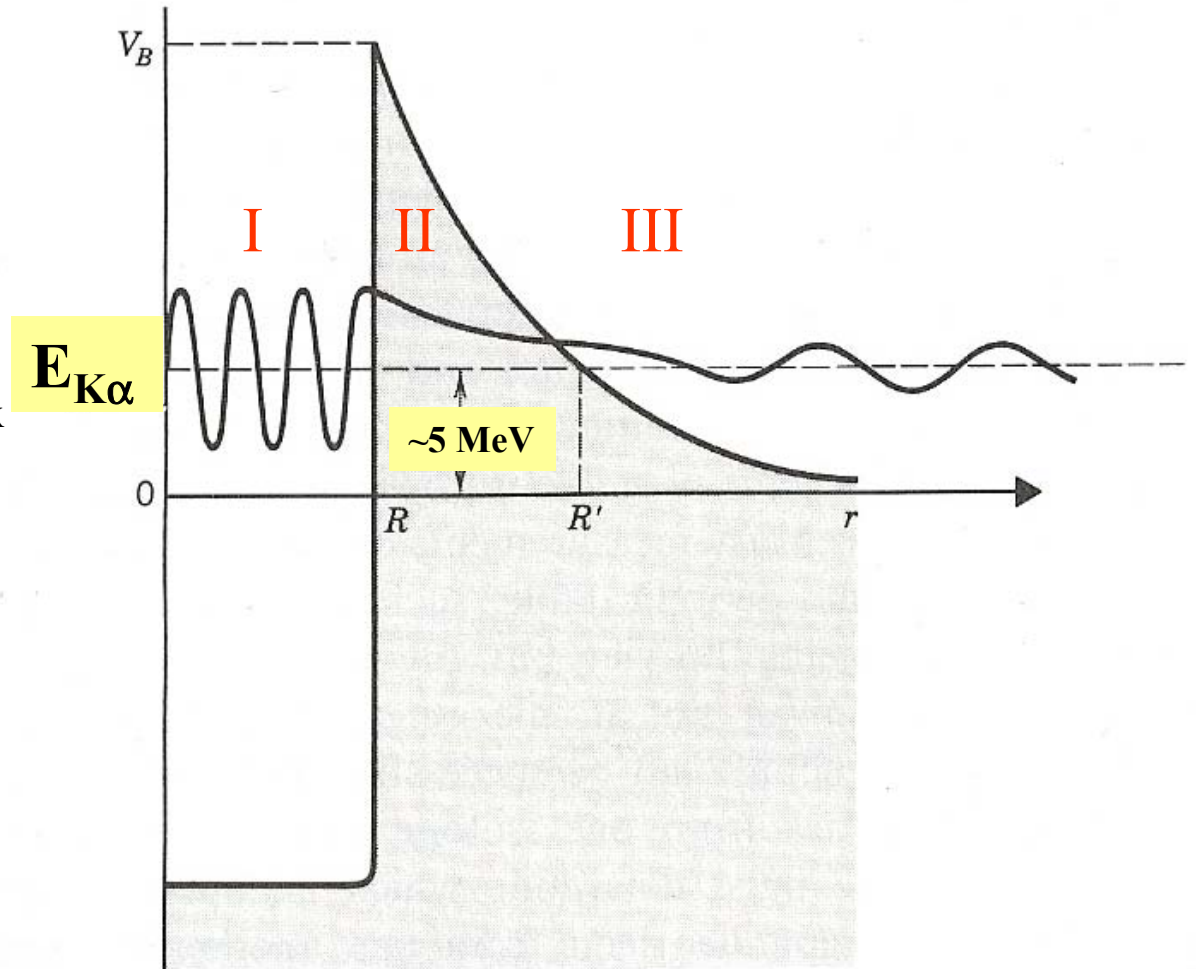
# Rozpady z emisją ciężkich cząstek naładowanych

## Rozpad $\alpha$

**I**  $\psi(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$

**II**  $\psi(x) = Fe^{-\xi x} + Ge^{\xi x}$

**III**  $\psi(x) = Ce^{ikx}$



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

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

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

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

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

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

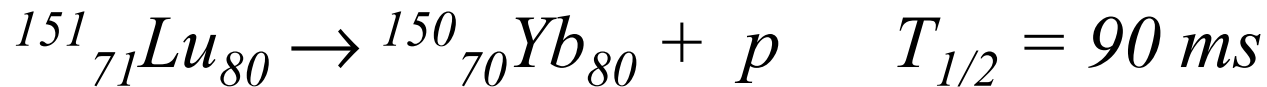
$$Q_\alpha = E_{K\alpha} + E_{K\alpha} (m_\alpha / M)$$

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

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

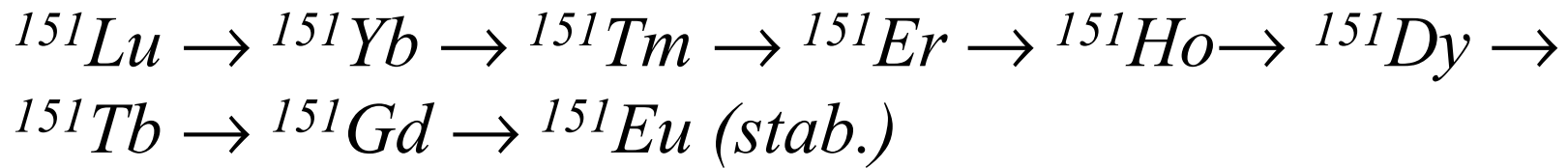
# Rozpad protonowy

Trwały izotop lutetu:  $^{175}\text{Lu}$



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

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



# Energia rozpadu protonowego

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

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

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

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

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

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

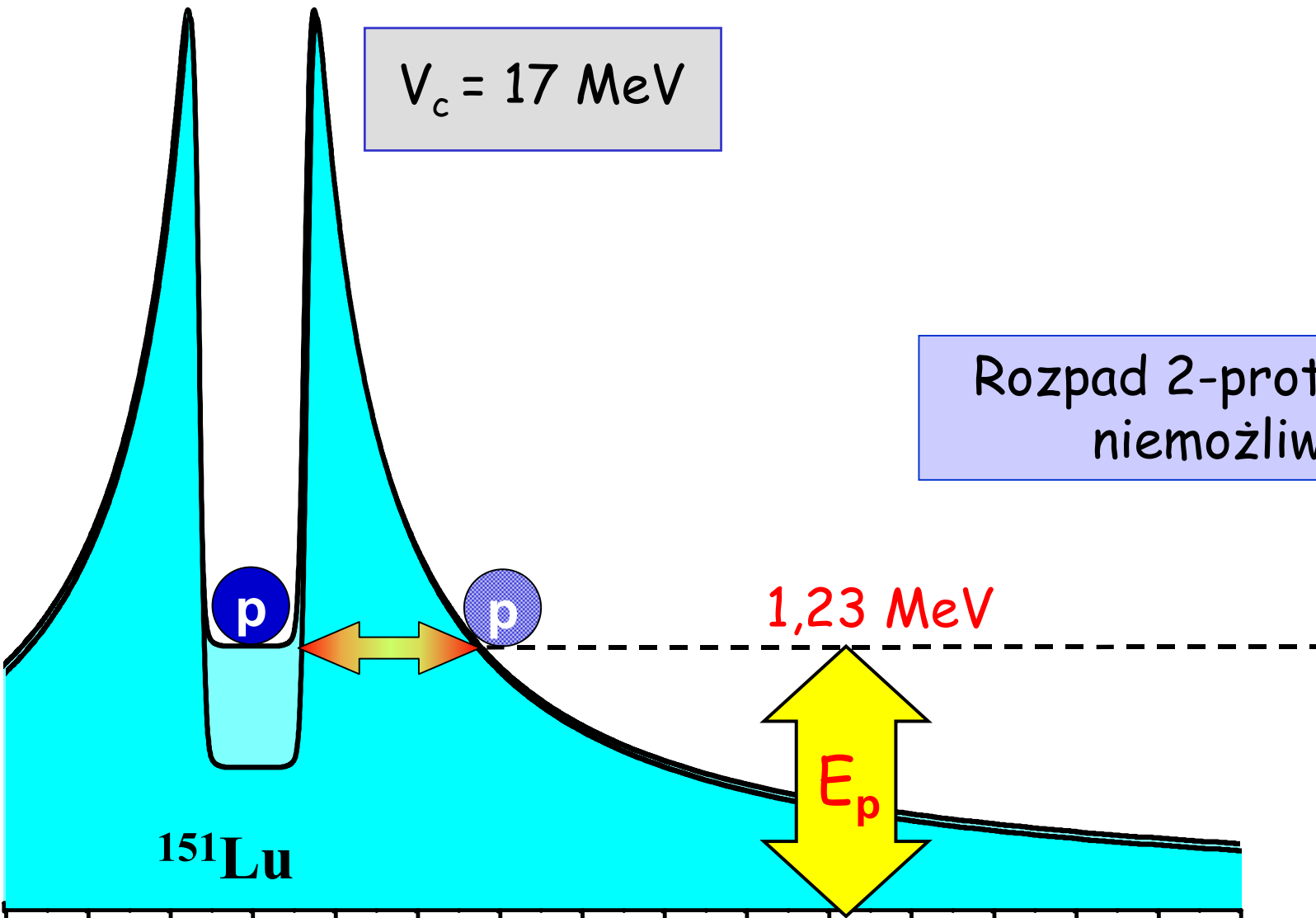
Bariera potencjału dla  $^{150}\text{Yb} + p$   
(kulombowska + odśrodkowa)

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

# Energia układu $^{150}\text{Yb} + p$

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

Rozpad 2-protonowy  
niemożliwy



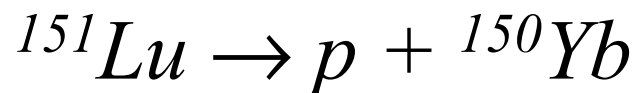
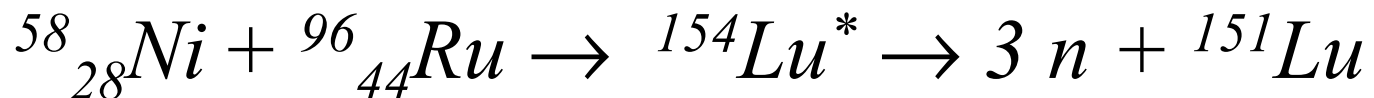
# Rozpad protonowy

## Promieniotwórczość protonowa

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

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

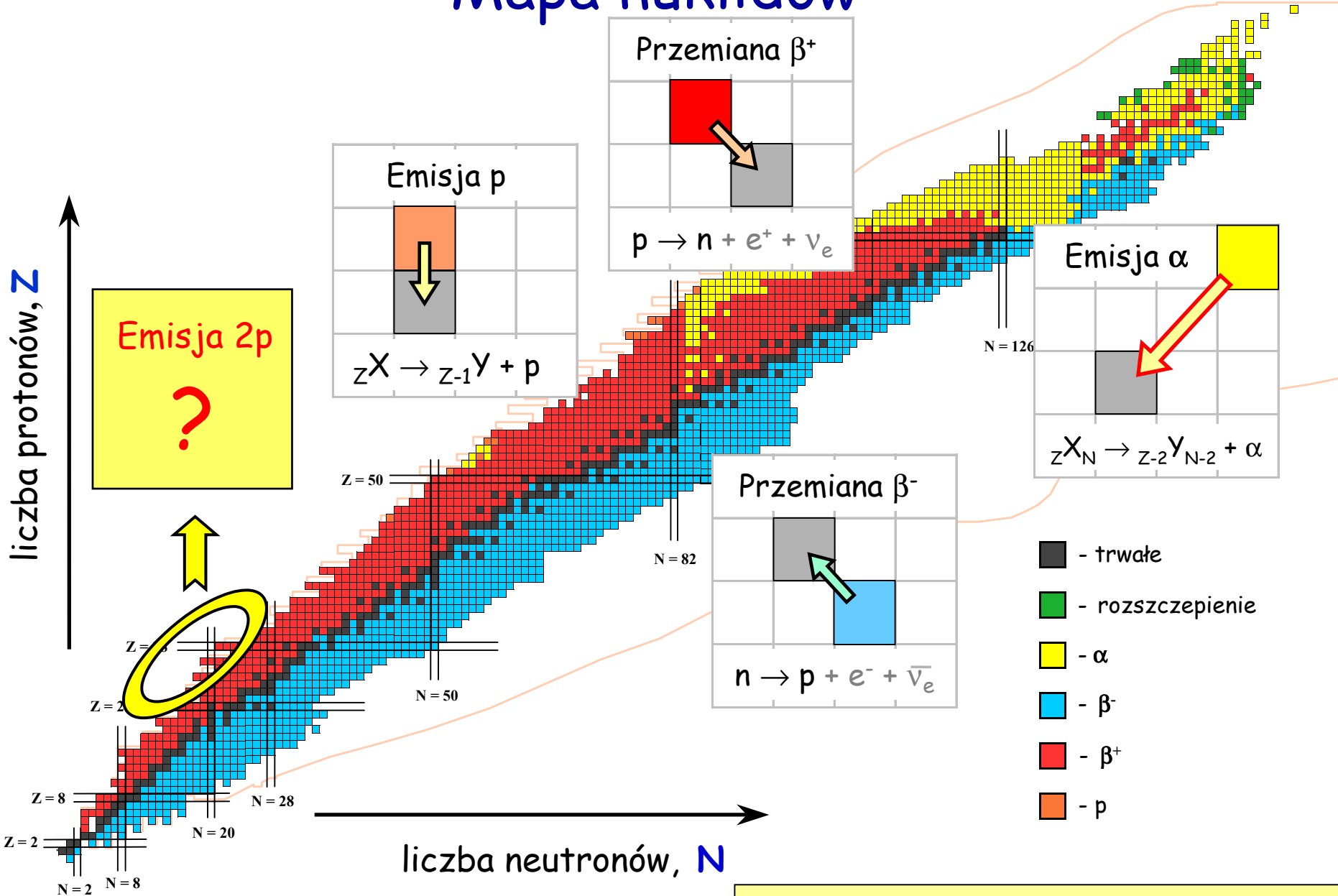
reakcja:



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

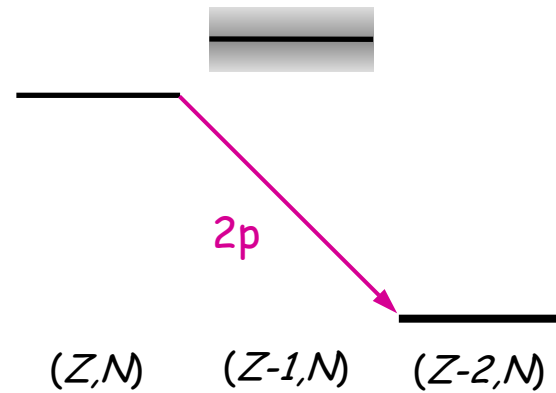
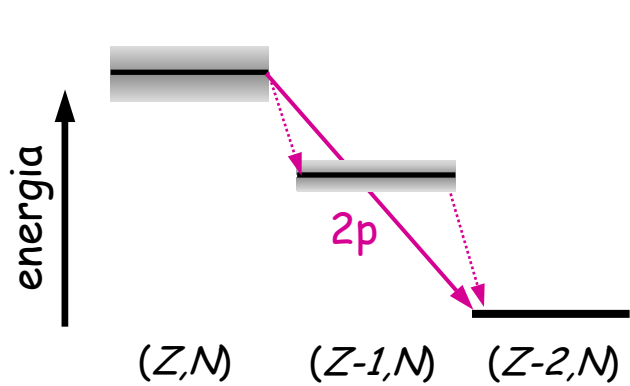
Obecnie ok. 40 przypadków  
promieniotwórczości protonowej

# Mapa nuklidów





# Emisja dwóch protonów z jądra atomowego

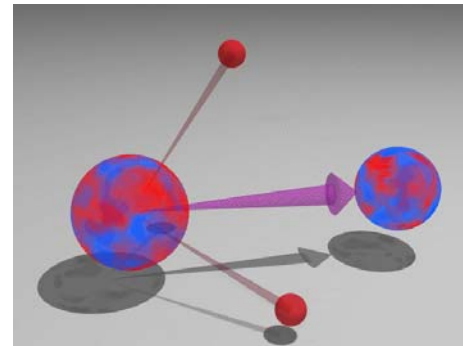
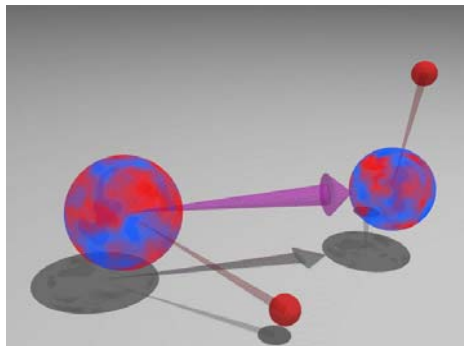


Stany jądrowe

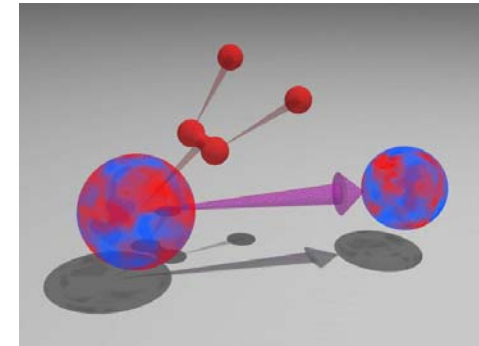
- wzbudzone :  $^{22}\text{Mg}$ ,  $^{26}\text{Si}$  (83), ...,  $^{14}\text{O}$  (96)
- podstawowe :  $^6\text{Be}$  (89),  $^{12}\text{O}$  (94)

Poszukiwany !

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



?

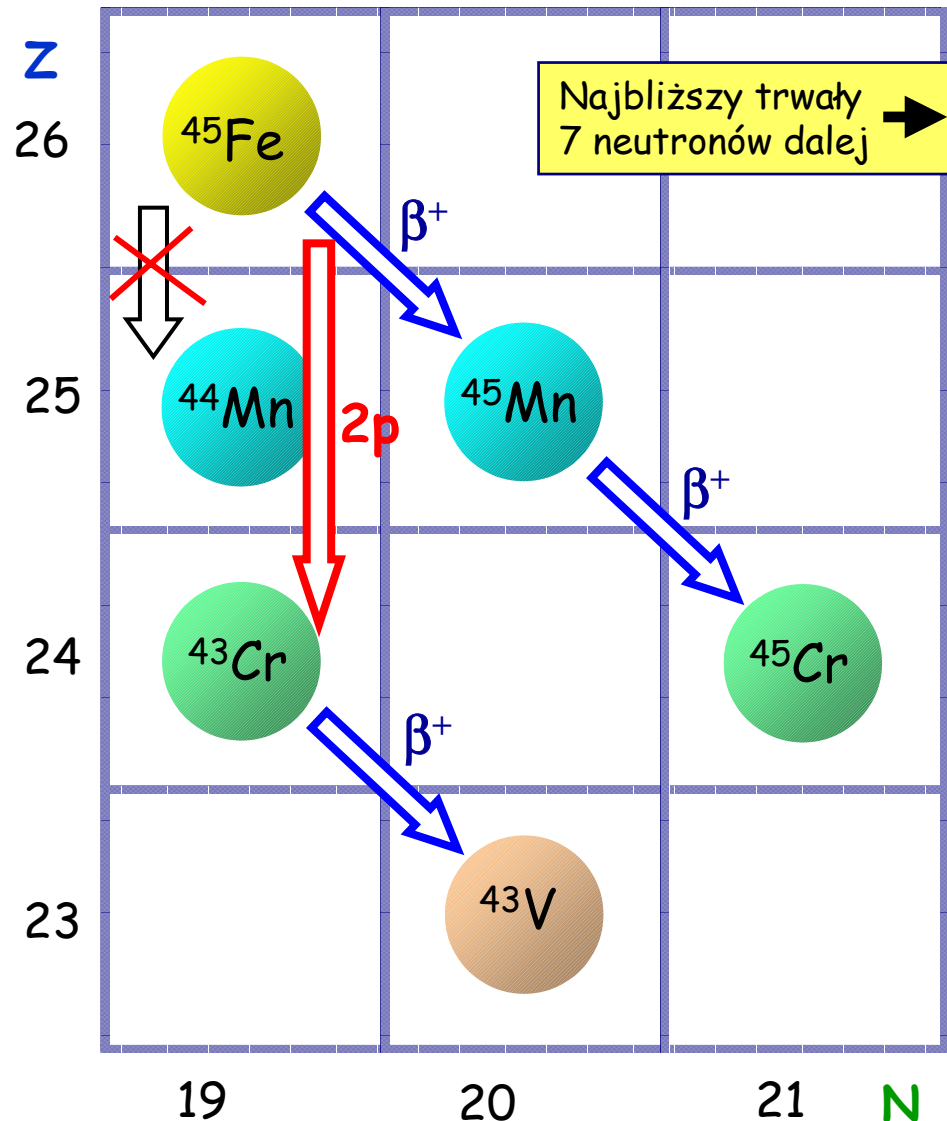


# Jak rozpada się $^{45}\text{Fe}$ ?

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

## Wyzwanie dla eksperymentu

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



# 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

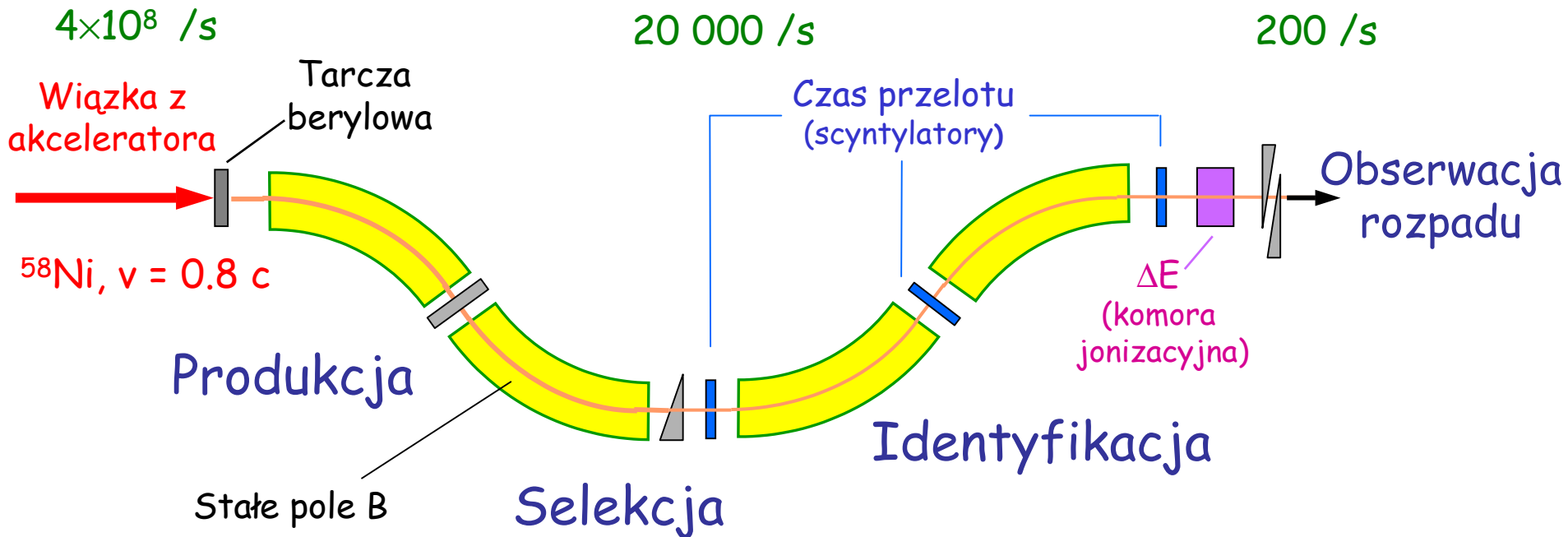
reakcja:



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

# Eksperyment w GSI Darmstadt

## Separator fragmentów FRS

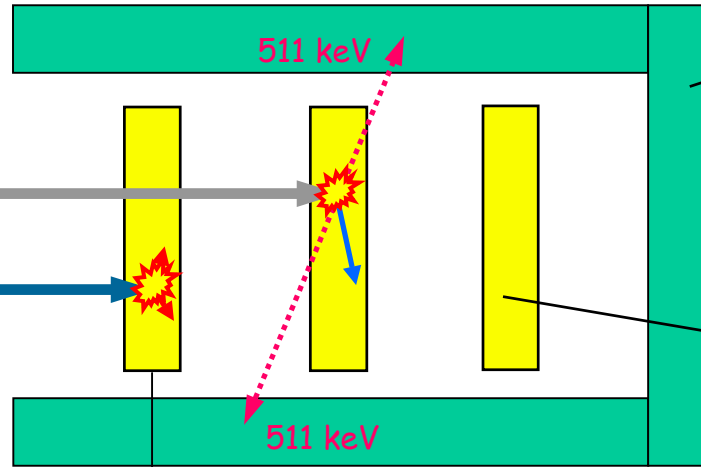


Pomiar czasu przelotu i strat energii pozwala zidentyfikować w locie każdy jon!

# Detekcja rozpadu $^{45}\text{Fe}$

Przemiana  $\beta^+$   
cząstka + 2 fotony

Emisja  $2p$



Detektor  
promieniowania  $\gamma$   
(NaI)

Detektory  
krzemowe

Układ identyfikacji jonów

Selektywne  
wyzwalanie

Cyfrowa analiza sygnałów  
zapis pełnej historii  
zdarzeń przez 10 ms

Komputer  
sterujący

taśma mag.

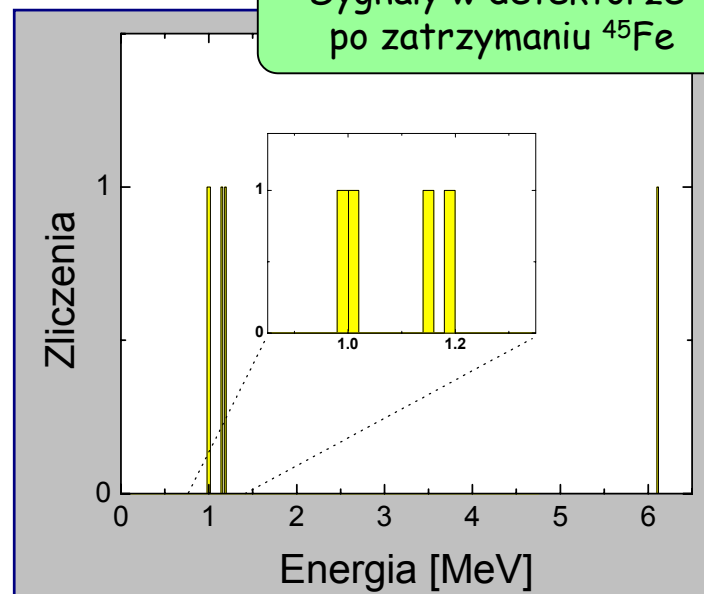
patrz plakat Jana Kurcewicza

# Wyniki pomiarów

## Eksperyment w GSI - VII 2001

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

zgodne tylko z hipotezą emisji 2p !

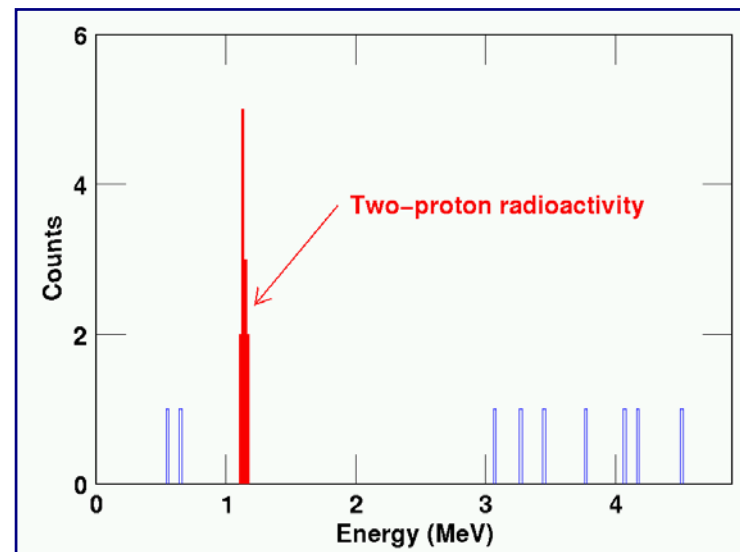


## Eksperyment w GANIL (Caen) - V 2000

- obserwacja 22 atomów  $^{45}\text{Fe}$ 
  - 12 przypadków w pikie  $E \approx 1.1$  MeV (brak  $\beta$  i  $\gamma$ )
  - 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)



# 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 !)

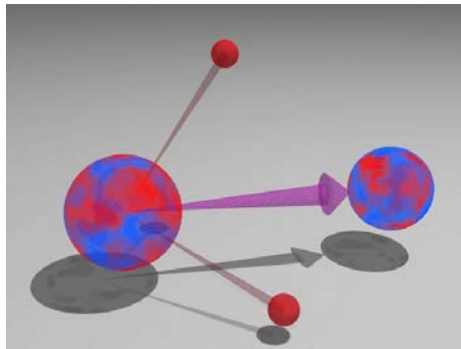
Robert Grzywacz

Zenon Janas

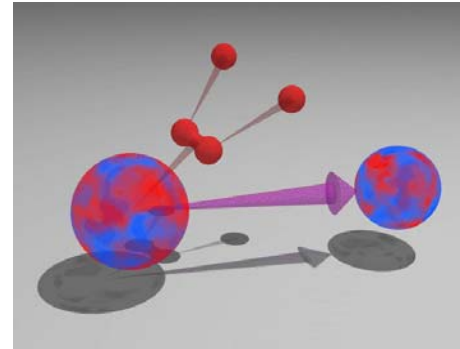
Jan Kurcewicz

# Co dalej ?

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



?





# Rozpad egzotyczny

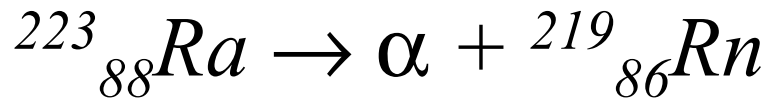
Samorzutna emisja z jądra cząstki cięższej od cząstki  $\alpha$ :  $^{14}\text{C}$ ,  $^{20}\text{O}$ ,  $^{23}\text{F}$ ,  $^{24}\text{Ne}$ ,  $^{25}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{30}\text{Mg}$ ,  $^{32}\text{Si}$  i  $^{34}\text{Si}$ .

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

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

# Rozpad egzotyczny z emisją $^{14}\text{C}$

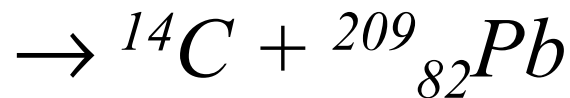
Eksperyment, 1984 rok



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

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

$10^{-7} \%$



$$Q(^{14}\text{C}) = 29,85 \text{ MeV}$$

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

# Krótką historia promieniotwórczości (II)

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

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

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

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

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

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