

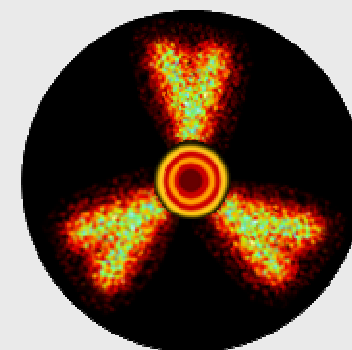
Promieniotwórczość – 100 lat po Nagrodzie Nobla dla Marii Skłodowskiej-Curie



Marek Pfützner

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki UW

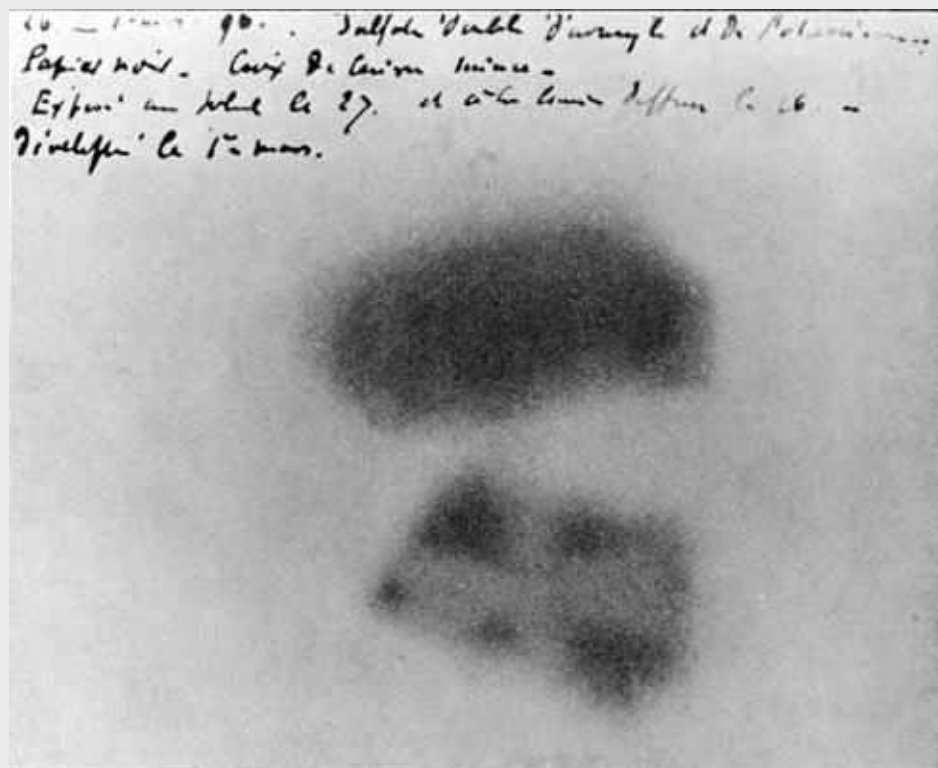


Letnia Szkoła Fizyki

na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, 27 czerwca 2011

Przypadkowy początek

- W 1896 roku w Paryżu Antoine Henri Becquerel przypadkiem odkrył świat zupełnie nowych zjawisk fizycznych, gdy wywołał płytkę fotograficzną, na której leżał kawałek soli uranowej.



1903 – Nagroda Nobla z fizyki

 The Nobel Prize in Physics 1903
Henri Becquerel, Pierre Curie, Marie Curie

▼ The Nobel Prize in Physics 1903 ▼

▼ Henri Becquerel ▼

▼ Pierre Curie ▼

▼ Marie Curie ▼



Antoine Henri Becquerel Pierre Curie Marie Curie, née Skłodowska

The Nobel Prize in Physics 1903 was divided, one half awarded to Antoine Henri Becquerel "in recognition of the extraordinary services he has rendered by his discovery of spontaneous radioactivity", the other half jointly to Pierre Curie and Marie Curie, née Skłodowska "in recognition of the extraordinary services they have rendered by their joint researches on the radiation phenomena discovered by Professor Henri Becquerel".



Nagroda Nobla z fizyki, 1903:

„w uznaniu ich nadzwyczajnych osiągnięć uzyskanych dzięki wspólnym badaniom nad zjawiskiem promieniotwórczości odkrytym przez Profesora Henri Becquerela”

2011 – Rok Marii Skłodowskiej-Curie

2011 – Międzynarodowy Rok Chemii



Nagroda Nobla z chemii, 1911:

„w uznaniu jej zasług dla rozwoju chemii przez odkrycie pierwiastków radu i polonu, wydzielenie radu i badania właściwości i związków tego wyjątkowego pierwiastka”

http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1911/

Instytut Radowy w Paryżu

11 rue Pierre-et-Marie-Curie

22 avril

Or + Cœur = 14,448,05 $Ra = 0,10925$
 id + $Ra d^2$ = 14,357,3

Cœur + Side = 10,314,65 $Ag d^2 = 0,10649$
 Or + $Ag d^2$ = 10,428,12

$\frac{7.39270}{7.02723}$	$\frac{0.10925}{0.02830}$	0.649
$\frac{2.41993}{2.41993}$	$\frac{Ra}{0.08295}$	0.2723

$\frac{2.91882}{2.41993}$	$\frac{0.5003}{49889}$
$\frac{0.49889}{0.49889}$	$\frac{4892}{4892}$

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

$Ra = 110.5$

Requis: vérifier avec les données de l'Or, l'Argent, le Cœur, le Side

Cœur + Argent = 10.3942
 10.31465
 29 = 0.07955
~~10.2350~~
 $RaCl = 0.10564$

Différence avec les données précédentes
 0.00083 m

Il s'agit en un peu de Ag non adhérent au cœur?



Ernest Rutherford



E. Rutherford (1871-1937)

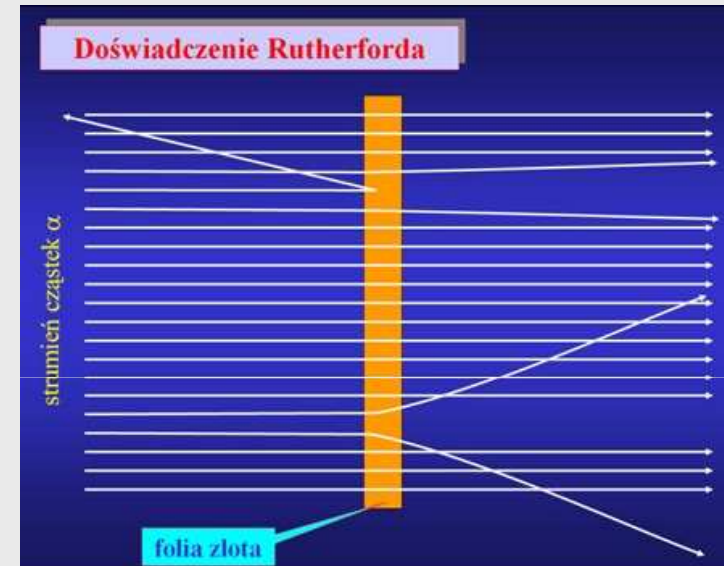
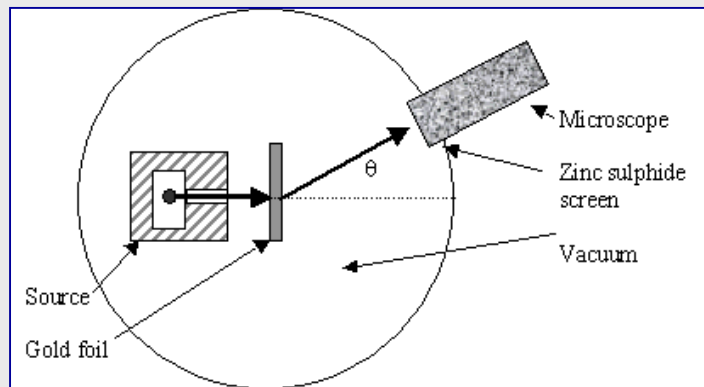
- Wydzielił dwie składowe promieniowania:
 - α – mało przenikliwe, o dodatnim ładunku słabo zginane w polu magnetycznym
 - β – bardziej przenikliwe, o ujemnym ładunku silnie zginane przez pole magnetyczne
- Sformułował wykładnicze prawo spontanicznych przemian promieniotwórczych

Nagroda Nobla z chemii, 1908:

„za badania rozpadów pierwiastków i własności chemicznych substancji promieniotwórczych ”

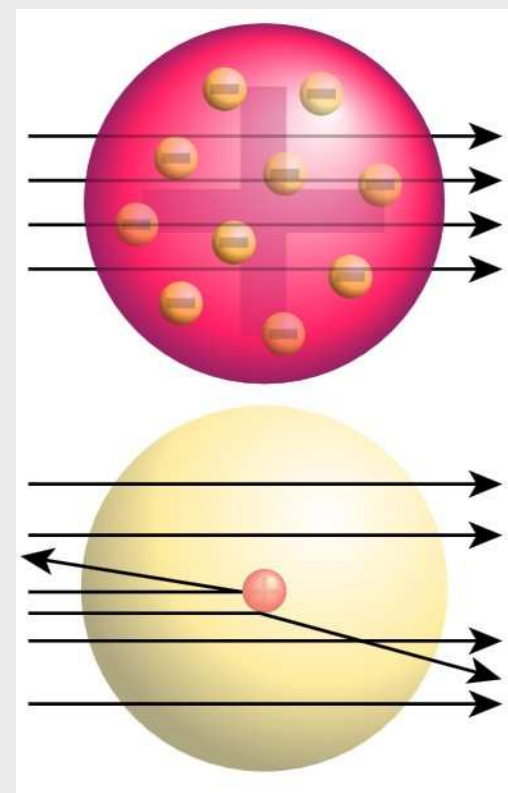
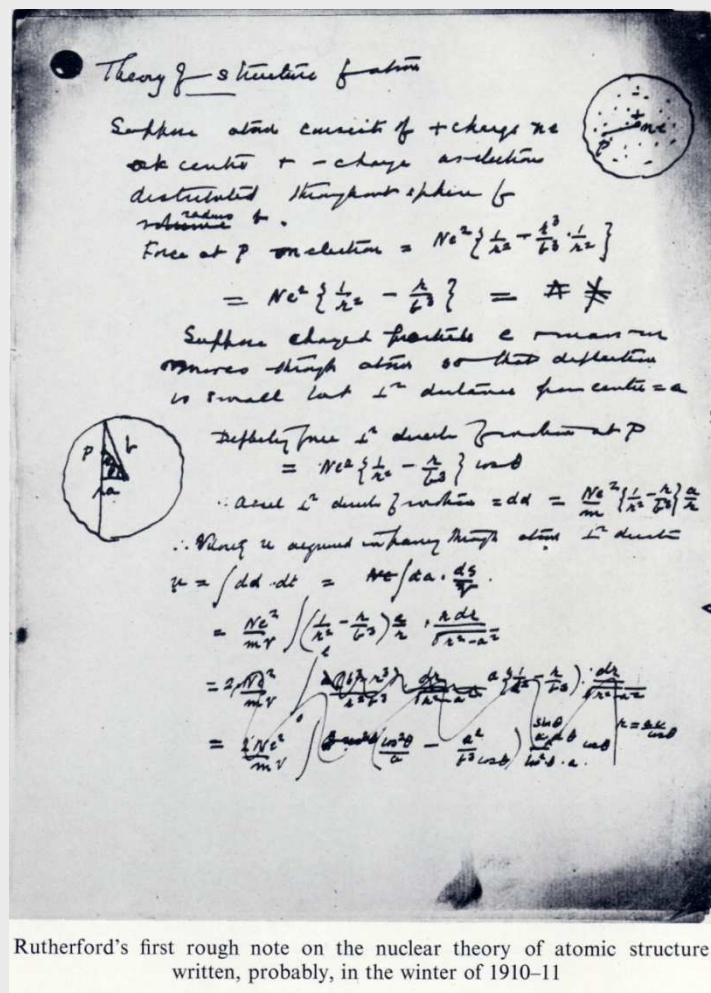
Rozpraszanie cząstek α

- Współpracownicy Rutherforda, H. Geiger i E. Marsden badali rozpraszanie cząstek α na cienkiej folii złota. W większości przypadków tory cząstek ugięły się pod małymi kątami. Okazało się jednak, że czasem cząstka α rozprasza się do tyłu!



Rutherford: "To było chyba najbardziej niewiarygodne zdarzenie w moim życiu. To tak, jakby pocisk artyleryjski wielkiego kalibru, wystrzelony w kierunku cienkiej kartki papieru, odbił się od niej i powrócił do strzelającego".

Odkrycie jądra atomowego



- Praktycznie cała masa atomu skupiona jest w bardzo małym centralnym punkcie nazwanym **jądrem atomowym**

Komora mgłowa Wilsona

- W przesycone parze kropelki kondensują na jonach utworzonych przez przelatującą cząstkę naładowaną

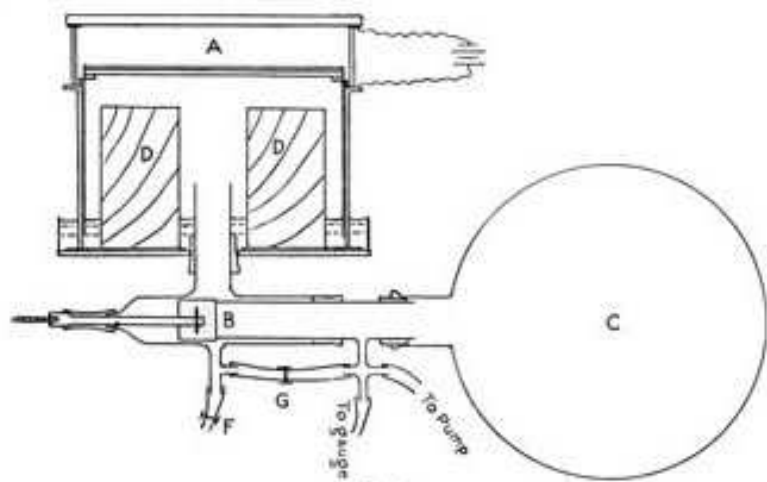


FIG. 1.

A diagram of Wilson's apparatus. The cylindrical cloud chamber ('A') is 16.5cm across by 3.4cm deep.

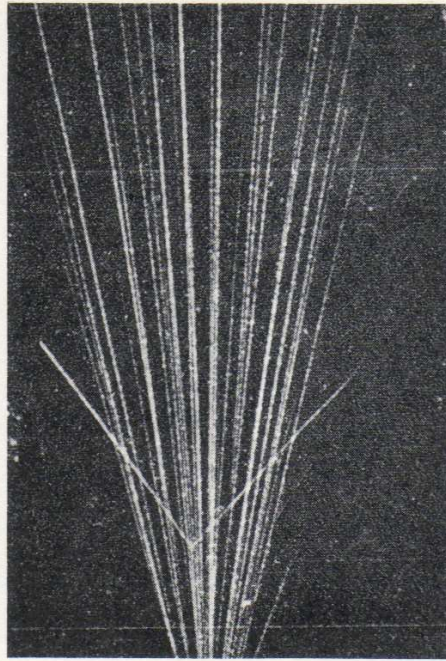
1911 Pierwsze zdjęcia śladów cząstek α



Nagroda Nobla z fizyki, 1927:

„za opracowanie metody, która pozwala uwidoczniać tory cząstek naładowanych elektrycznie poprzez kondensację pary”

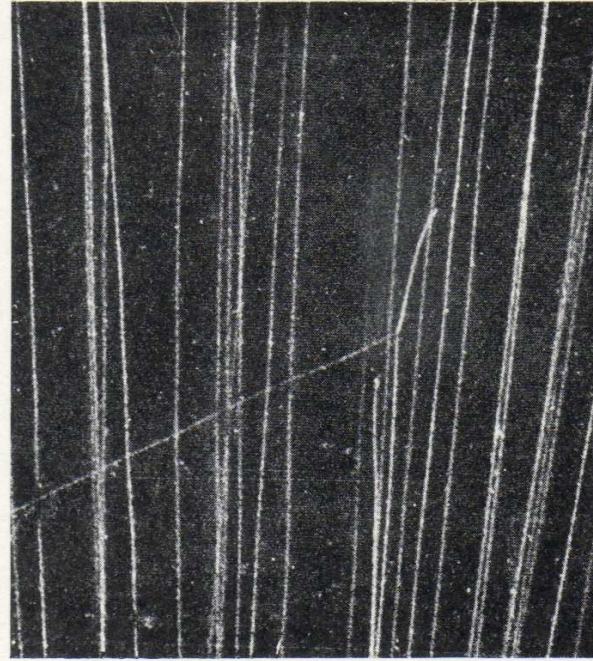
Ślady cząstek α w helu



Alpha particle strikes helium nucleus and they part at right angles (Blackett)

1923

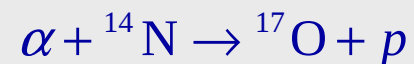
Rozpraszanie cząstki α
na atomie helu



Alpha particle enters nitrogen which ejects proton and becomes oxygen (Blackett)

1925

Pierwsza reakcja jądrowa



Budowa atomu

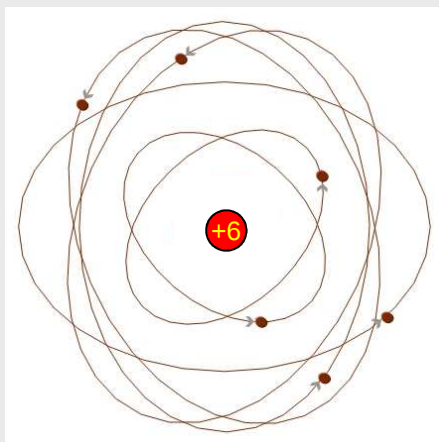
Składniki :

Jądro atomowe

- proton ($q = +1$)
- neutron ($q = 0$)

Powłoka elektronowa

- elektron ($q = -1$)



węgiel

Przykłady jąder atomowych :

● - wodór (1 proton)

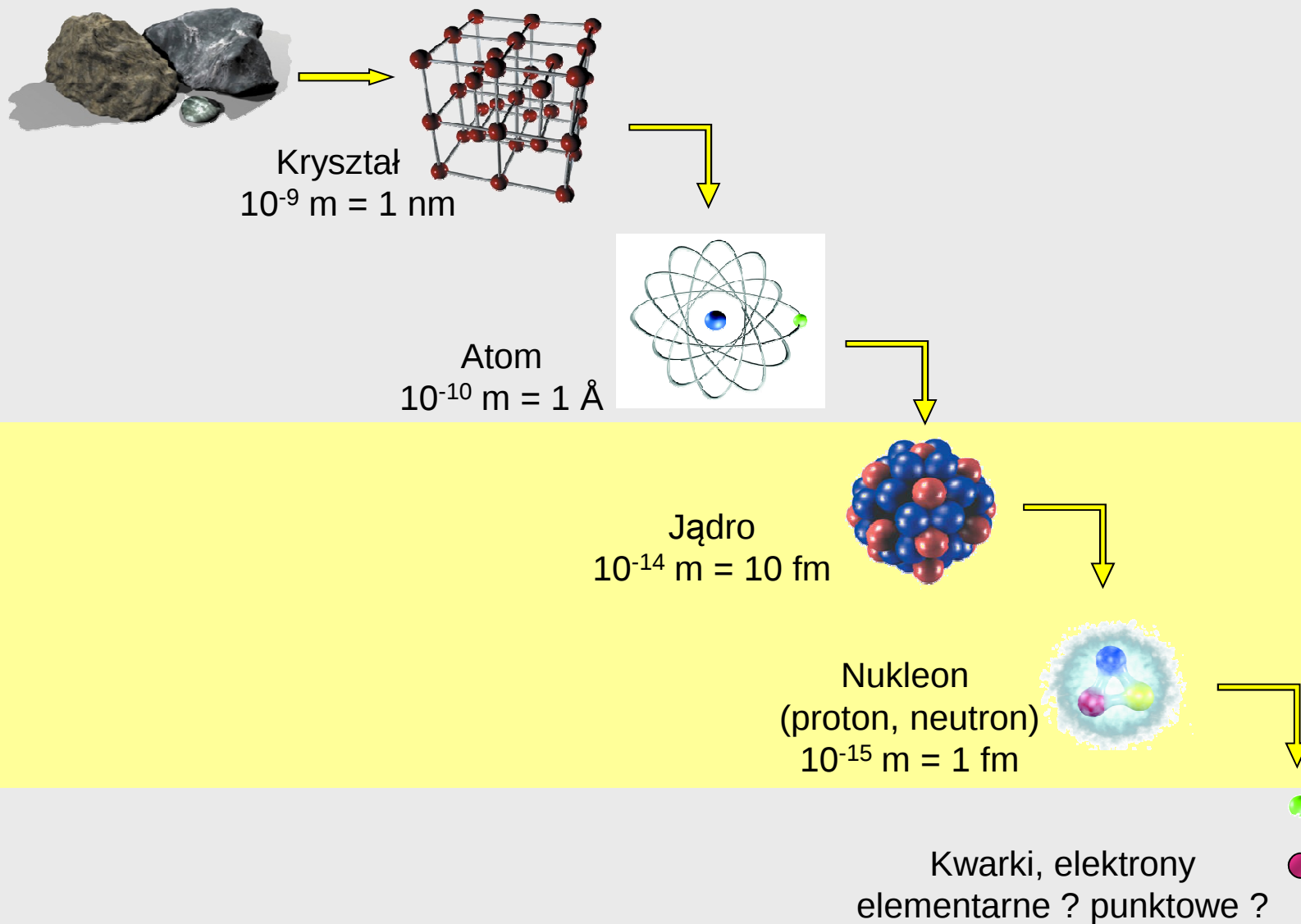
●● - hel (2 protony + 2 neutrony) = cząstka α

●●●●●● - węgiel (6 protonów + 6 neutronów) : ^{12}C

●●●●●●● - węgiel (6 protonów + 7 neutronów) : ^{13}C

izotopy

Hierarchiczna budowa materii



Nuklidy

Nuklid (elektrycznie obojętny atom) :

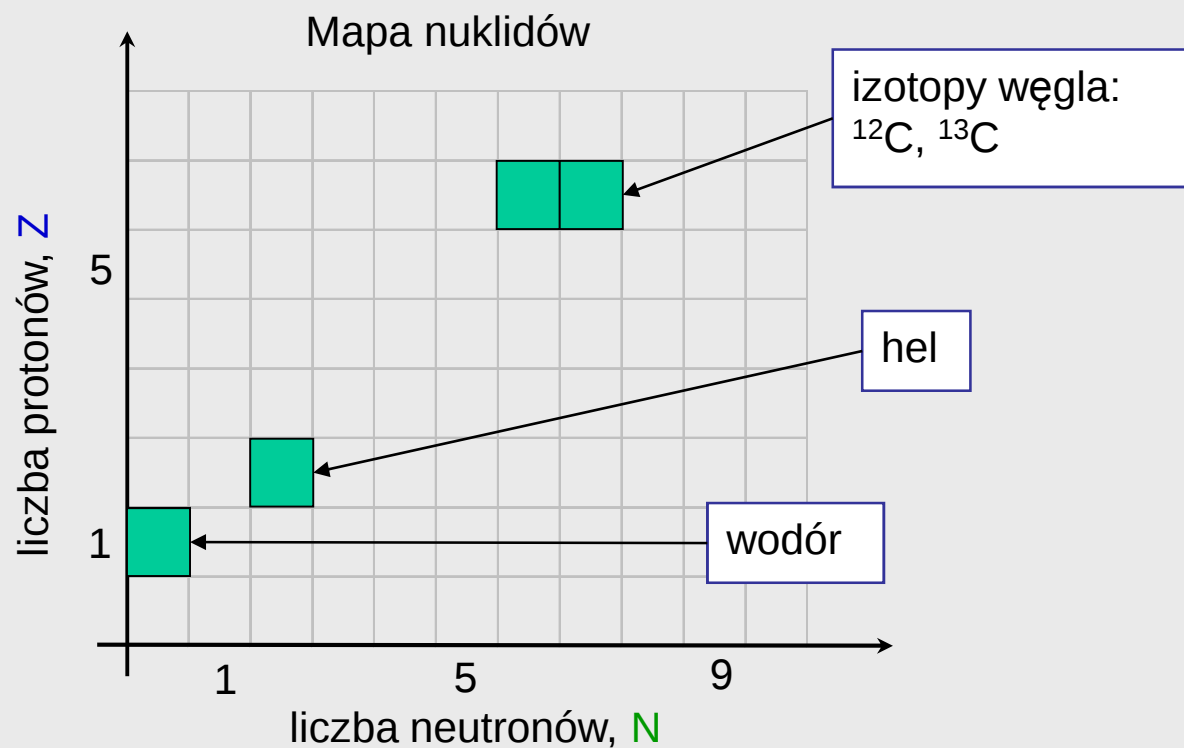
Z protonów + N neutronów + Z elektronów

Liczba Z decyduje o właściwościach chemicznych

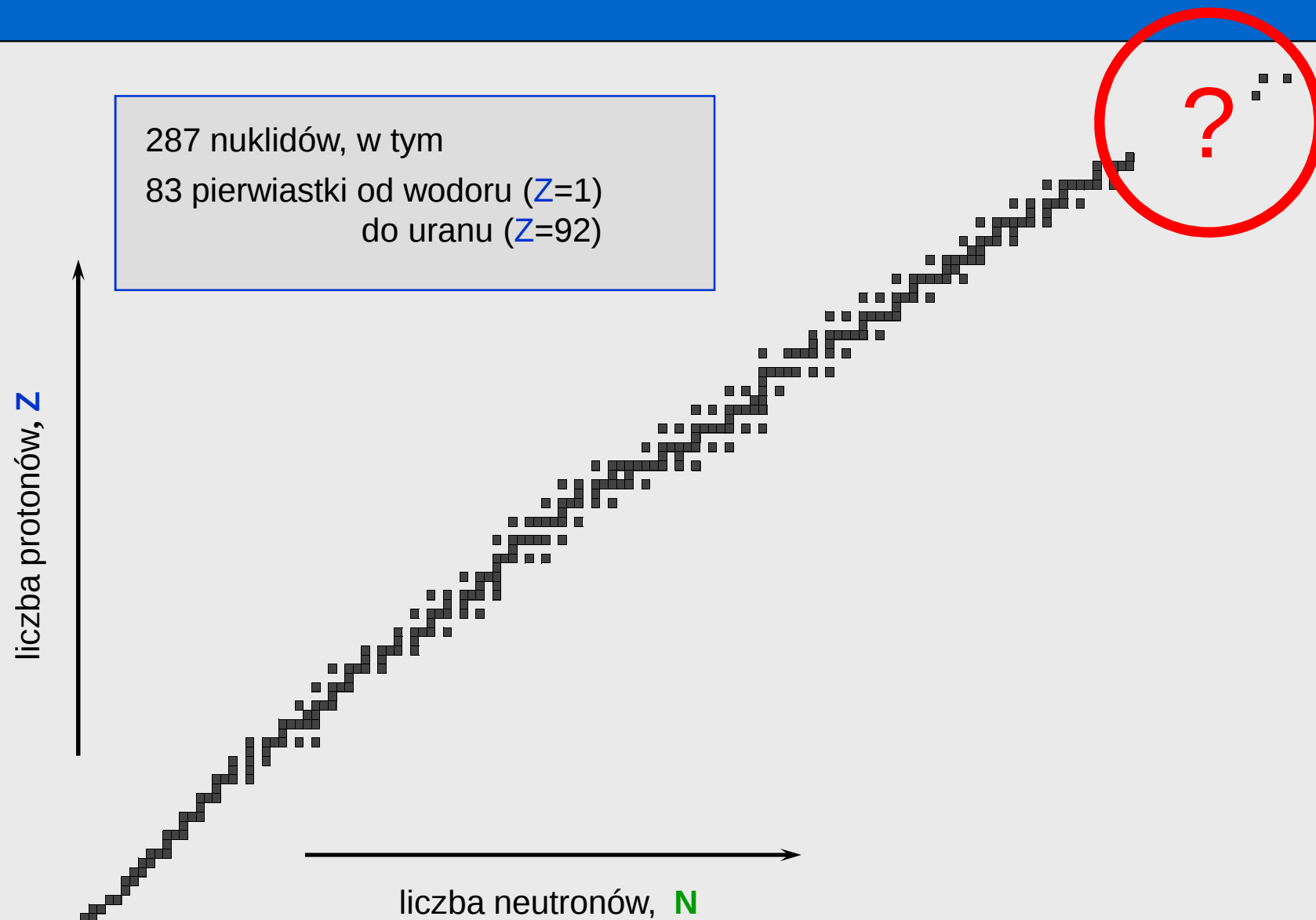
➔ pierwiastki chemiczne

Różne liczby N ➔ izotopy

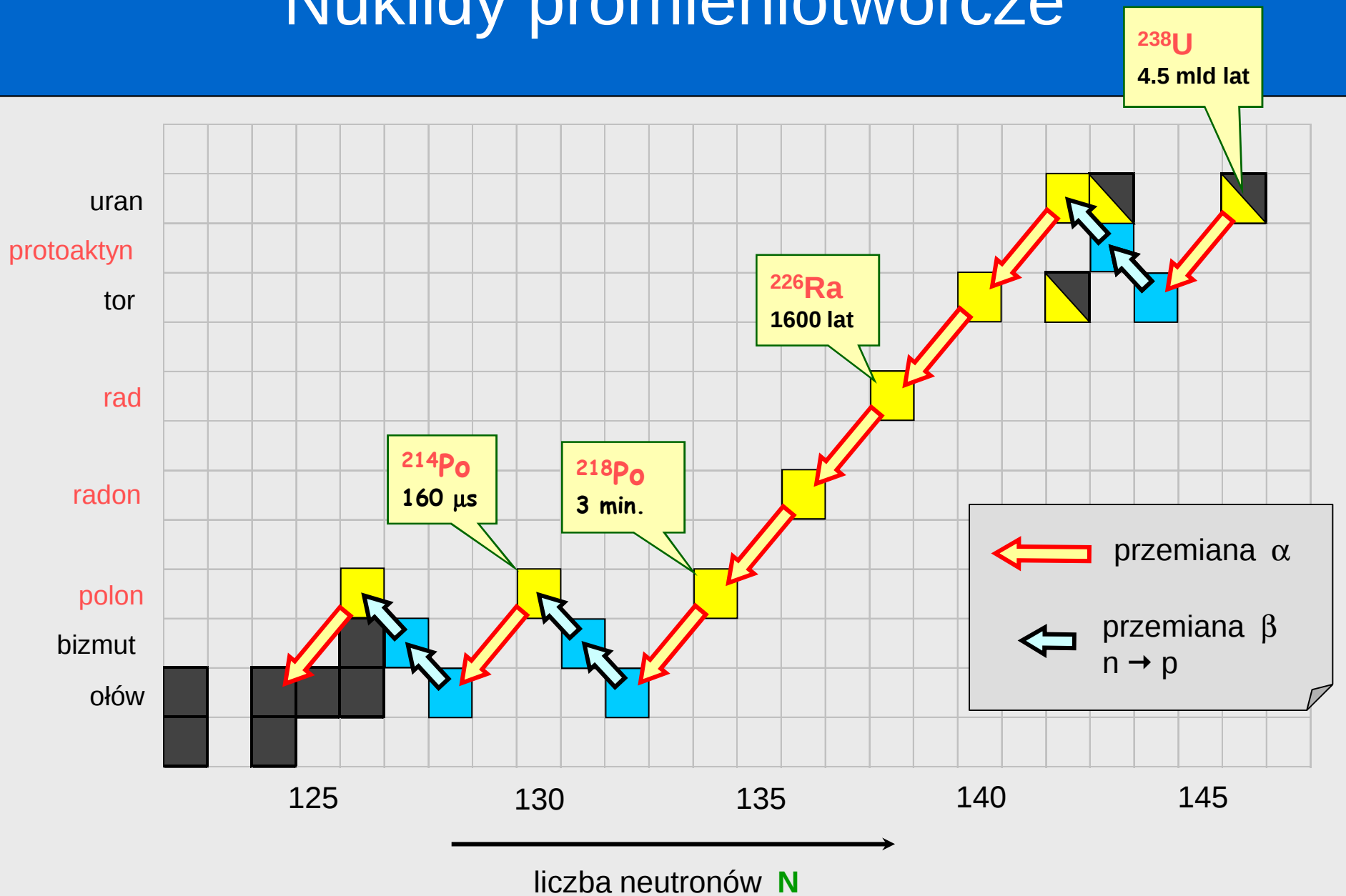
Symbol nuklidu



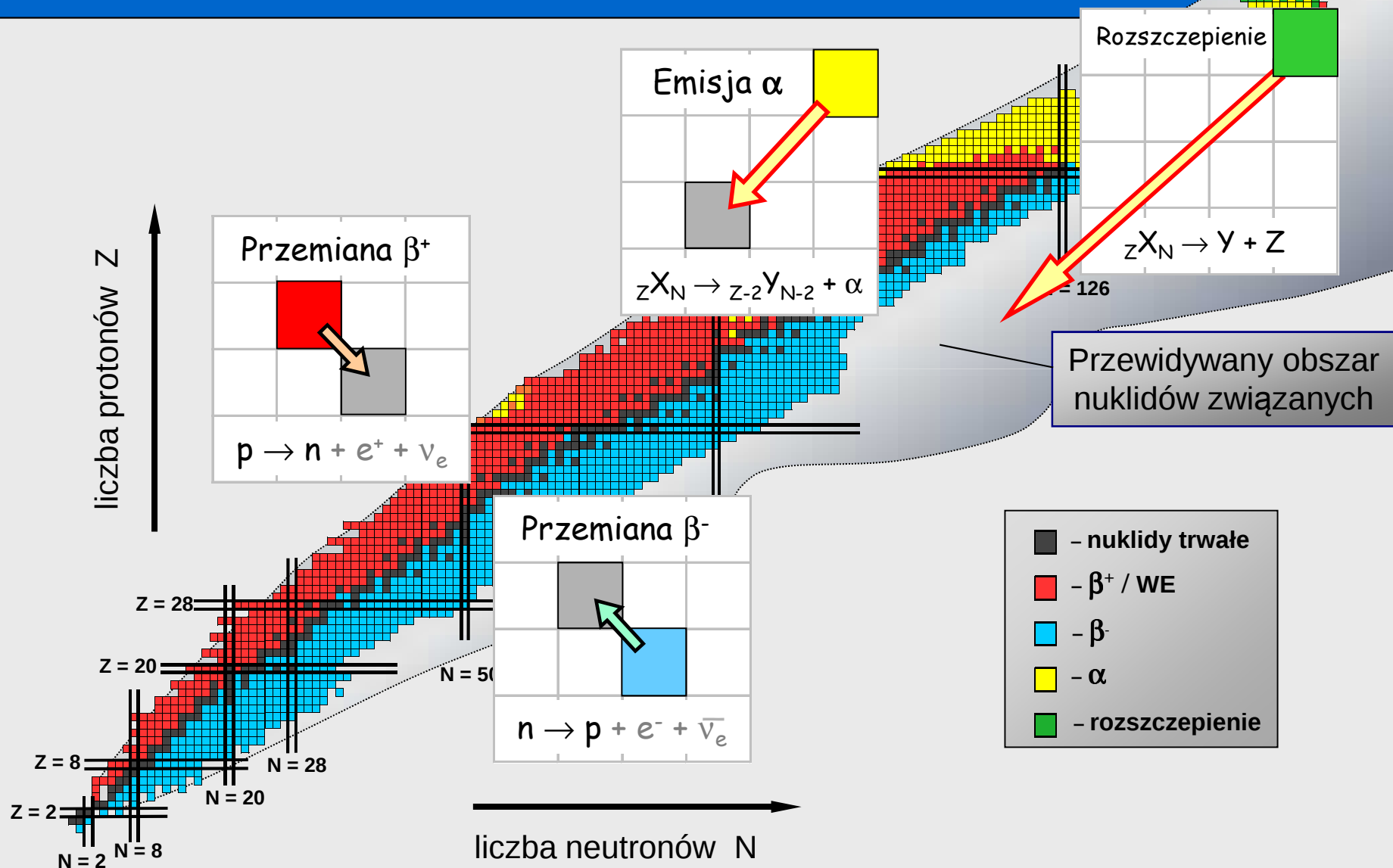
Nuklidy trwałe



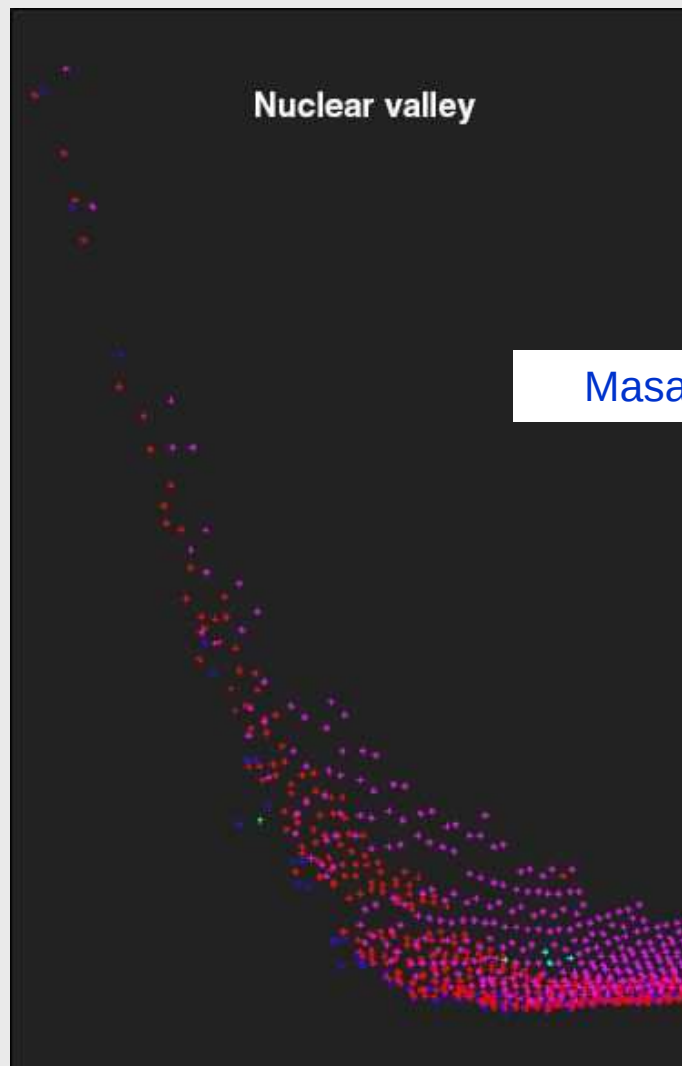
Nuklidy promieniotwórcze



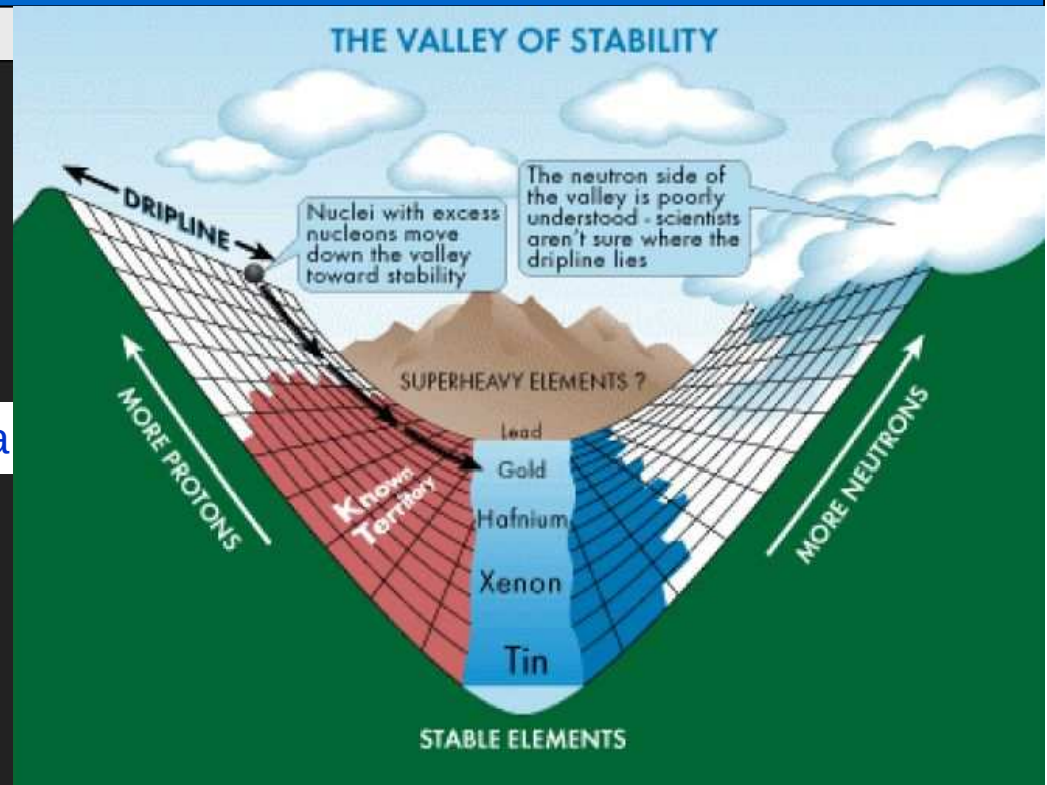
Wszystkie nuklidy



Jądrowa „dolina”

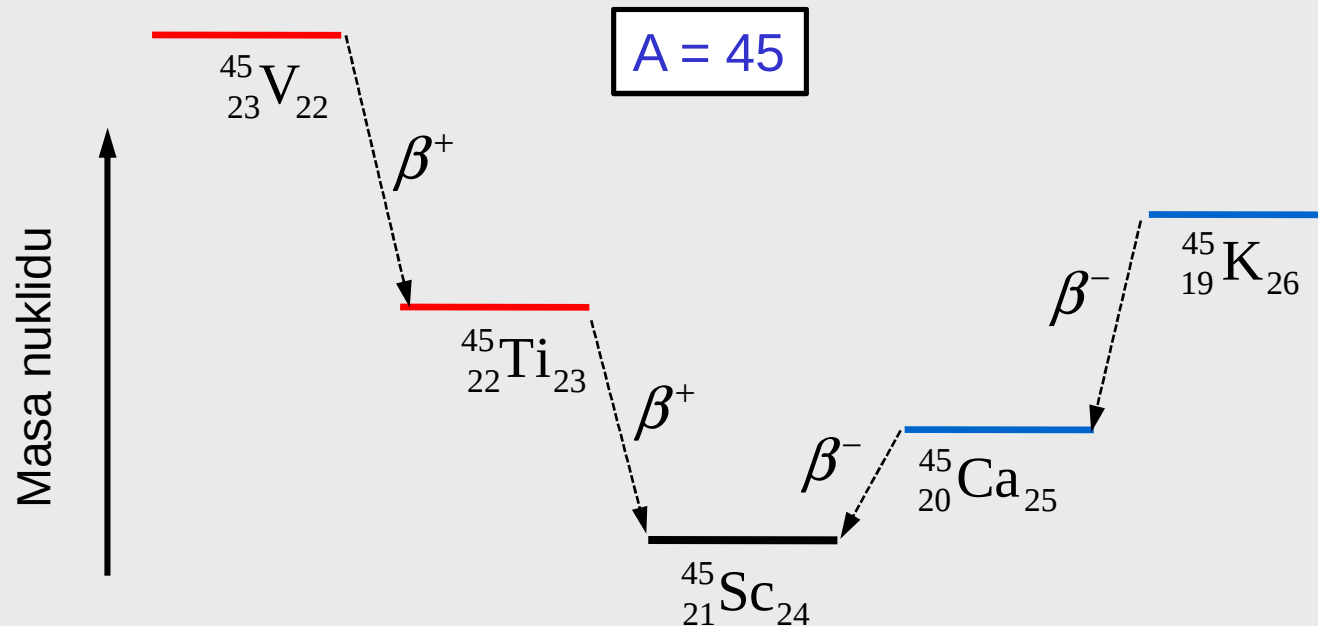


Masa



Przemiany β jąder

Zbiór nuklidów o tej samej liczbie nukleonów (izobary)



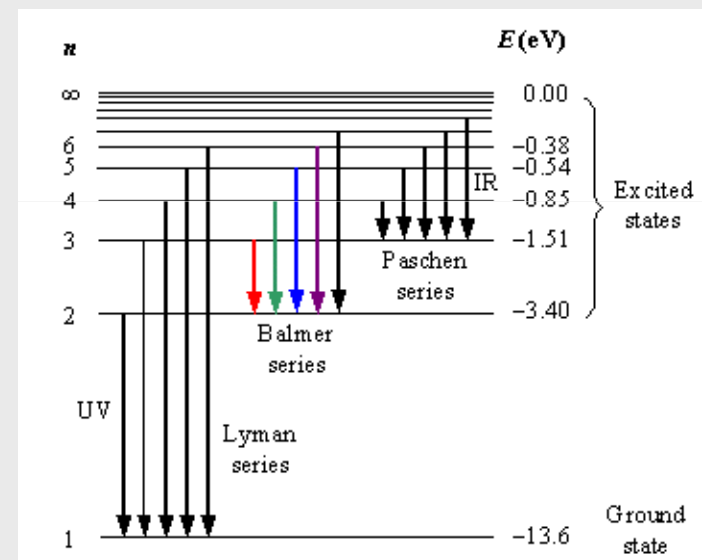
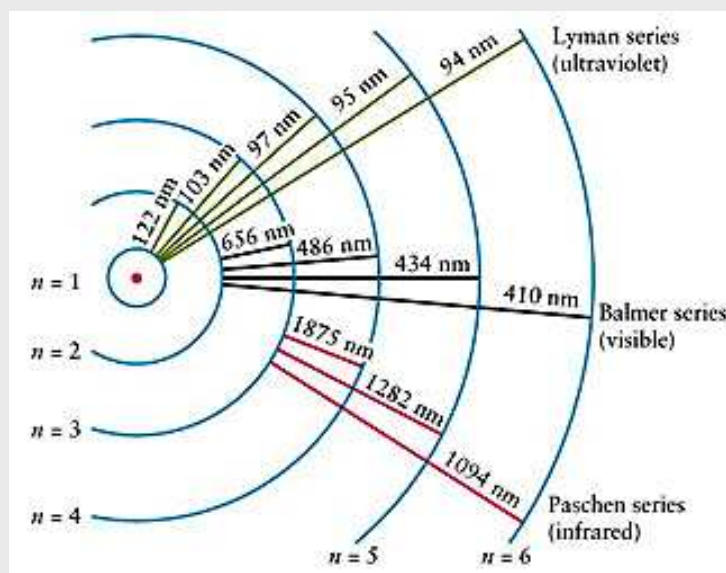
$\text{Masa}({}^{45}\text{V}) > \text{Masa}({}^{45}\text{Ti}) \rightarrow$ W przemianie ${}^{45}\text{V} \rightarrow {}^{45}\text{Ti}$

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

Teoria względności w działaniu!

Stany wzbudzone – atom

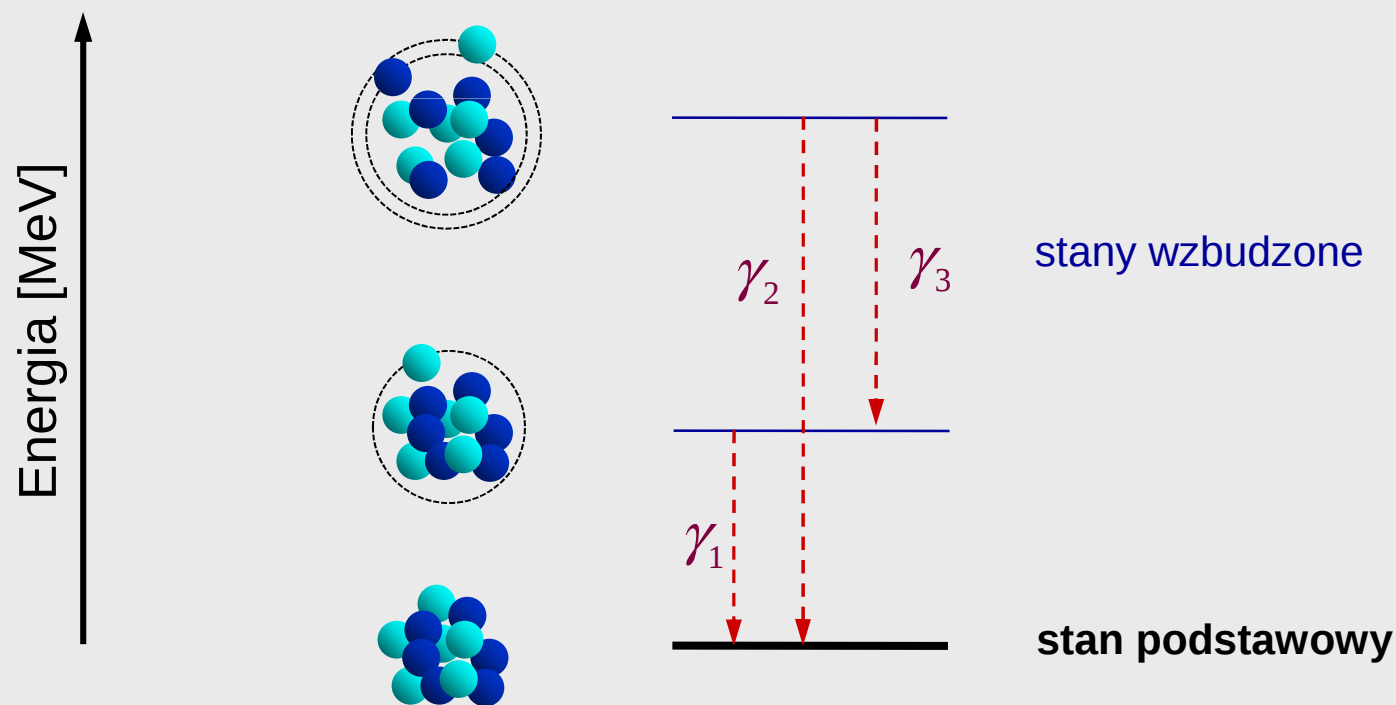
Atom: elektrony mogą znajdować się w stanach (orbitach) o różnych energiach. Przejścia między stanami związane są z emisją (lub absorpcją) promieniowania elektromagnetycznego (fotonów).



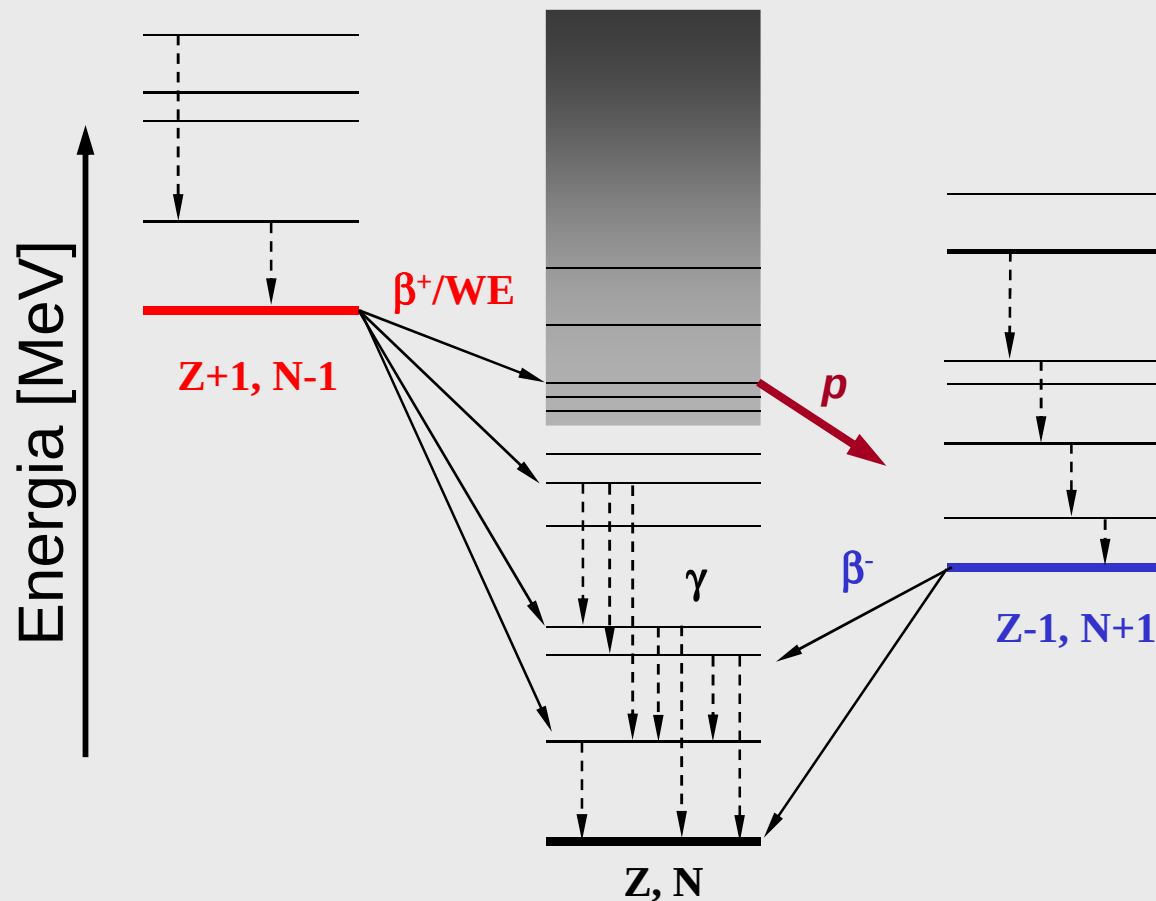
- W zależności od różnicy energii między stanami, możemy mieć promieniowanie X, UV, widzialne lub podczerwone

Stany wzbudzone – jądro

Jądro: sytuacja jest analogiczna – protony i neutrony mogą poruszać się na różnych orbitalach o różnych energiach. Przejścia między tymi stanami także związane są z emisją (lub absorpcją) promieniowania elektromagnetycznego. Nosi ono nazwę **promieniowania γ** .



Spektroskopia jądrowa



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

Statystyka

Każdy atom radu spontanicznie wyrzuca cząstkę α i powstaje atom radonu.

Półokres rozpadu (czas połowicznego zaniku) $R_a = 1600$ lat.

1 atom Ra :

czekamy 1600 lat → szansa na rozpad $\alpha = \frac{1}{2}$

czekamy 1 sek. ➡ szansa $\approx 1/100.000.000.000 = 1/10^{11}$

szansa trafienia szóstki w TotoLotku $\approx 1/10^7$

Ok. 1 cząstka α /sek.

na kartce jest ok. 10^{11} atomów Ra

- dla fizyków to dużo,

- ale dla chemików bardzo mało :

$$1/(3 \times 10^{10}) \text{ g} = 1/30.000.000.000 \text{ g}.$$

Zagadka okresów półrozpadu α

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

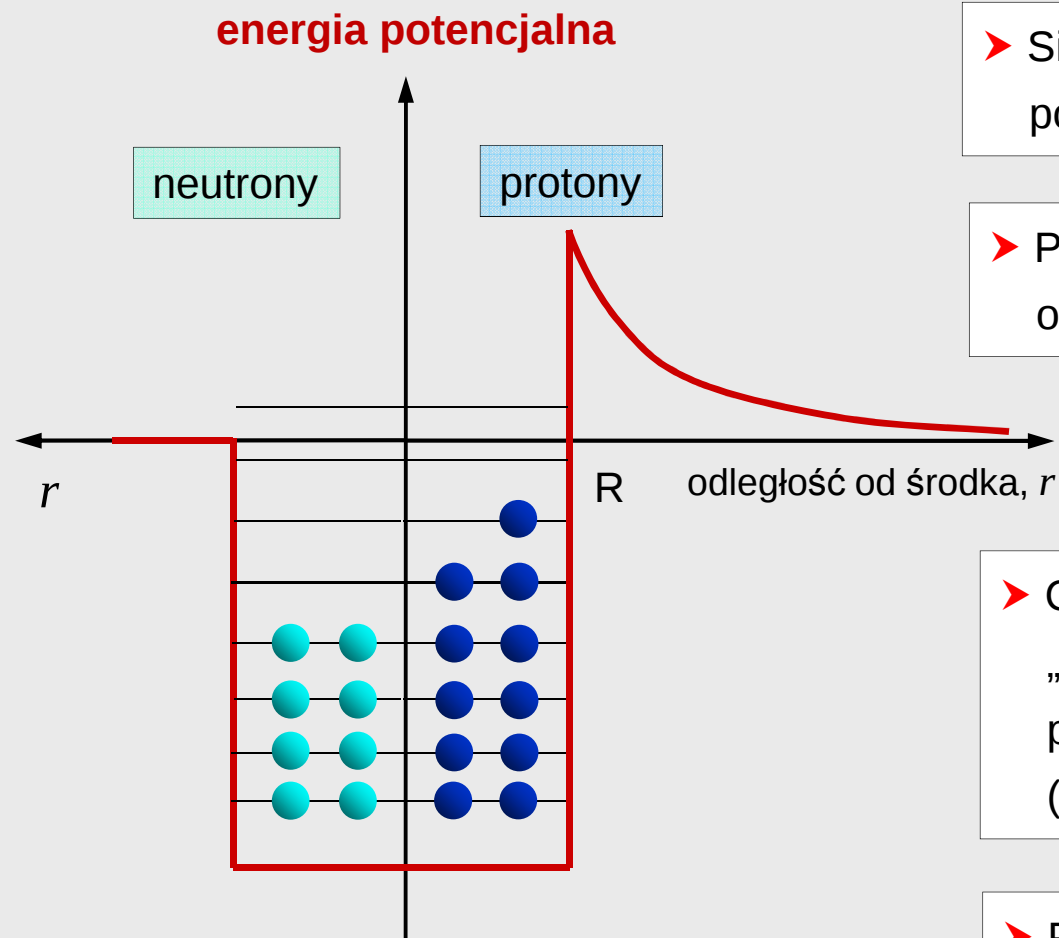
^{222}Rn : $E_{\alpha} = 5.5 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 3.8 \text{ dni}$

^{214}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



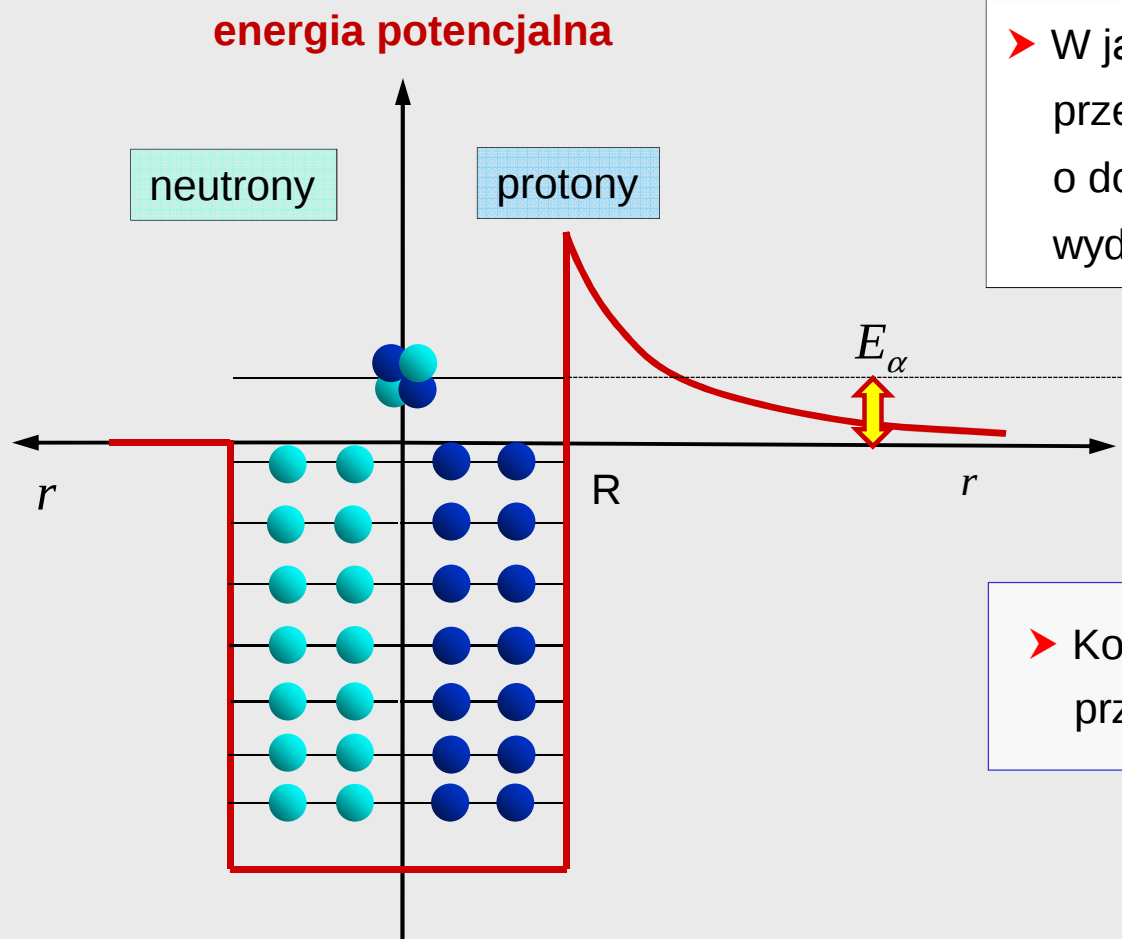
➤ Siły jądrowe tworzą „dołek” potencjału dla neutronów i protonów.

➤ Protony czują dodatkowo odpychanie elektrostatyczne.

➤ Cząstki nie mogą opaść na dno „dołka”, muszą zajmować „półki”, po dwie cząstki na „półce”.
(zakaz Pauliego)

➤ Przenosząc cząstki na wyższe „półki” tworzymy stan wzbudzony.

Jak zachodzi emisja α ?



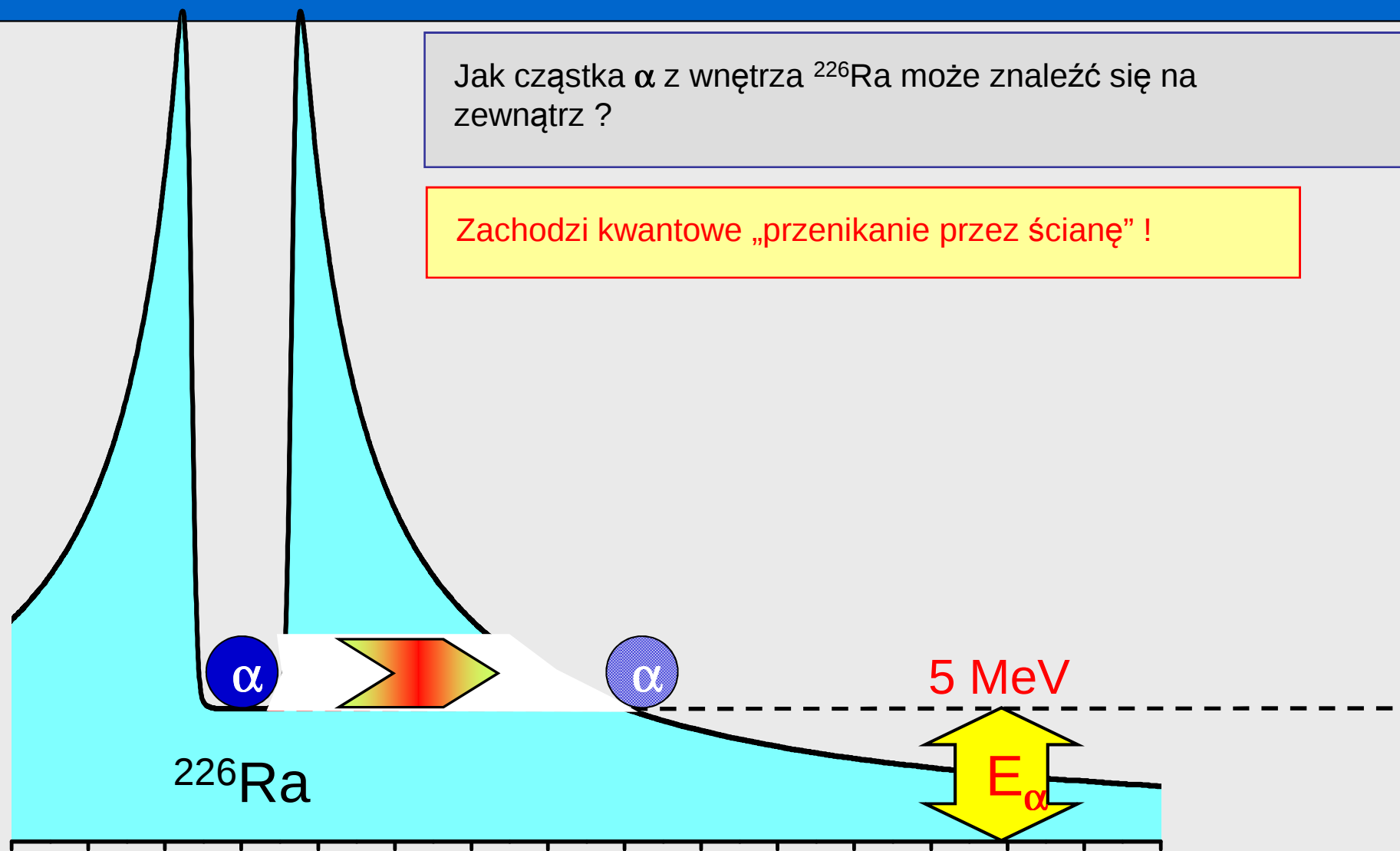
➤ W jądrze niestabilnym ze względu na przemianę α nukleony tworzą cząstkę α o dodatniej energii, która jednak nie może wydostać się z jamy potencjału!

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

Model „minigolfowy”

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

Zachodzi kwantowe „przenikanie przez ścianę” !

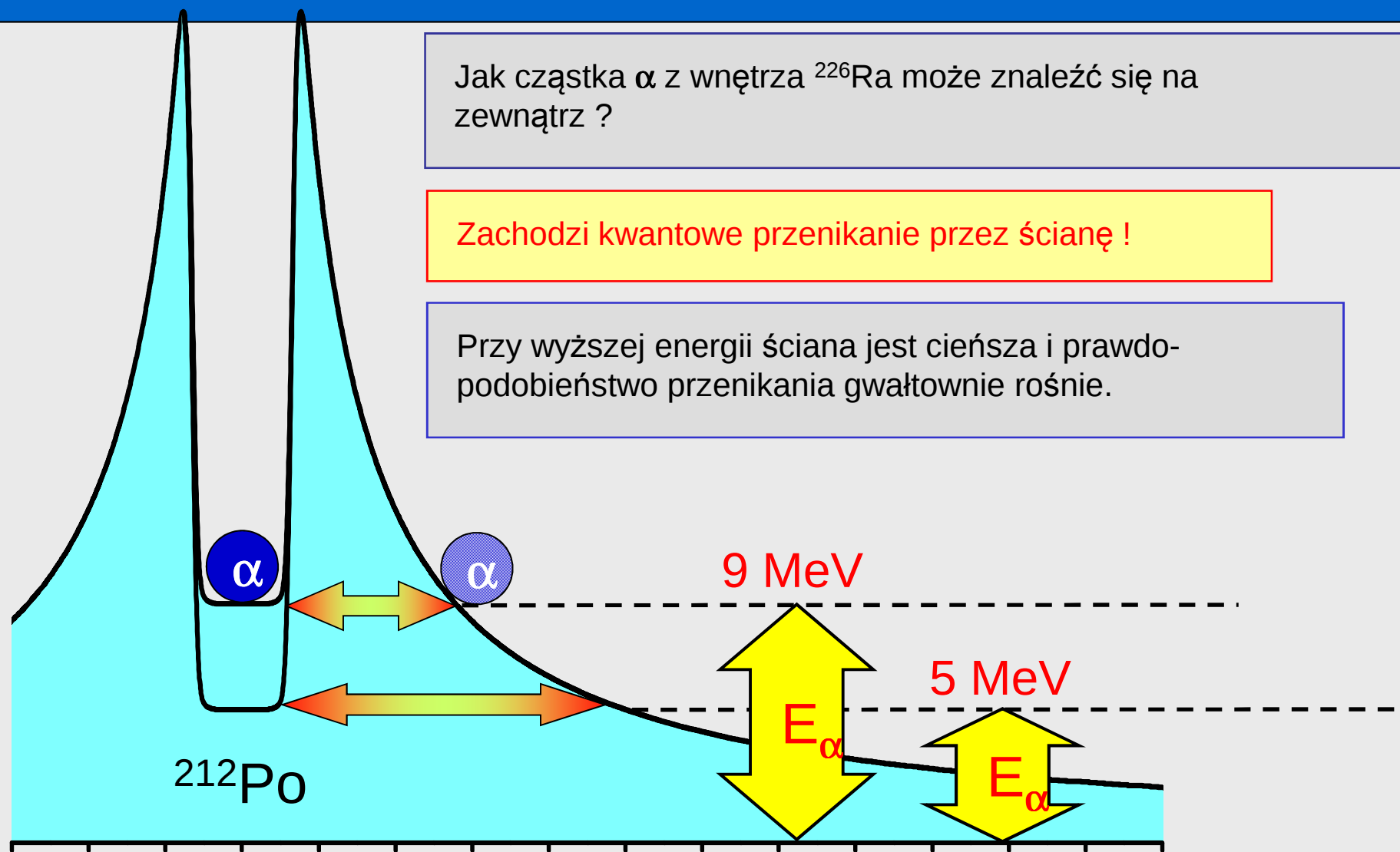


Model „minigolfowy”

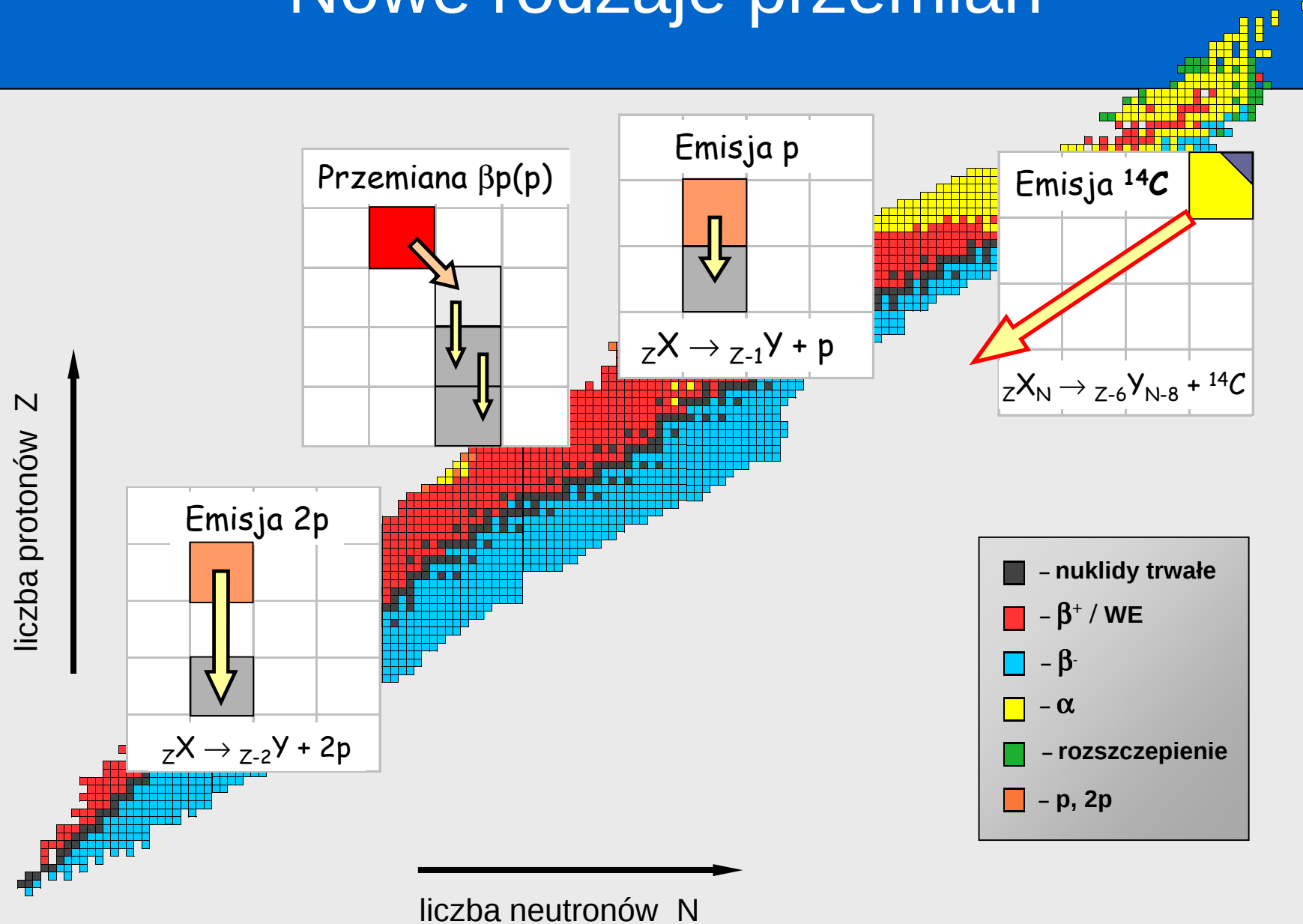
Jak cząstka α z wnętrza ^{226}Ra może znaleźć się na zewnątrz ?

Zachodzi kwantowe przenikanie przez ścianę !

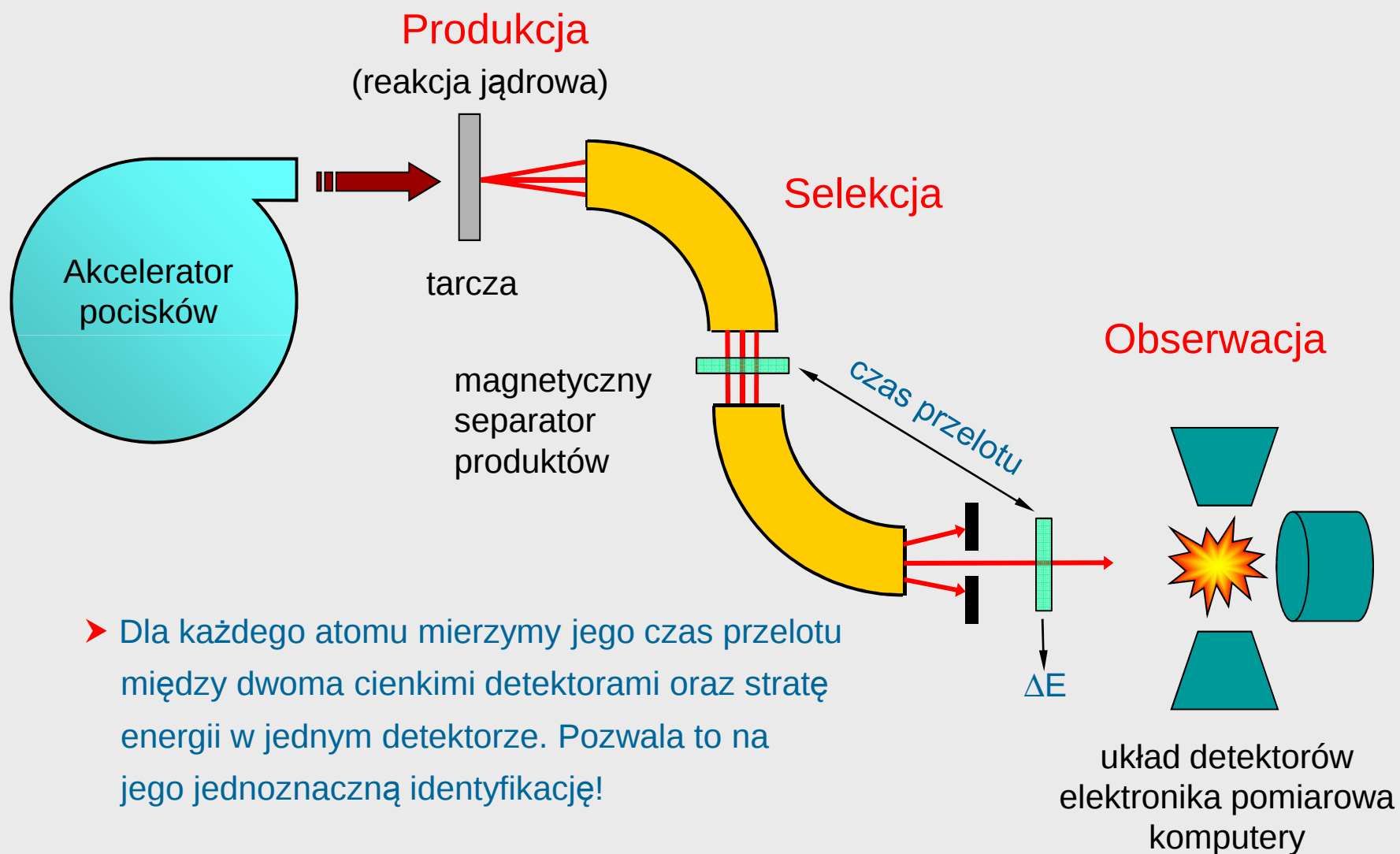
Przy wyższej energii ściana jest cieńsza i prawdopodobieństwo przenikania gwałtownie rośnie.



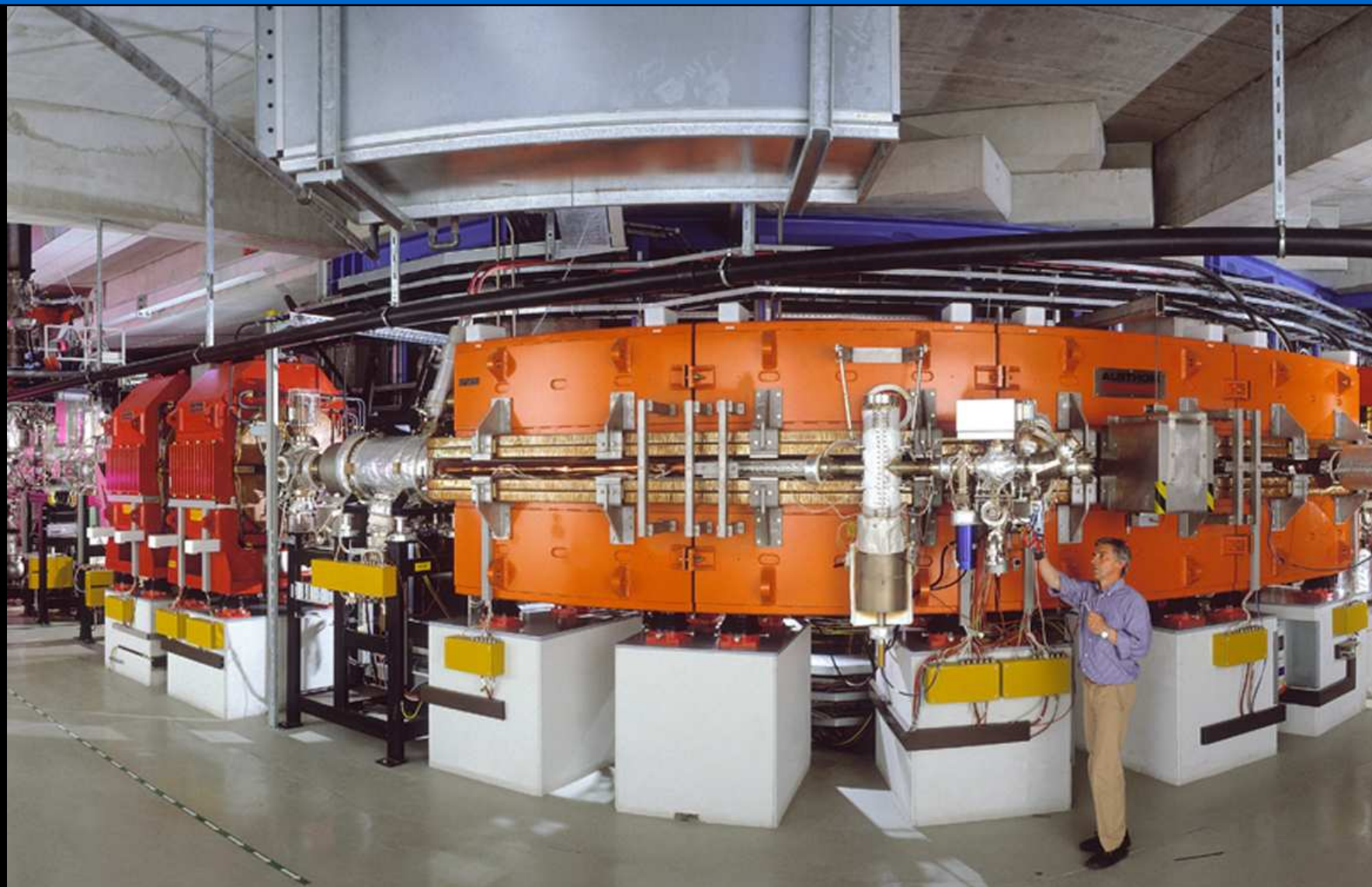
Nowe rodzaje przemian



Schemat współczesnego eksperymentu

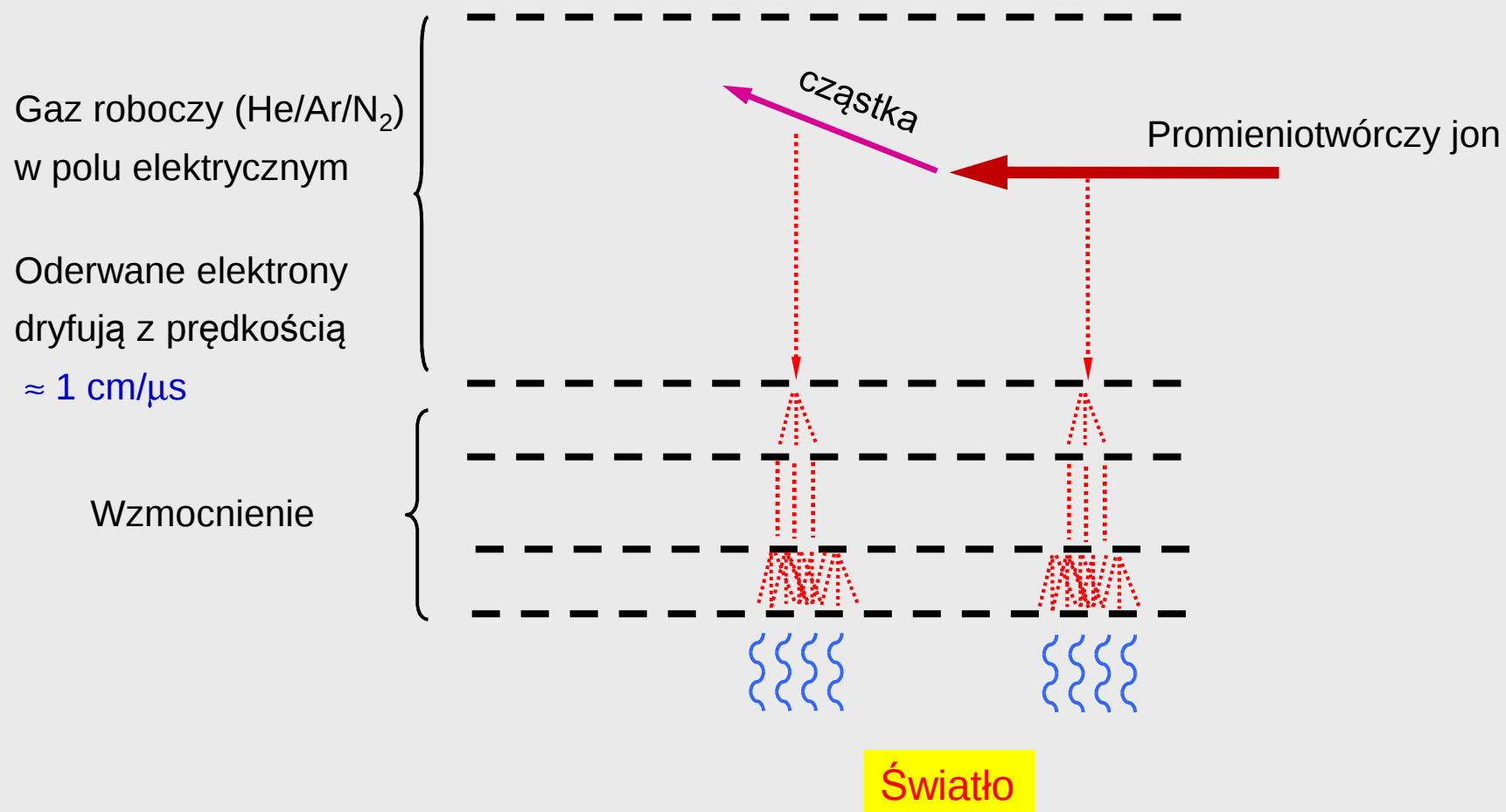


Separatory magnetyczne

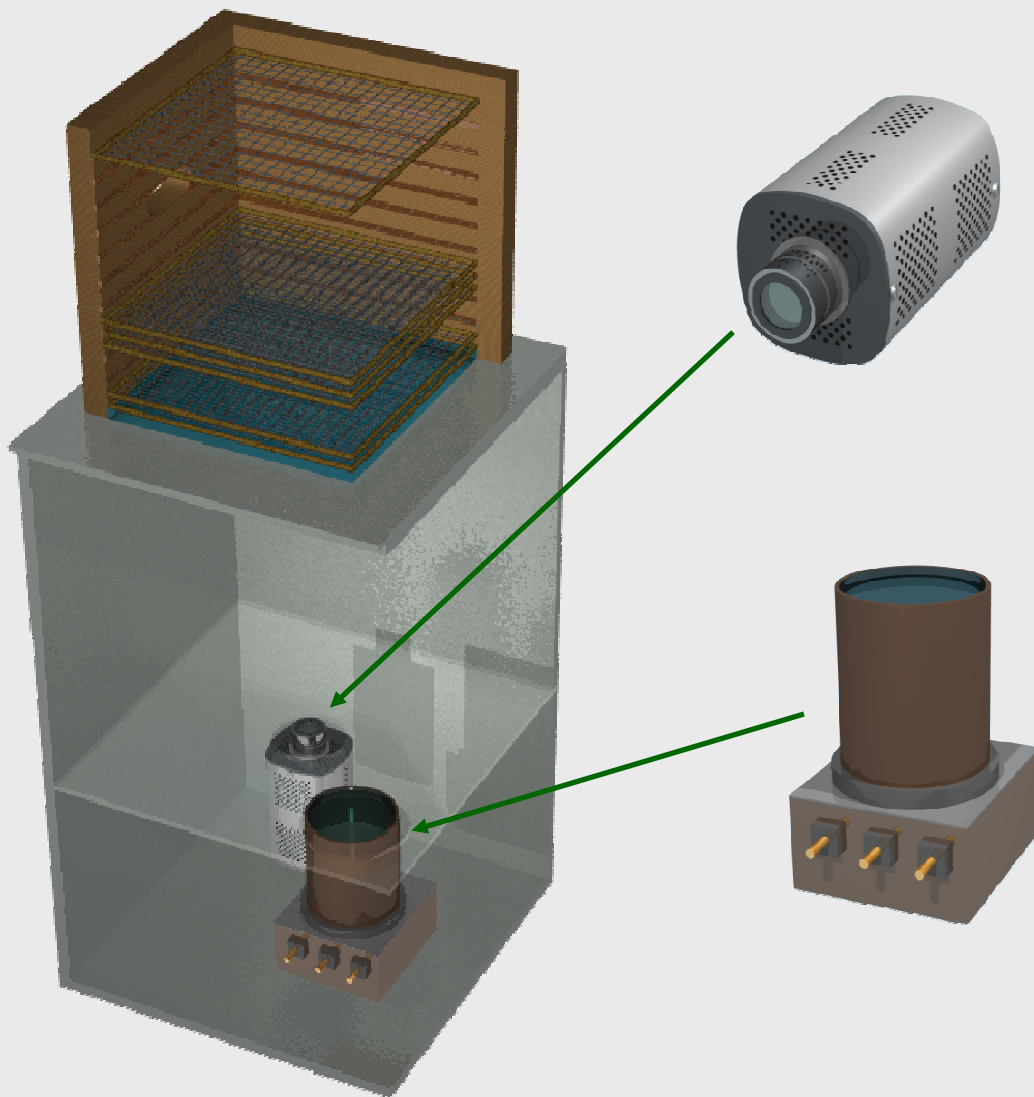


Nowy detektor gazowy

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



Pełne urządzenie OTPC



➤ Kamera CCD 2/3"

- 500 × 500 pikseli
- 16-bitów
- wzmacniacz obrazu (x2000)

➔ Obraz rzutu na płaszczyznę

➤ Fotopowielacz

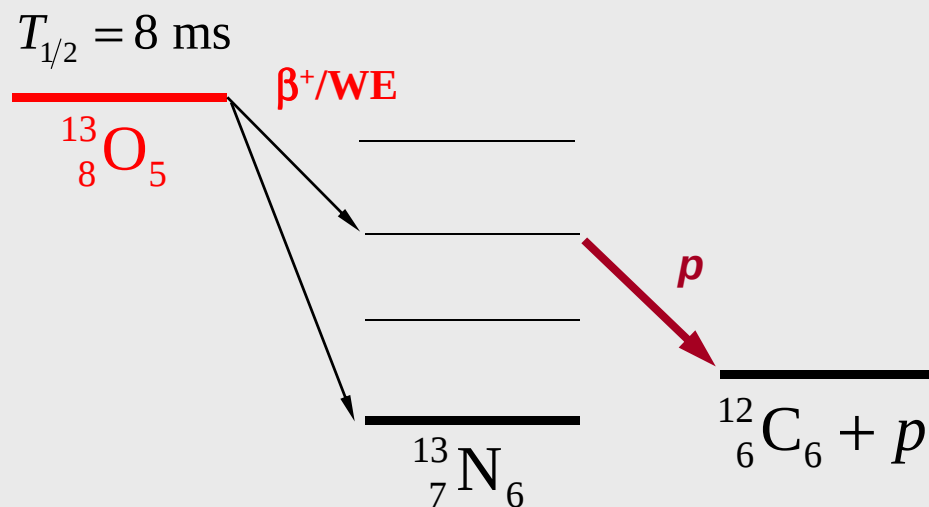
➔ Zapis intensywności światła
w funkcji czasu (informacja
o położeniu w kierunku
prostopadłym do obrazu)

OTPC w gotowości

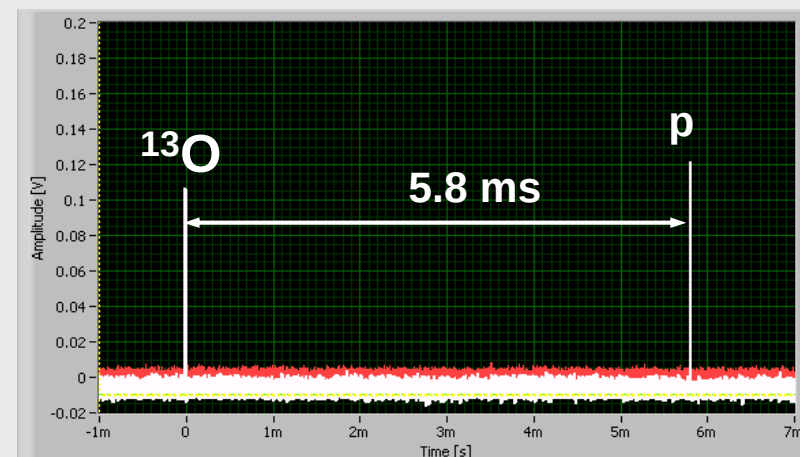
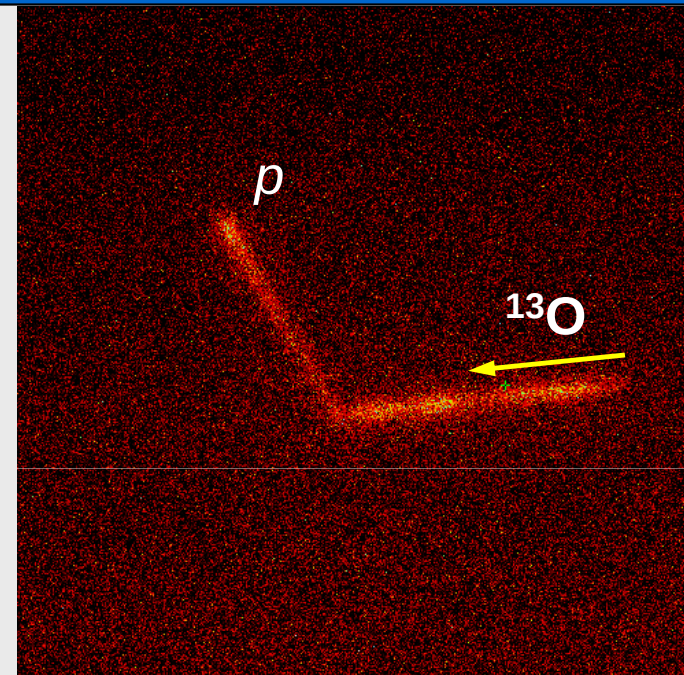
Marzec 2011 – eksperyment w
laboratorium przy Michigan State
University w USA



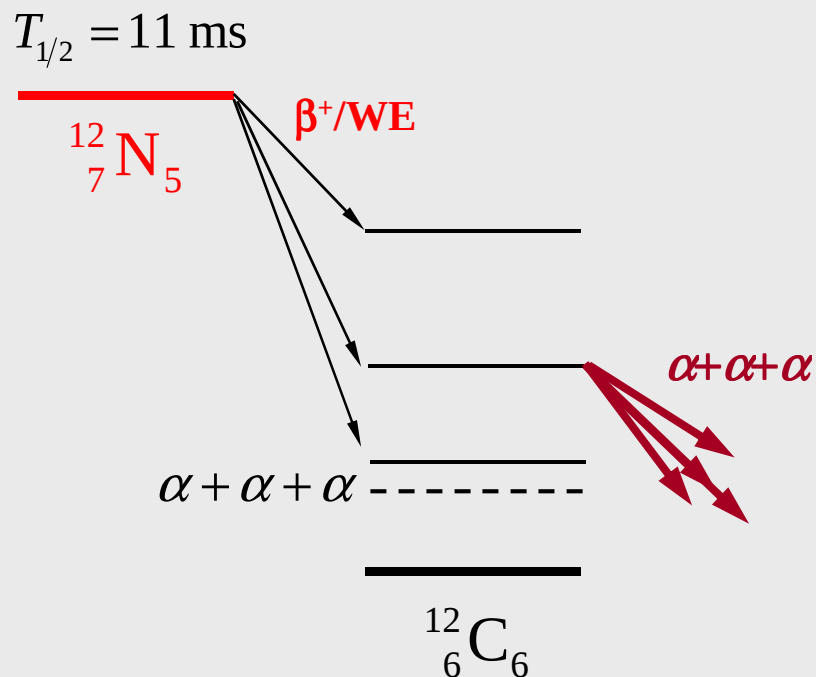
Przemiana β z emisją protonu



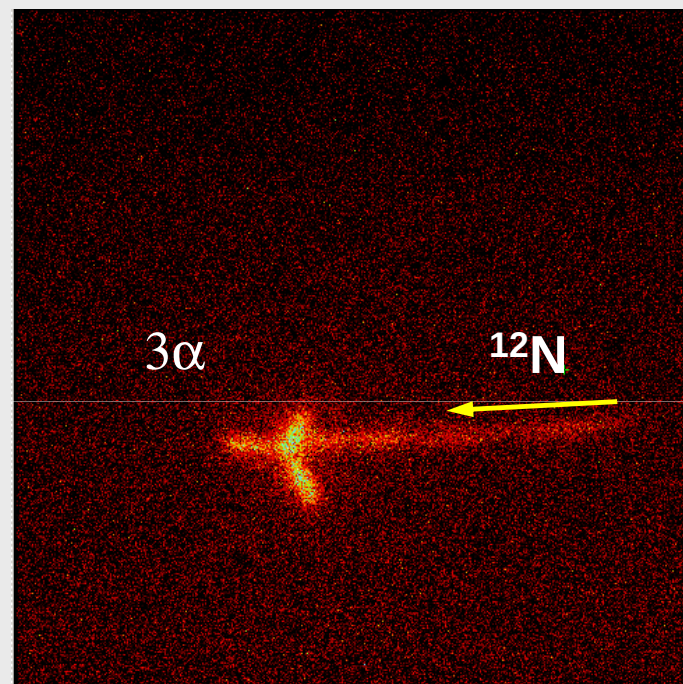
- Przemiana β ^{13}O czasem prowadzi do stanu wzbudzonego, z którego emitowany jest proton.



Przemiana β z emisją cząstek α



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

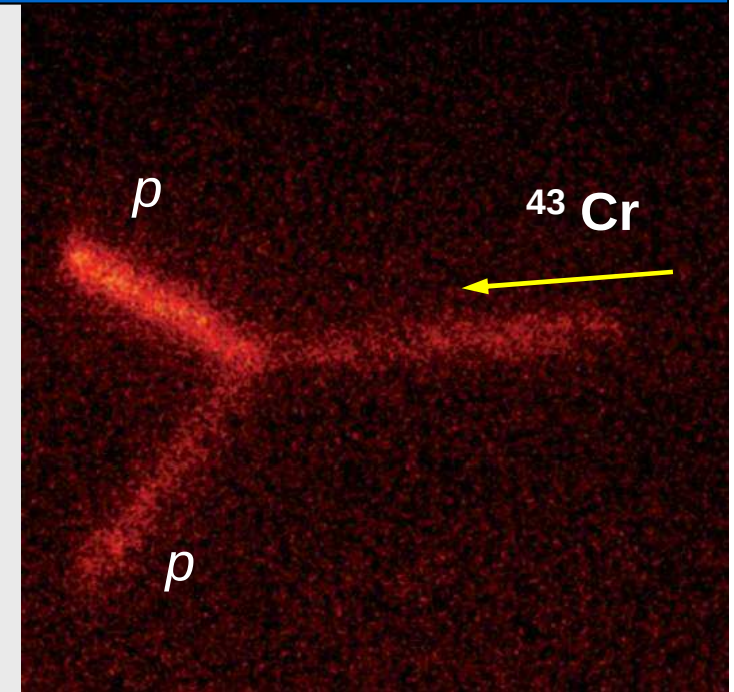
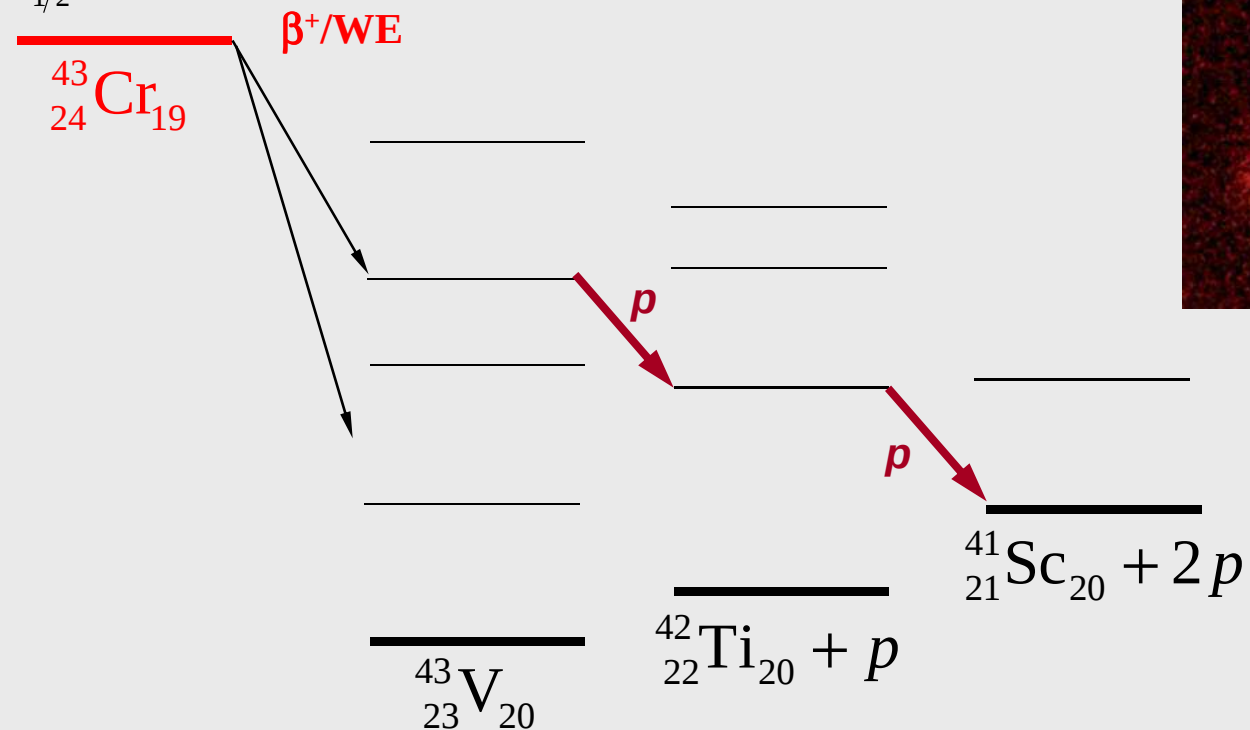


- Badania takich zjawisk pomagają zrozumieć jak we Wrzechświecie powstał węgiel.

Przemiana β z emisją dwóch protonów

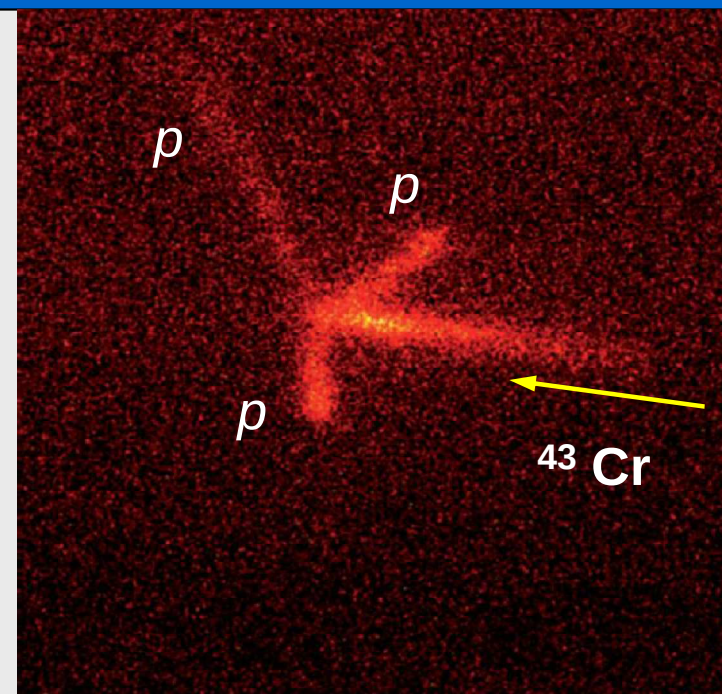
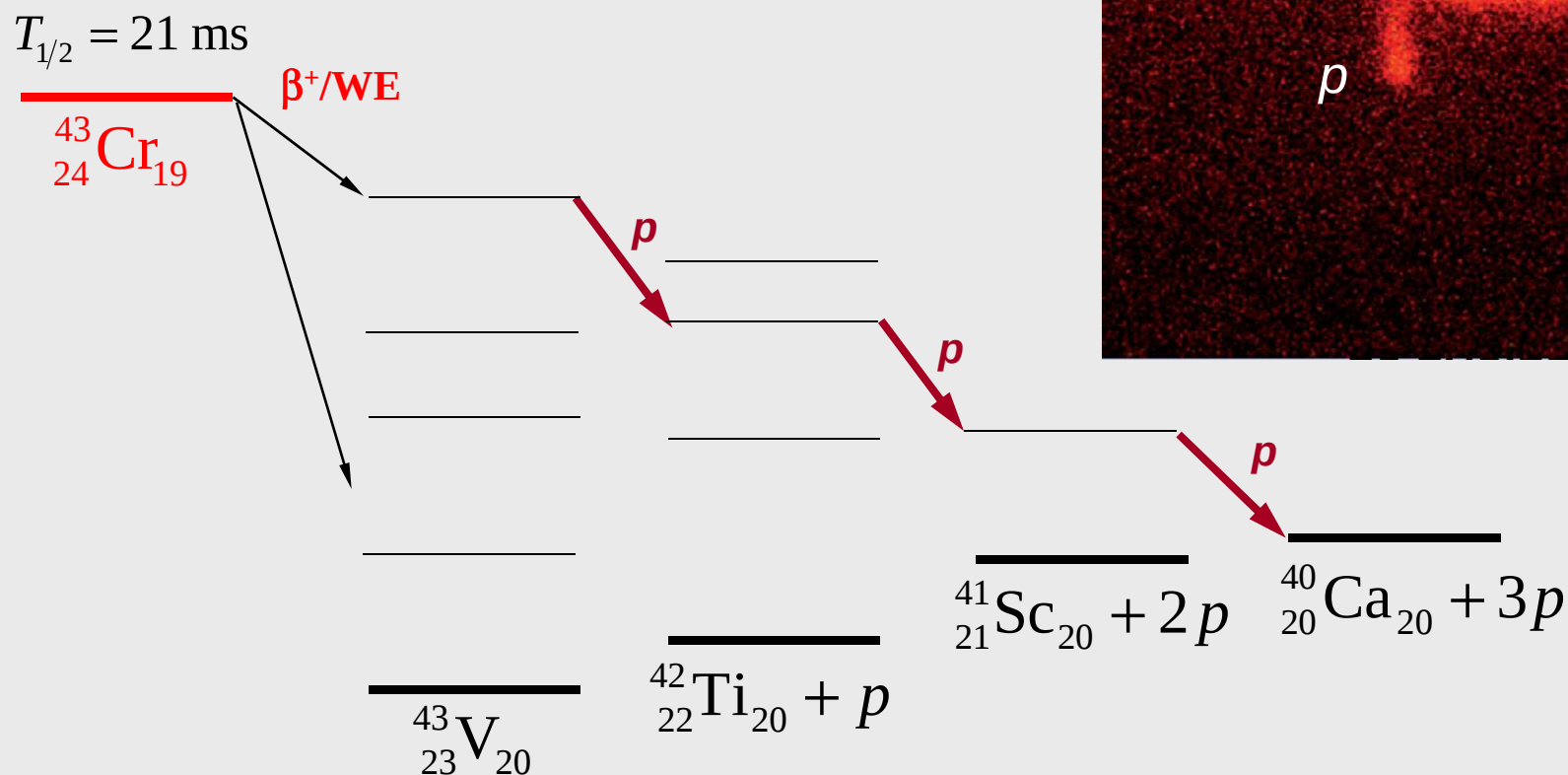
► Po przemianie β mogą być wyemitowane dwa protony

$T_{1/2} = 21 \text{ ms}$



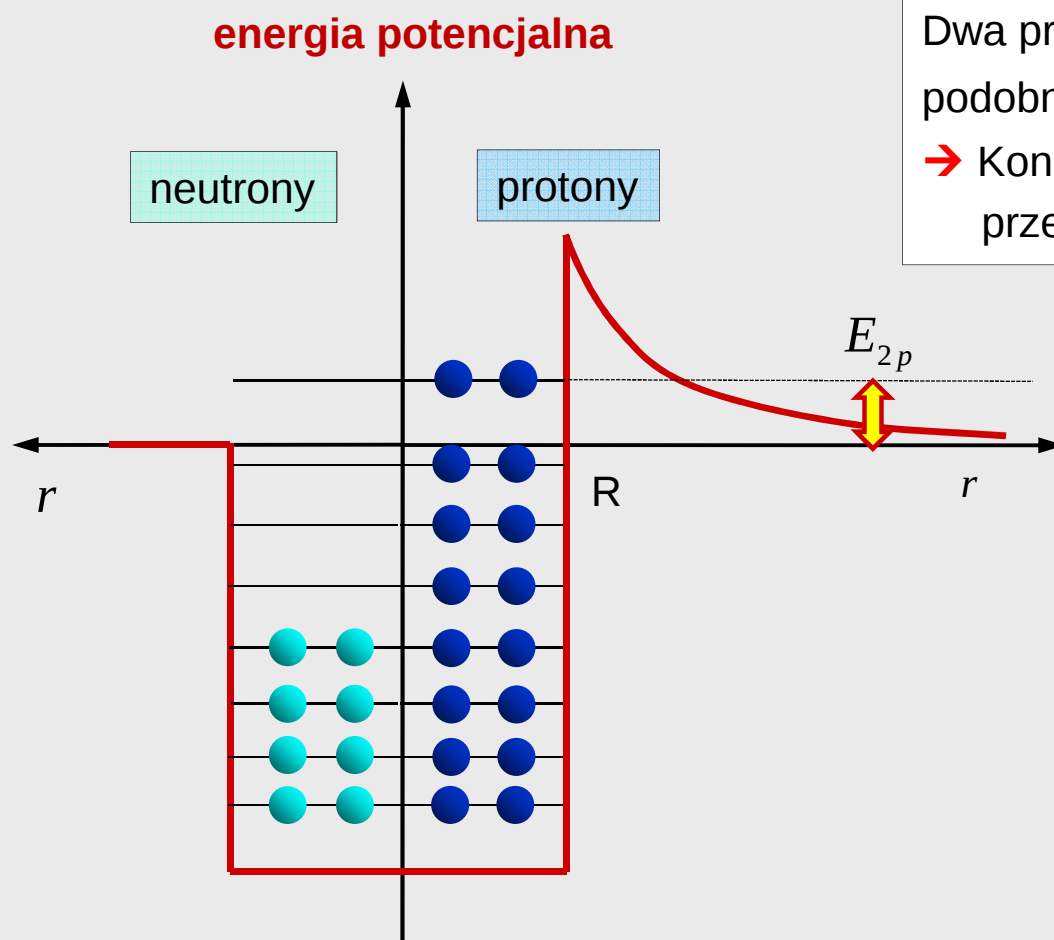
Przemiana β z emisją trzech protonów

- Rzadki proces emisji trzech protonów po przemianie β zaobserwowaliśmy jako pierwsi dzięki zastosowaniu detektora OTPC!



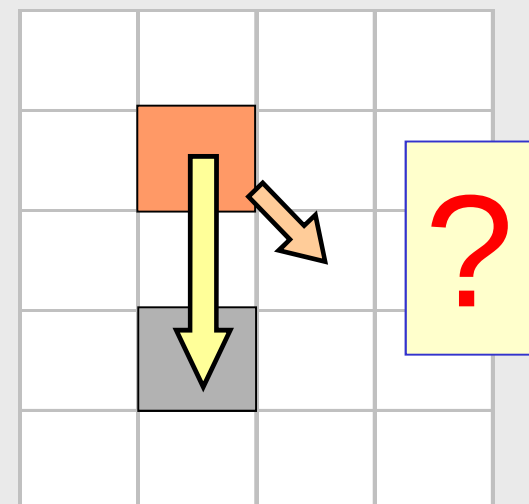
Promieniotwórczość dwuprotonowa

- Gdy jądro ma wielki niedobór neutronów i parzystą liczbę protonów może wyrzucić jednocześnie dwa protony. Ale możliwa jest też przemiana β^+ !



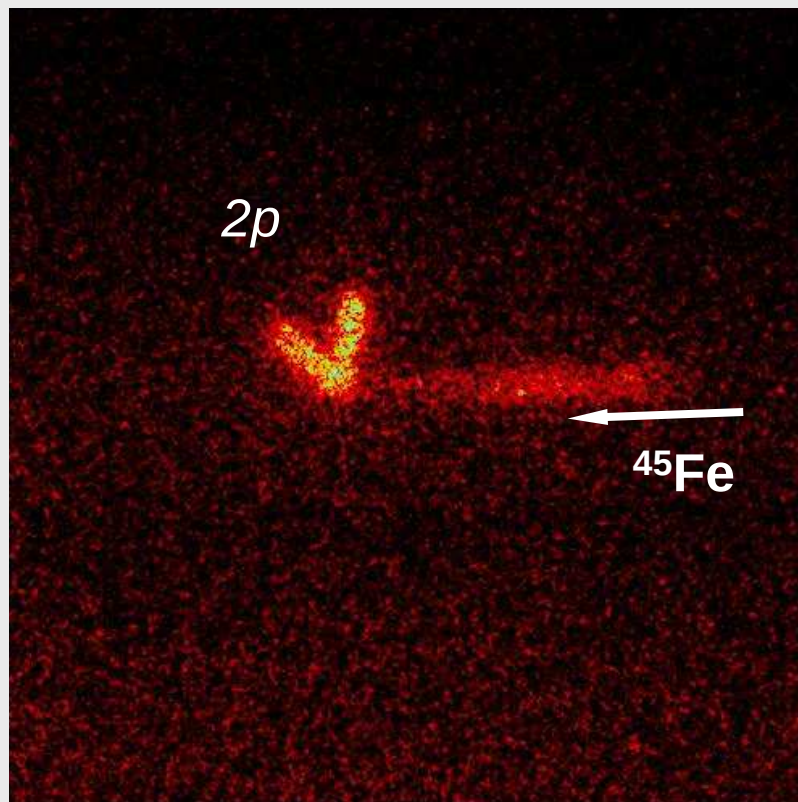
Dwa protony uwięzione w jamie potencjału, podobnie jak cząstka α !

➔ Konkurencja: co zajdzie szybciej, przemiana β , czy tunelowanie pary protonów?

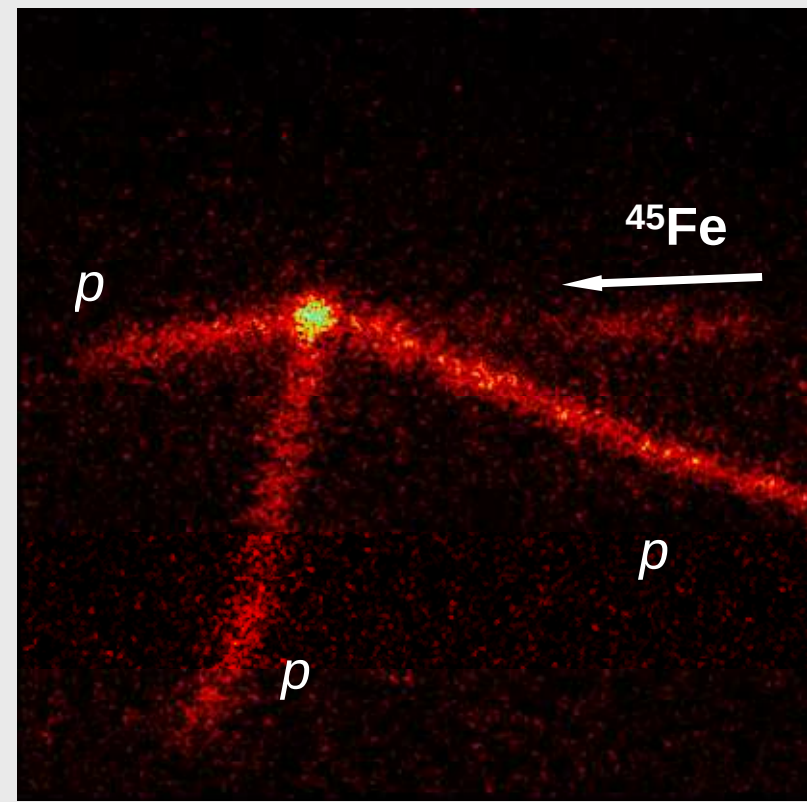


Badanie ^{45}Fe

Eksperyment na Uniwersytecie stanu Michigan (USA), 2007

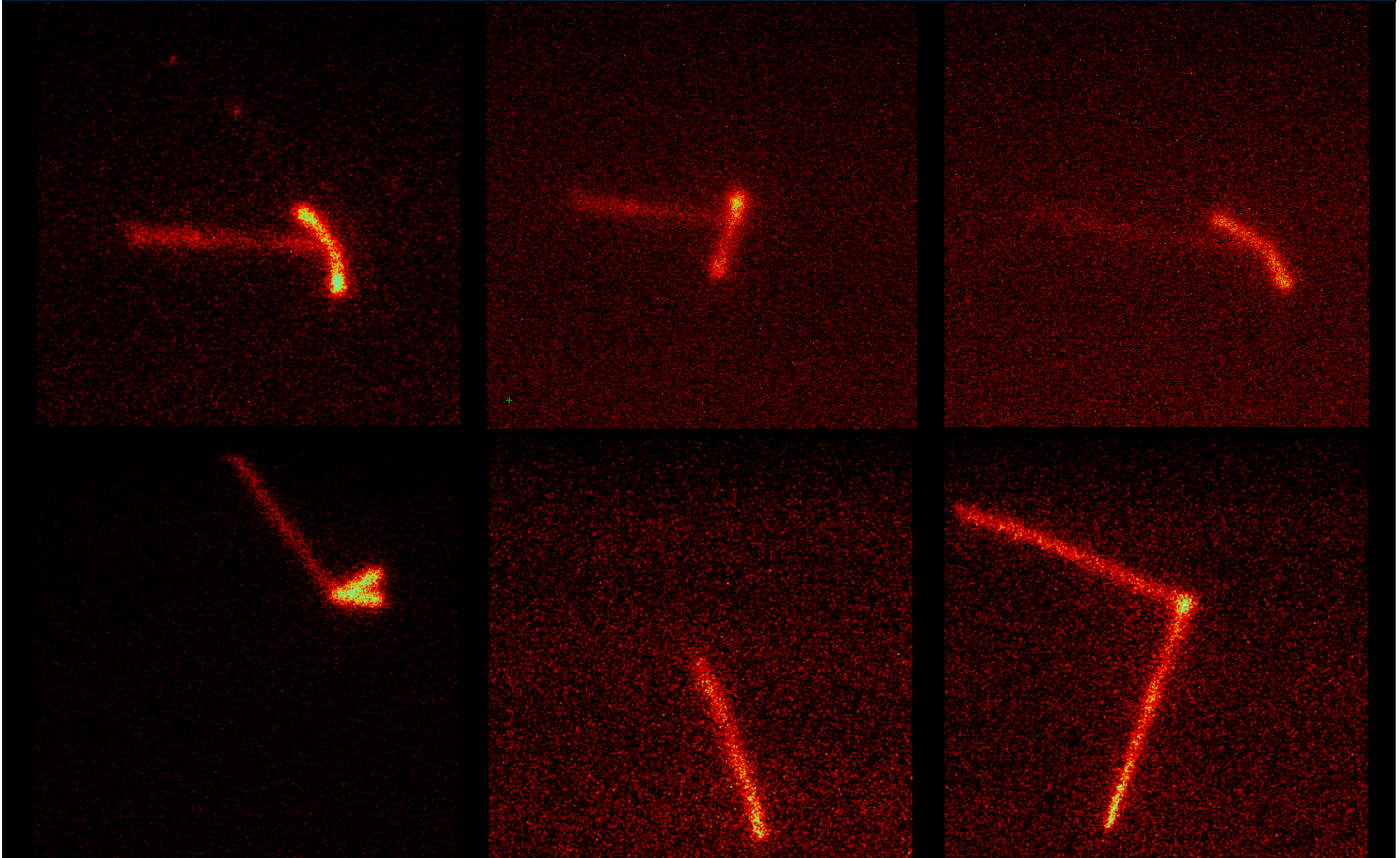


Promieniotwórczość $2p$



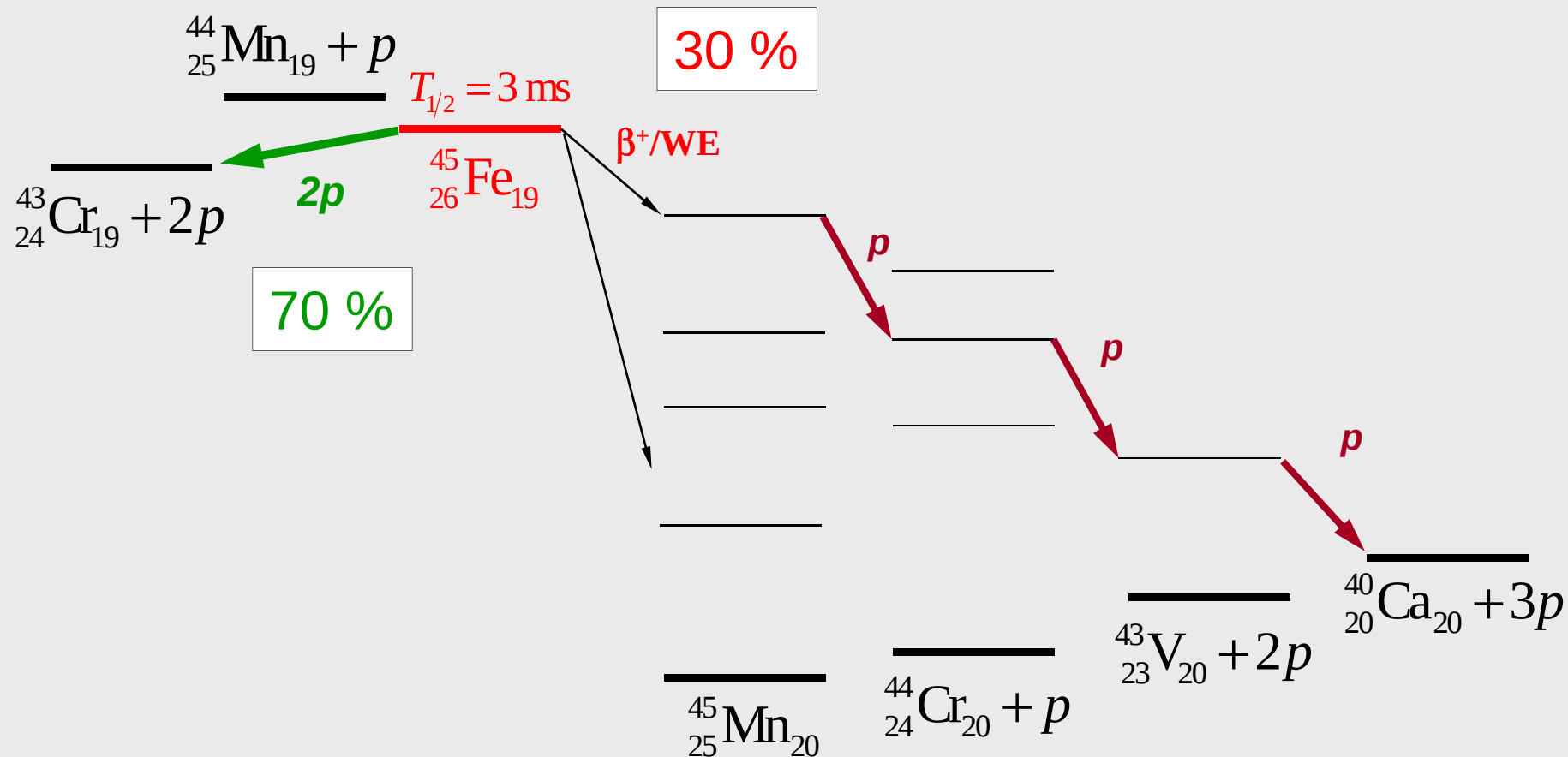
Przemiana β z emisją 3 protonów

^{45}Fe – galeria zdjęć



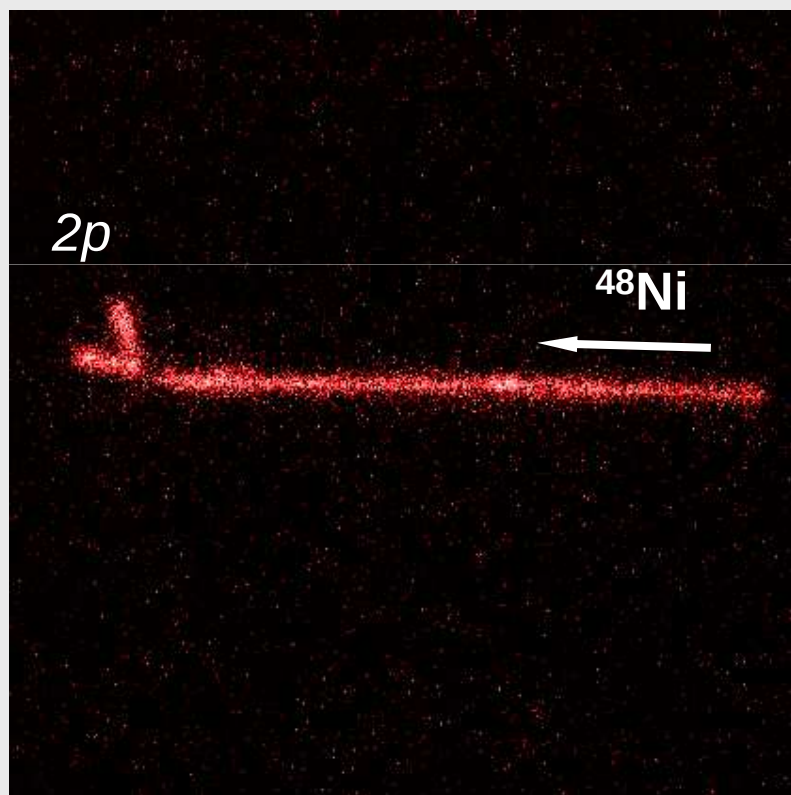
Możliwe przemiany ^{45}Fe

► ^{45}Fe rozpada się na dwa sposoby! Albo $2p$ albo β^+

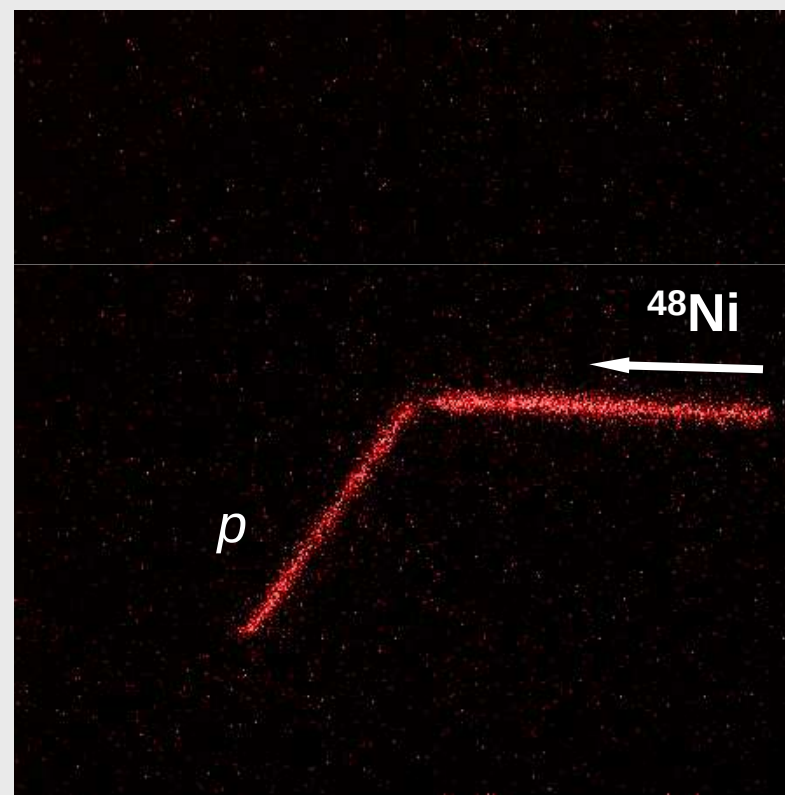


Badanie ^{48}Ni

Eksperyment na Uniwersytecie stanu Michigan (USA), marzec 2011



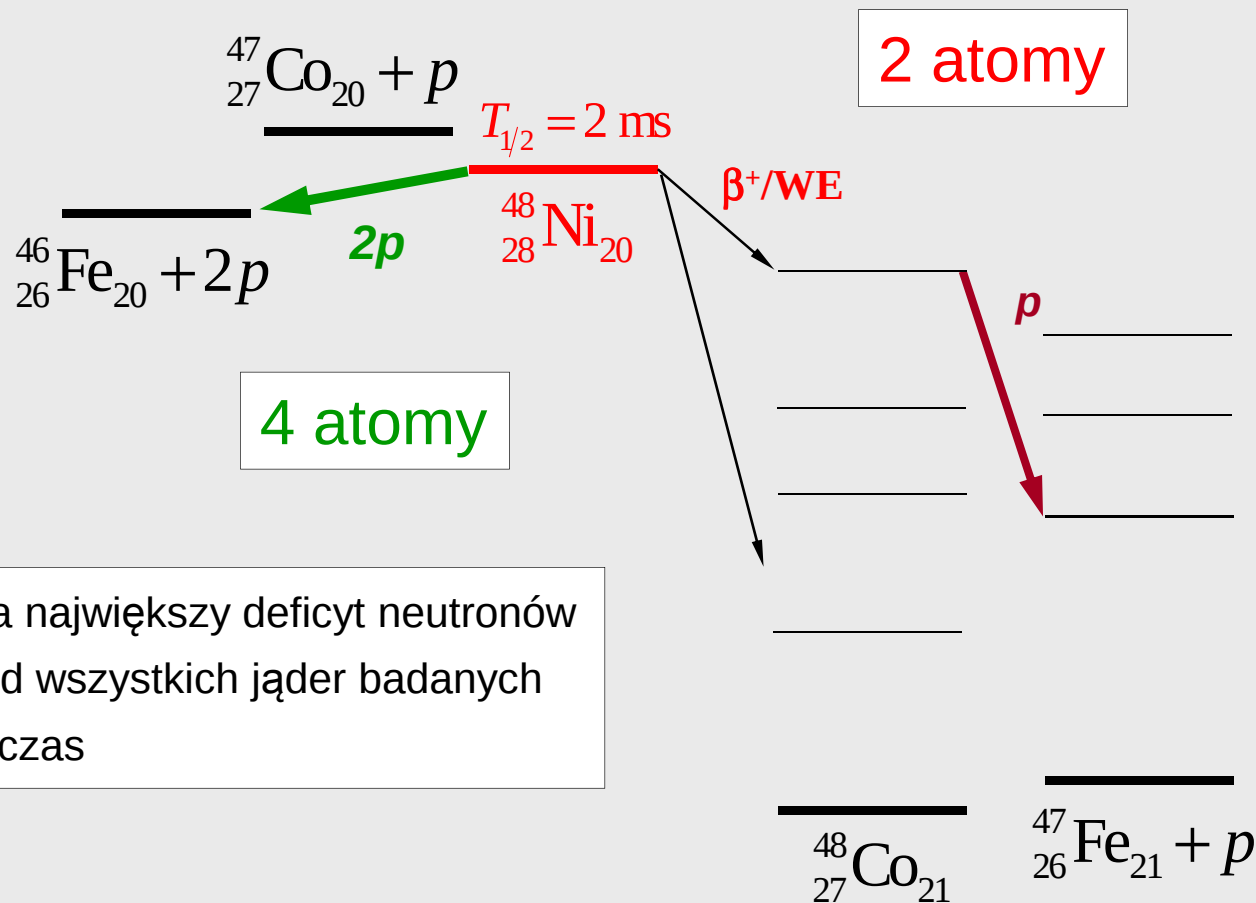
Promieniotwórczość $2p$



Przemiana β z emisją protonu

Możliwe przemiany ^{48}Ni

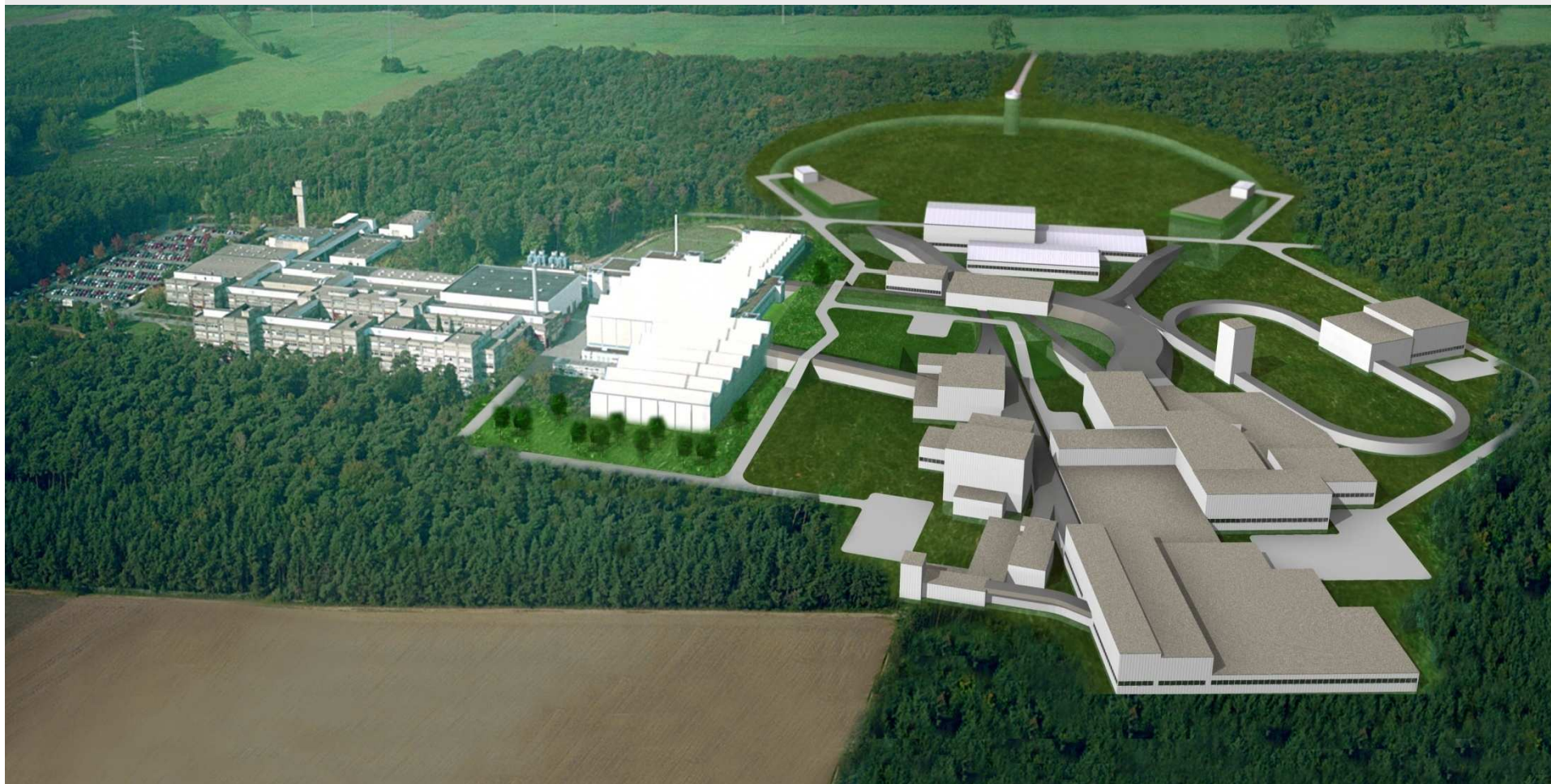
➤ ^{48}Ni też rozpada się na dwa sposoby! Albo $2p$ albo β^+



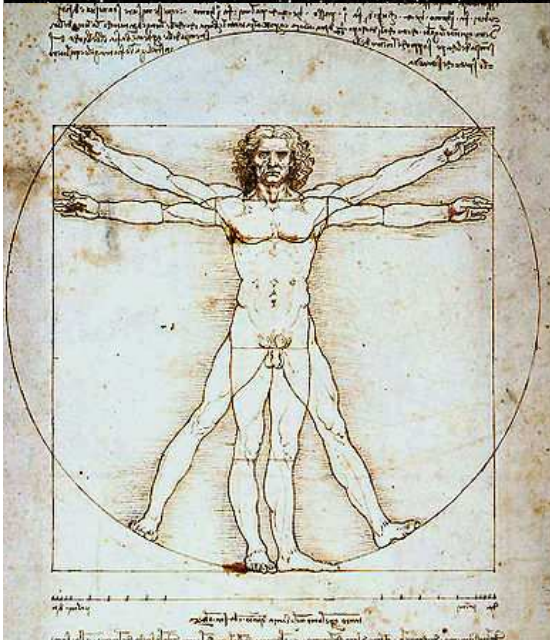
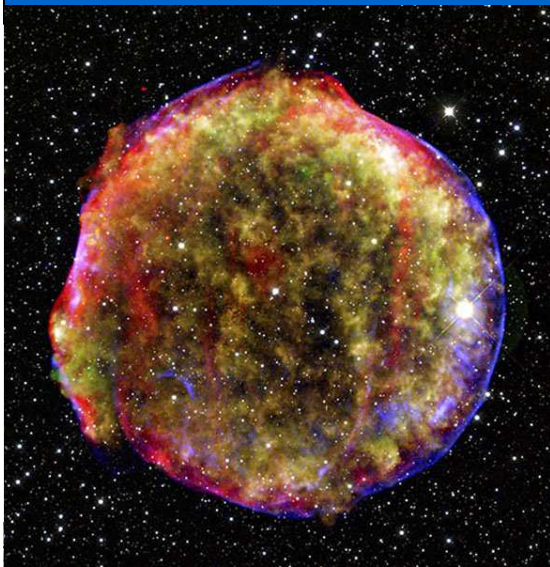
➤ ^{48}Ni ma największy deficyt neutronów spośród wszystkich jąder badanych dotychczas

Ekscytująca perspektywa

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



Promieniotwórcza historia życia



- W Wielkim Wybuchu powstały wodór i hel.
- Cięższe pierwiastki, w tym kluczowe dla życia węgiel, tlen i in. powstały w masywnych gwiazdach w procesach syntezy termojądrowej.
- Supernowe rozrzuciły materię bogatą w pierwiastki. Z materii tej powstały następne gwiazdy i nasz Układ Słoneczny.
- Dzięki oddziaływaniom słabym (promieniotwórczość β) wodór spala w Słońcu się bardzo powoli. Dało to czas potrzebny do rozwinięcia się życia na Ziemi.
- Ciepło rozpadów promieniotwórczych ogrzewa wnętrze Ziemi i napędza procesy tektoniczne. Mogło dać początek życiu.
- Życie rozwijało się w obecności promieniowania jonizującego i jest przystosowane do jego małych dawek.
- Resztki rozszczepialnych nuklidów są cennym źródłem czystej (klimatycznie) energii.

Dziękuję za uwagę!

