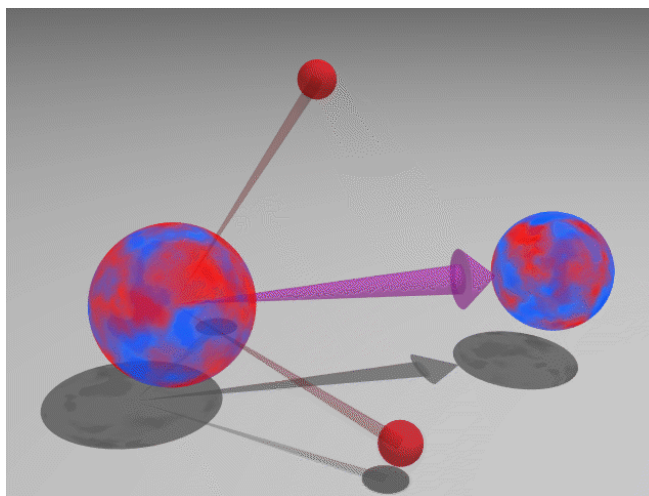


Niezwykłe przemiany egzotycznych nuklidów

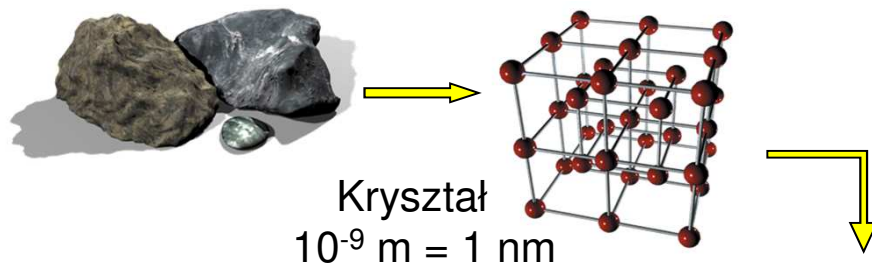
Marek Pfützner
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytet Warszawski



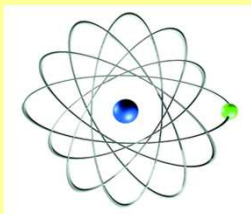
Świder, 7 maja 2004



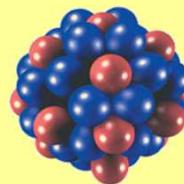
„Poziomy” materii



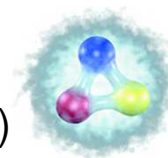
Atom
 $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ Å}$



Jądro
 $10^{-14} \text{ m} = 10 \text{ fm}$



Nukleon
(proton, neutron)
 $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$

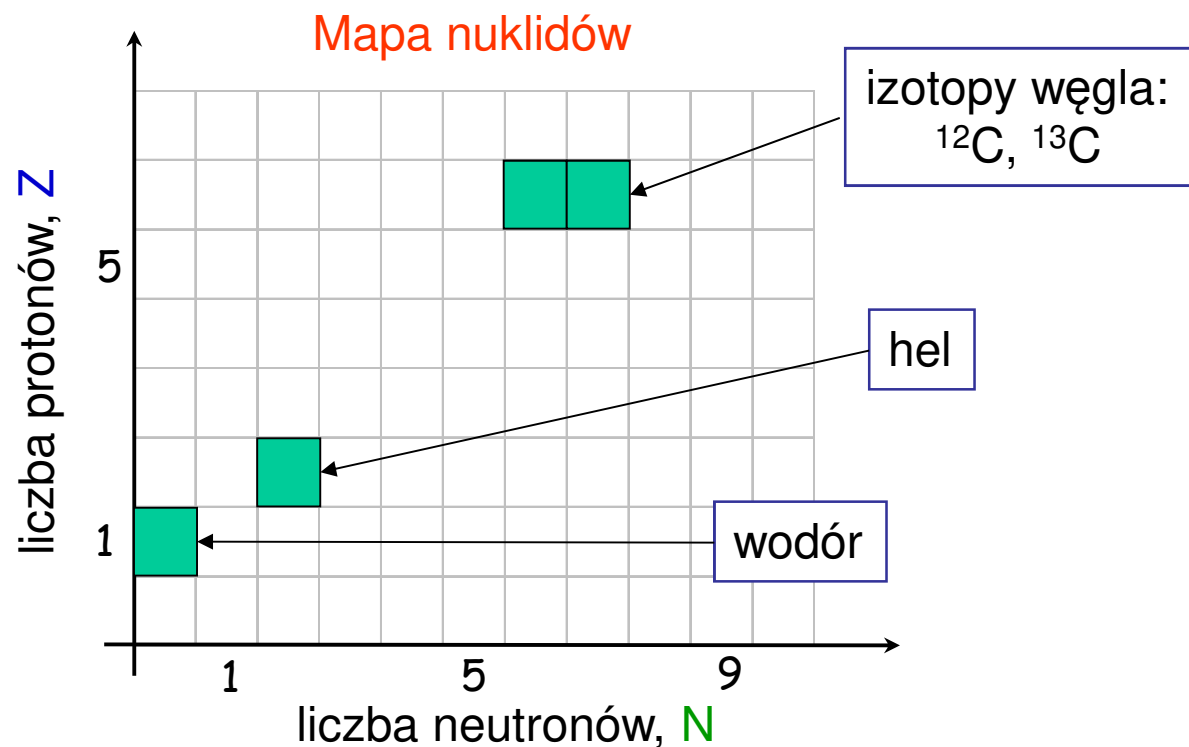


Kwarki, elektrony
elementarne ? punktowe ?

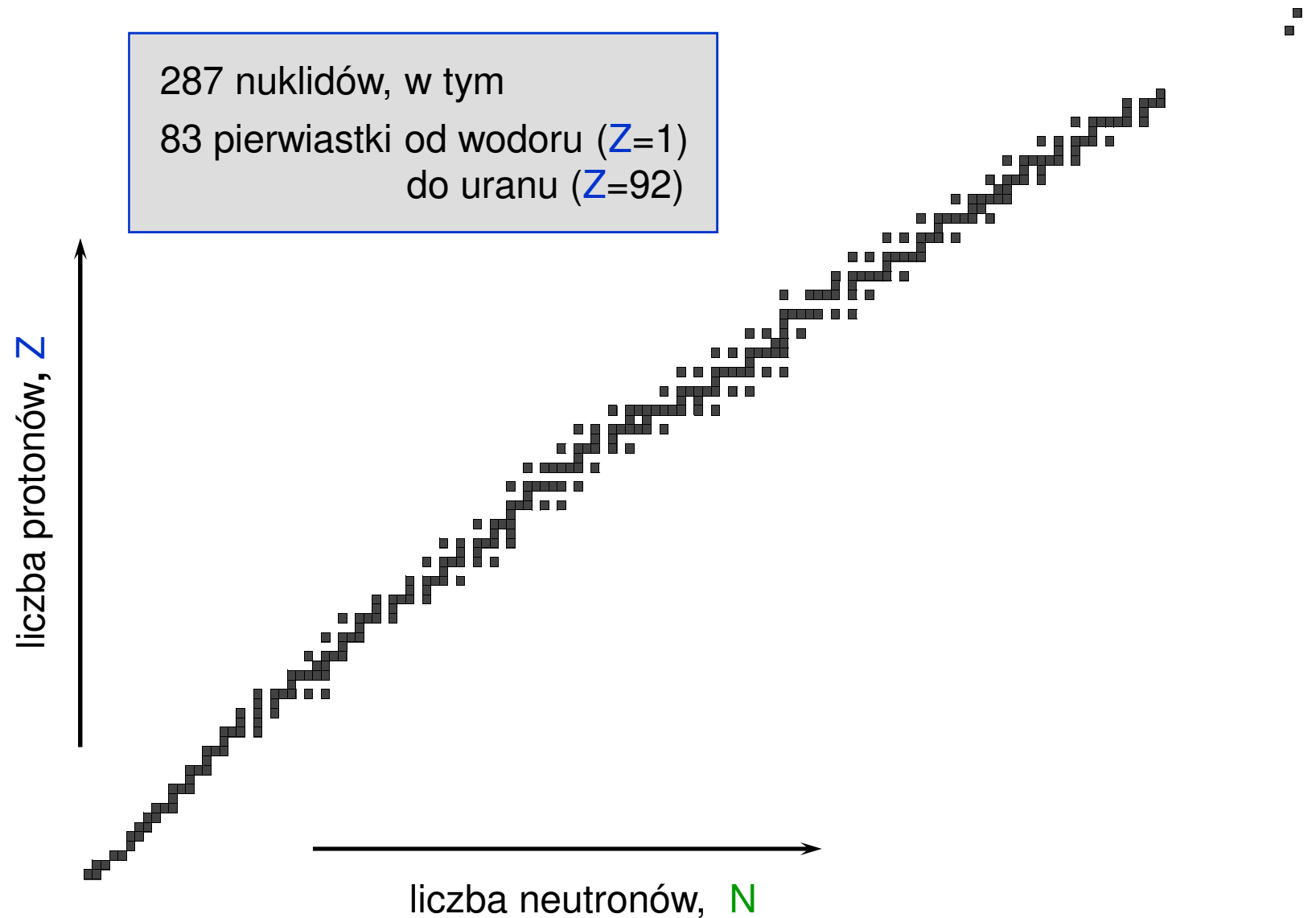


Nuklidy

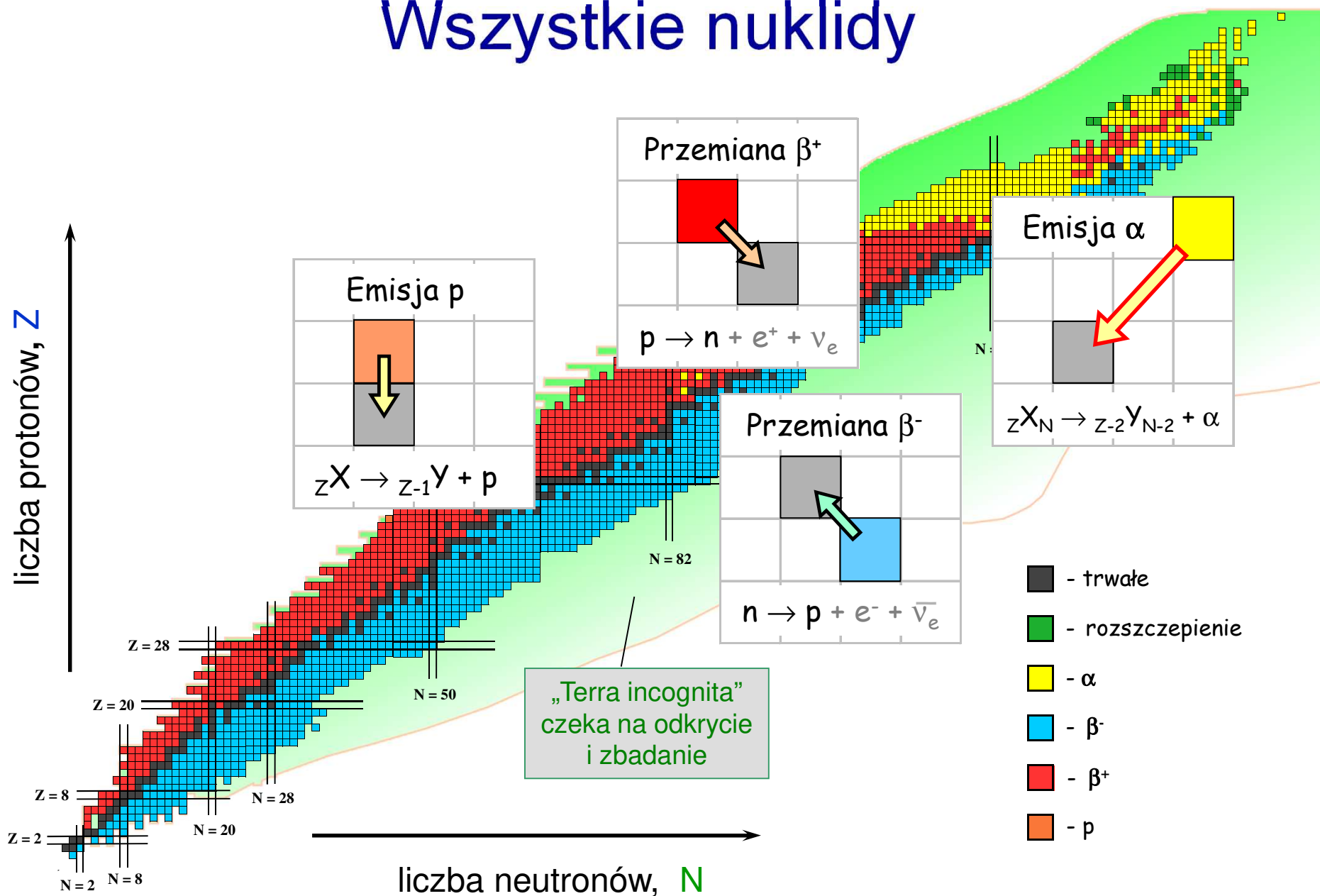
- ▶ Nuklid (atom, zazwyczaj obojętny elektrycznie) :
 Z protonów + N neutronów + Z elektronów
- ▶ Nuklid pozbawiony części (lub wszystkich) elektronów → jon
- ▶ Liczba Z decyduje o właściwościach chemicznych
→ pierwiastki chemiczne
- ▶ Różne liczby N → izotopy



Nuklidy trwałe



Wszystkie nuklidy



Nuklidy egzotyczne

W warunkach ziemskich niezwykle trudne do wytworzenia i bardzo nietrwałe.

Przykłady :

- ▶ Izotopy o wielkim niedoborze lub nadmiarze neutronów, czyli nuklidy bardzo dalekie od ścieżki trwałości.
- ▶ Jony o wielkim ładunku elektrycznym, np. jądra ciężkich pierwiastków całkowicie odarte z elektronów orbitalnych.

Od niedawna wytwarzane i badane w laboratoriach dzięki nowym technikom :

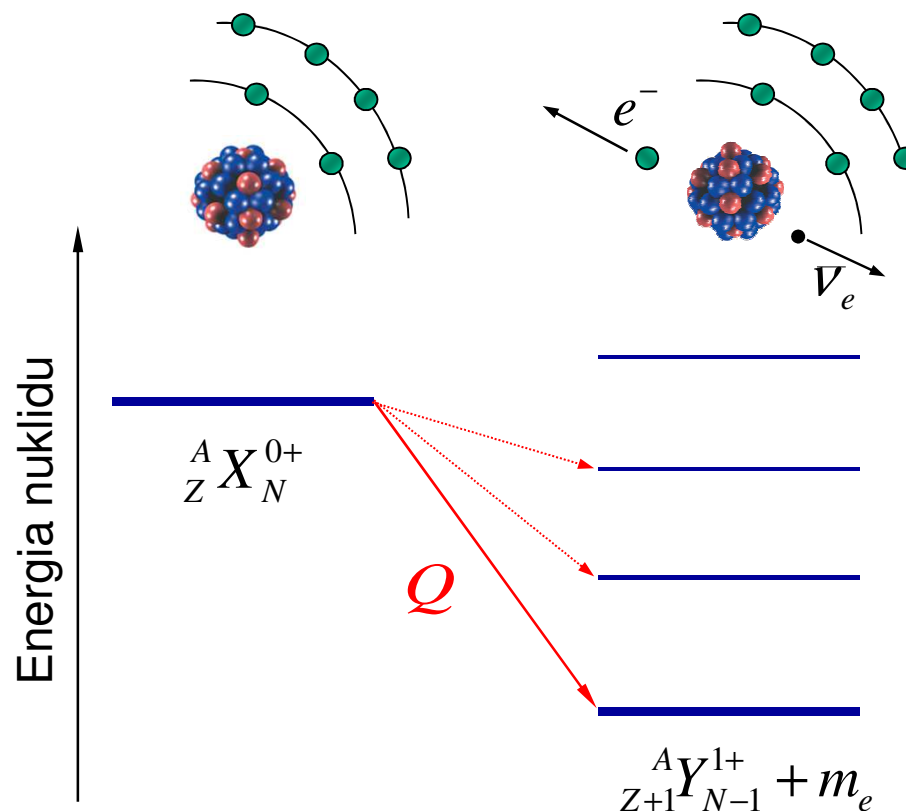
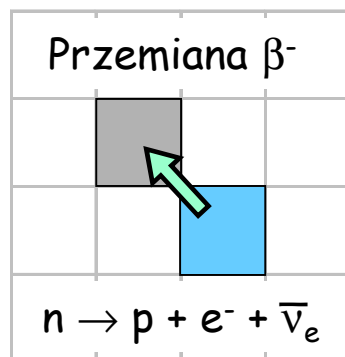
- przyspieszania ciężkich jonów do energii relatywistycznych,
- separacji produktów reakcji jądrowych,
- utrzymywania jonów w pierścieniu kumulacyjnym.

Dwa przykłady

Ilustracja nowoczesnych metod doświadczalnych :
dwa zjawiska po raz pierwszy zaobserwowane w GSI.

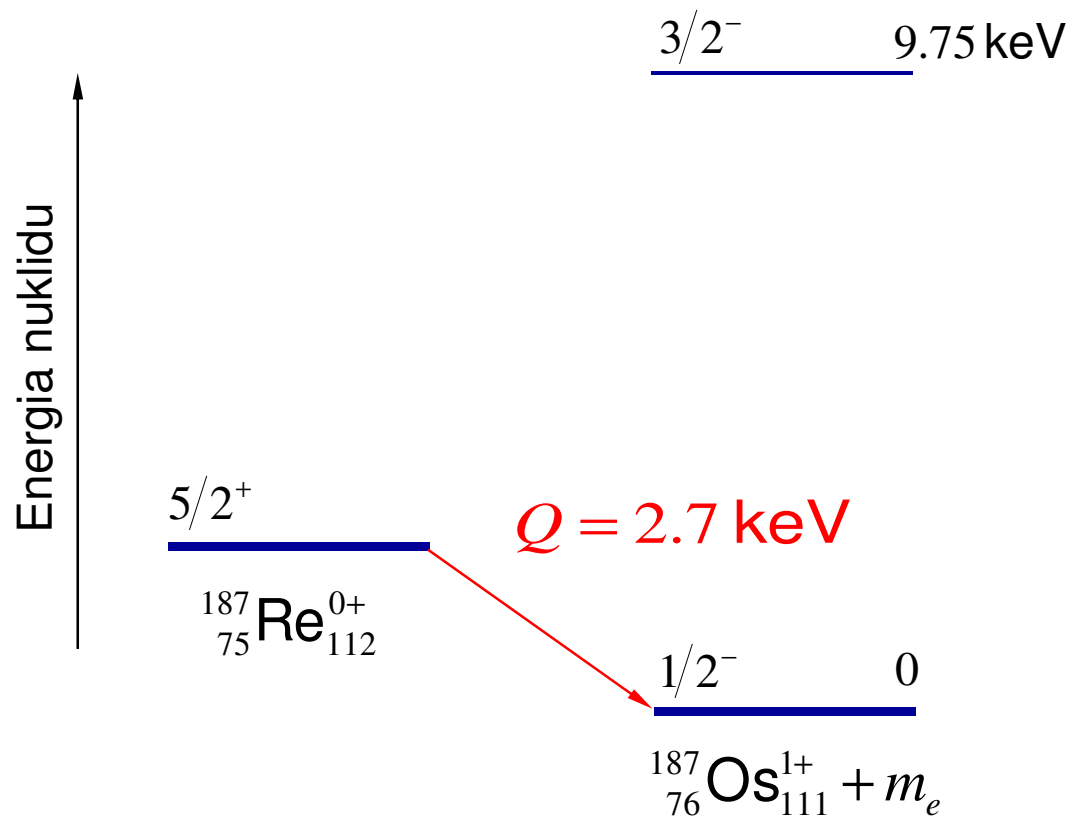
1. Niezwykła przemiana beta, która może zachodzić tylko wtedy, gdy atom pozbawiony jest wszystkich elektronów.
2. Nowy rodzaj promieniotwórczości, który może ujawnić się tylko w nuklidach skrajnie neutrono-deficytowych.

Zwykła przemiana beta



- ▶ Wydzielona energia Q jest unoszona przez elektron i antyneutrino, które uciekają z nuklidu końcowego.
- ▶ Przemiana może zachodzić do różnych stanów jądra końcowego.

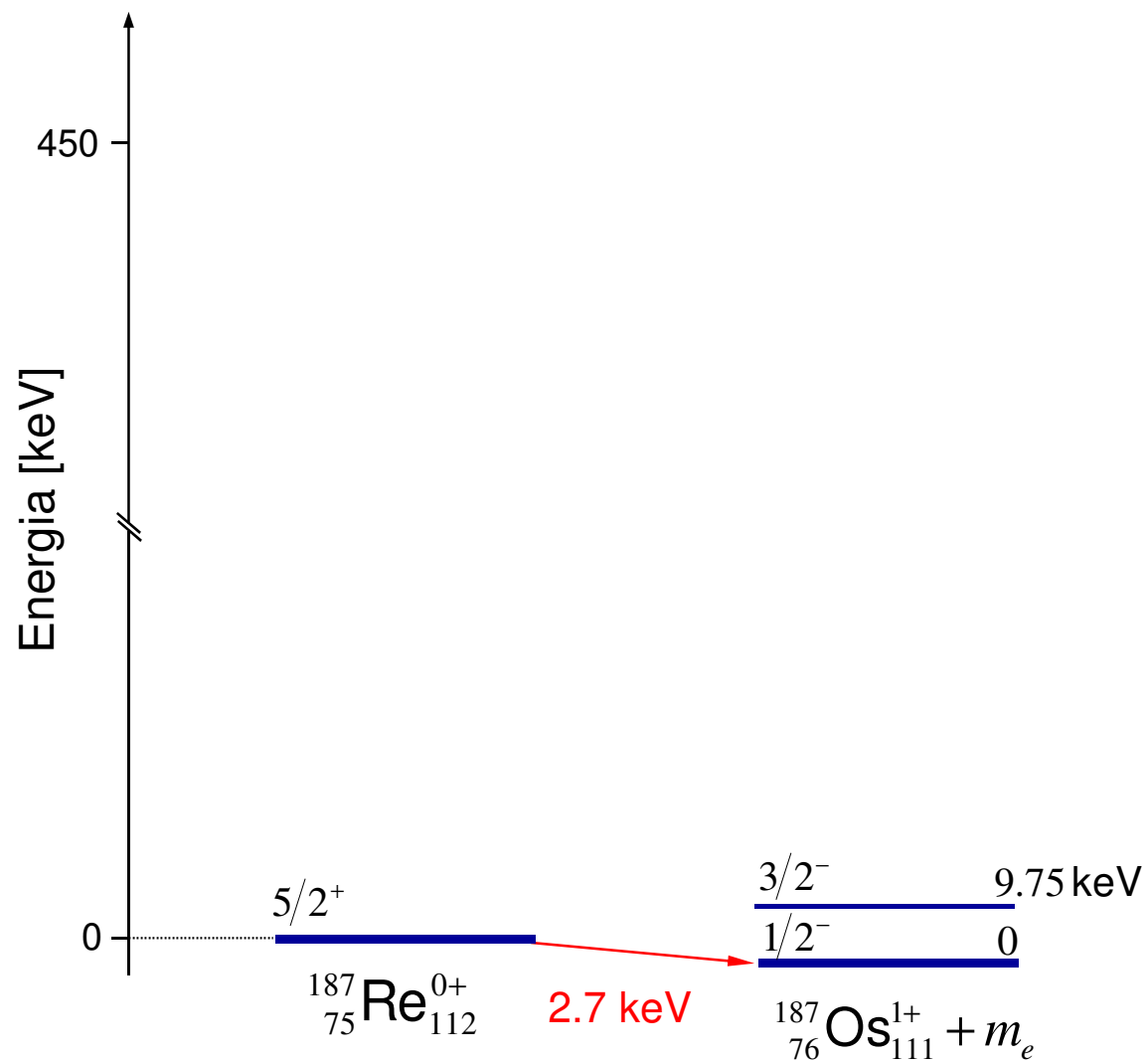
Przypadek ^{187}Re



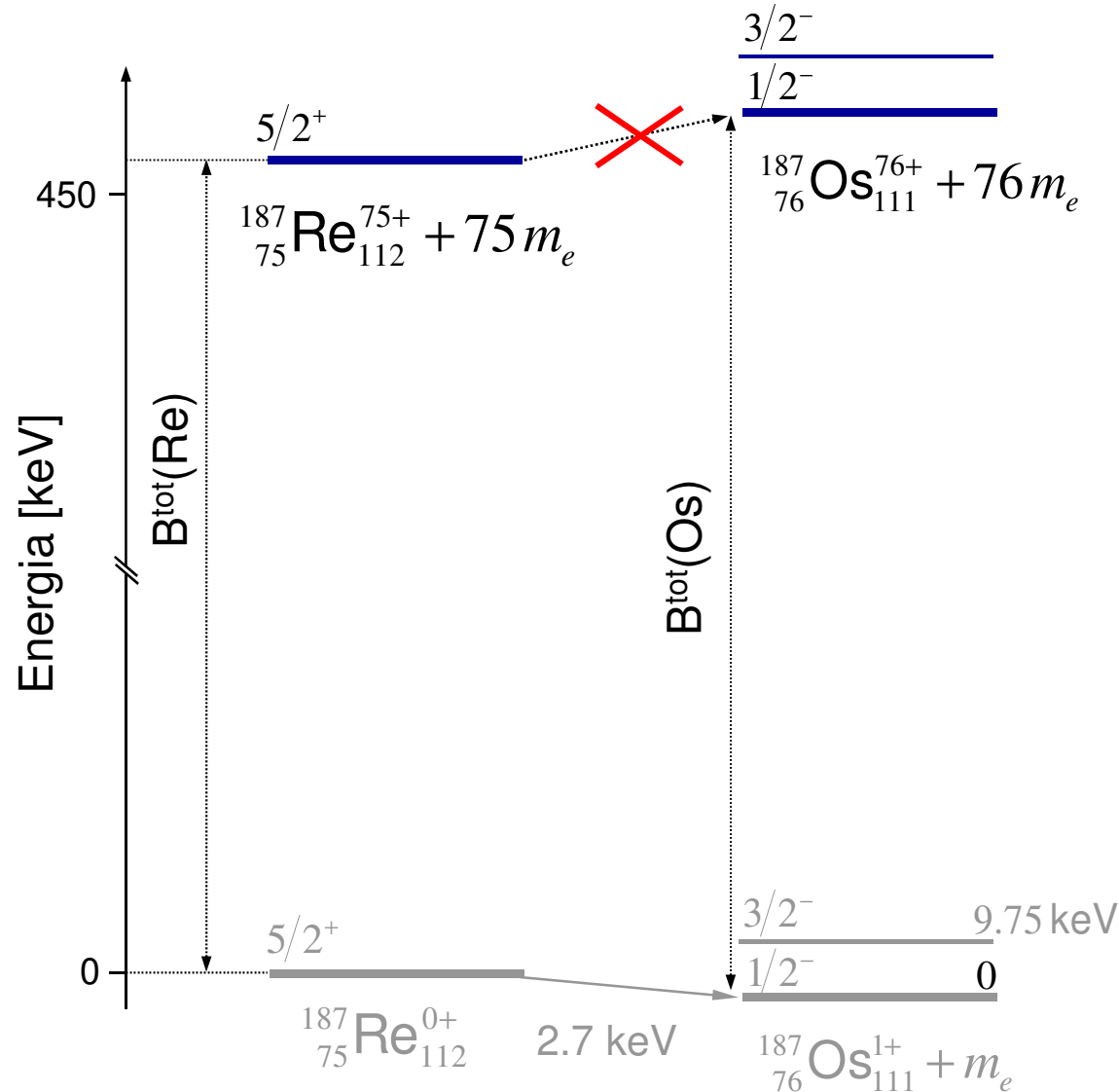
Półokres rozpadu
obojętnego ^{187}Re :
 $T_{1/2} = 42.3 \cdot 10^9 \text{ lat}$

Możliwa przemiana
tylko do stanu pod-
stawowego ^{187}Os

Przemiana zjonizowanego ^{187}Re

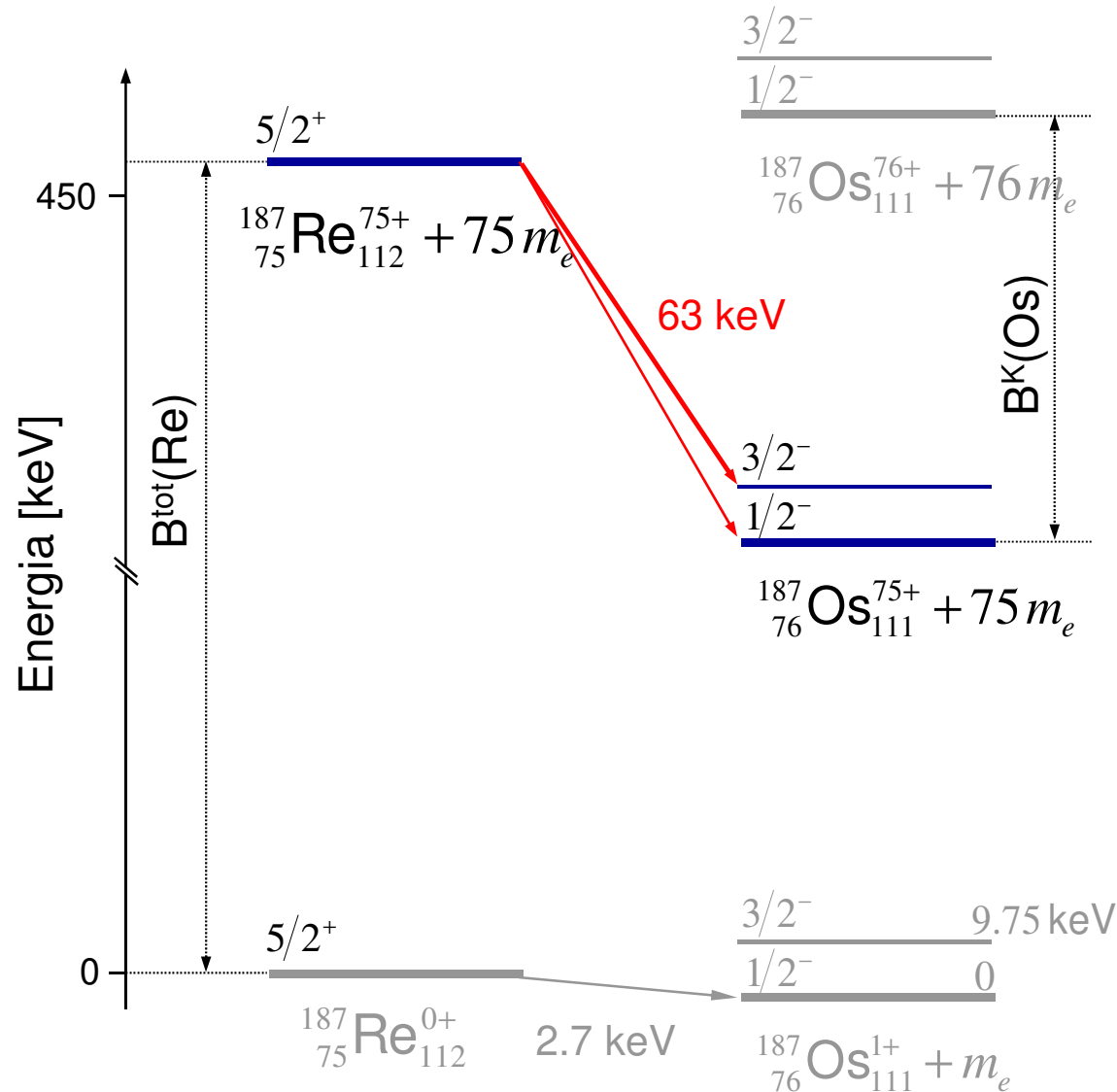


Przemiana zjonizowanego ^{187}Re

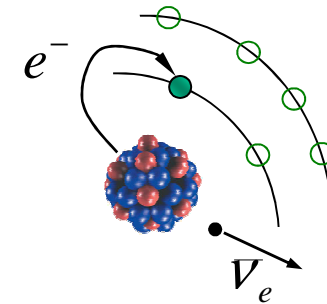


- ▶ Zabieramy wszystkie elektrony orbitalne.
- ▶ Zwykła przemiana β nie jest teraz możliwa !

Przemiana zjonizowanego ^{187}Re

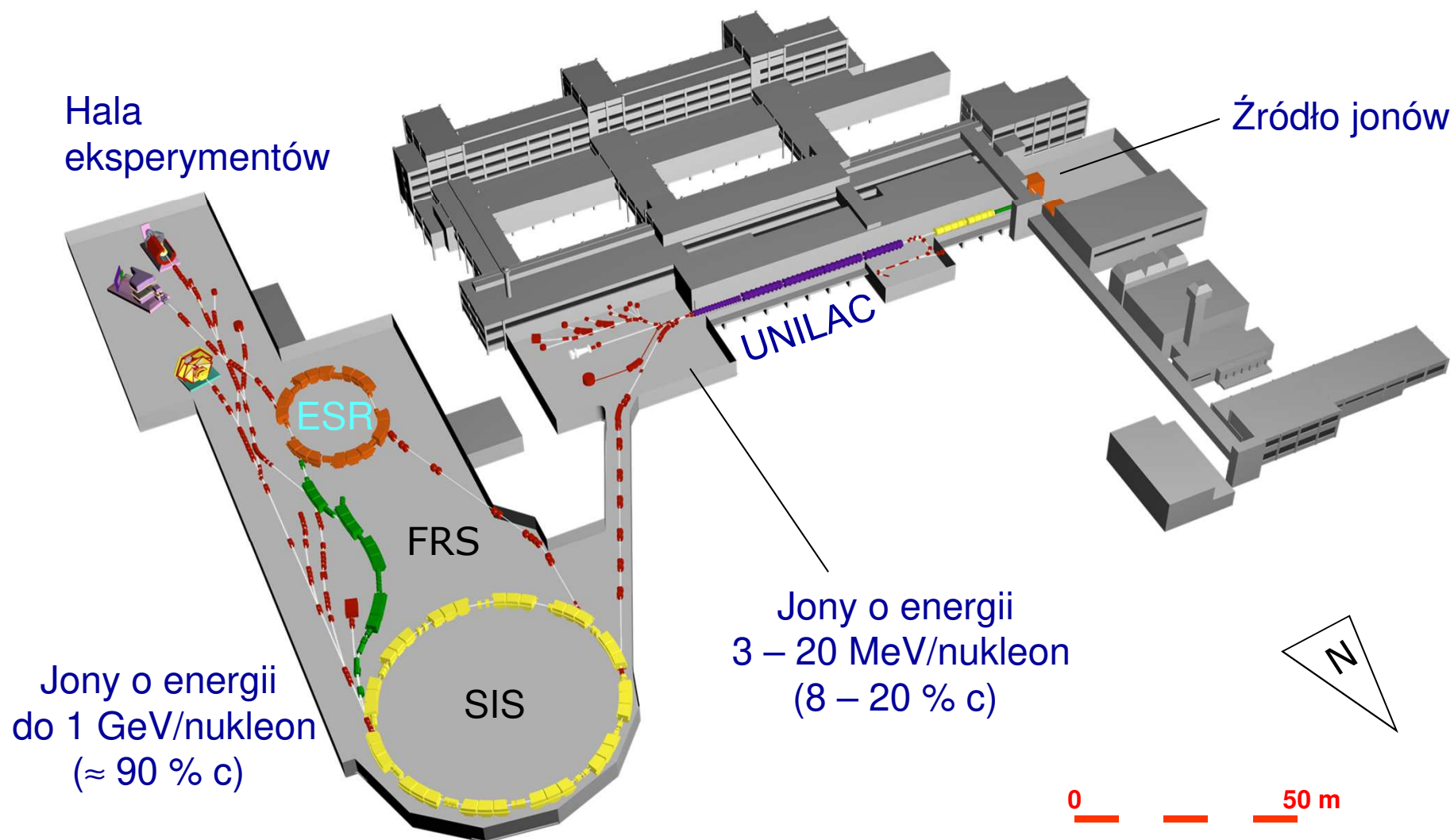


- ▶ Zabieramy wszystkie elektrony orbitalne.
- ▶ Zwykła przemiana β nie jest teraz możliwa !
- ▶ Ale emitowany elektron może zatrzymać się na pustym orbitalu atomowym !

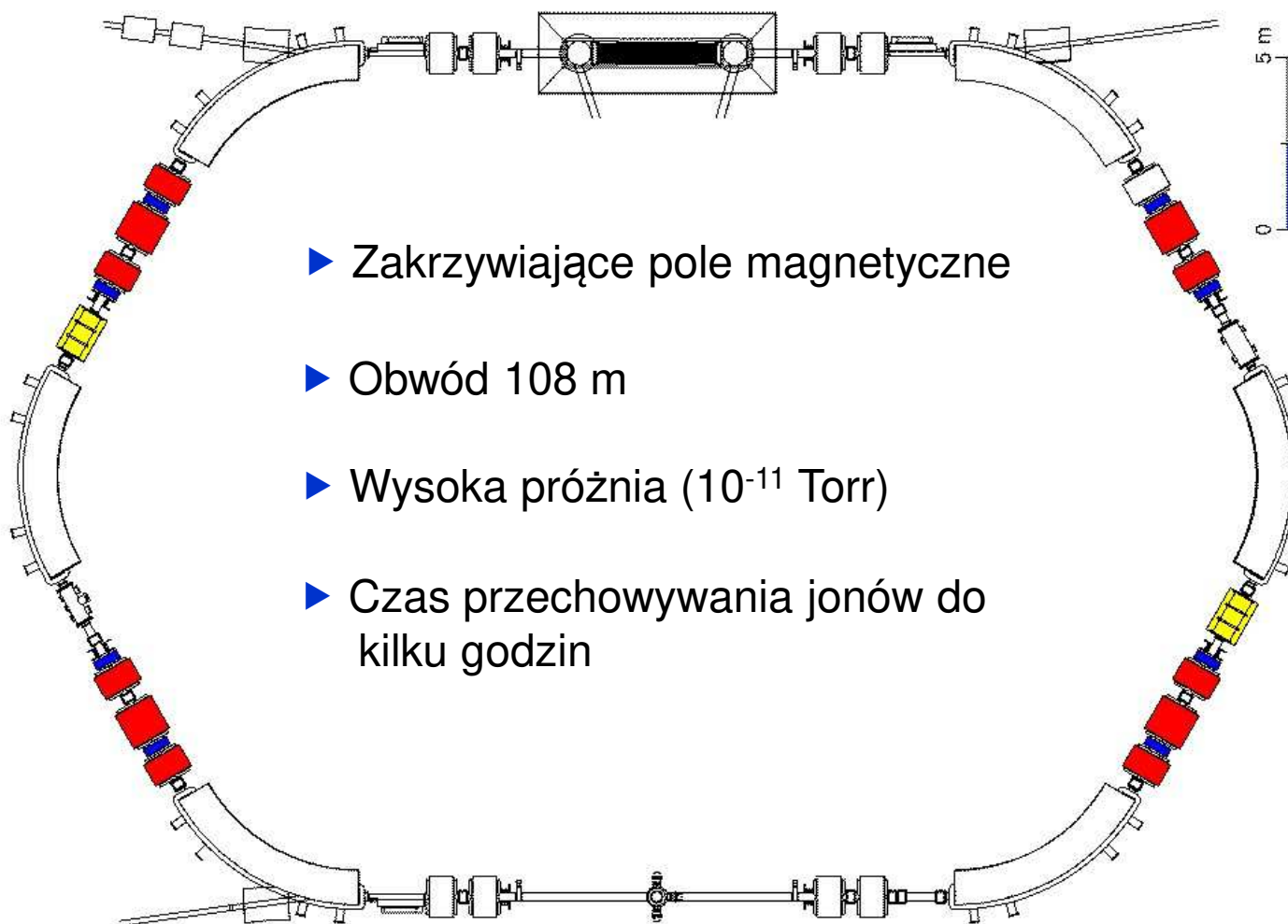


Przemiana beta do stanu związanego

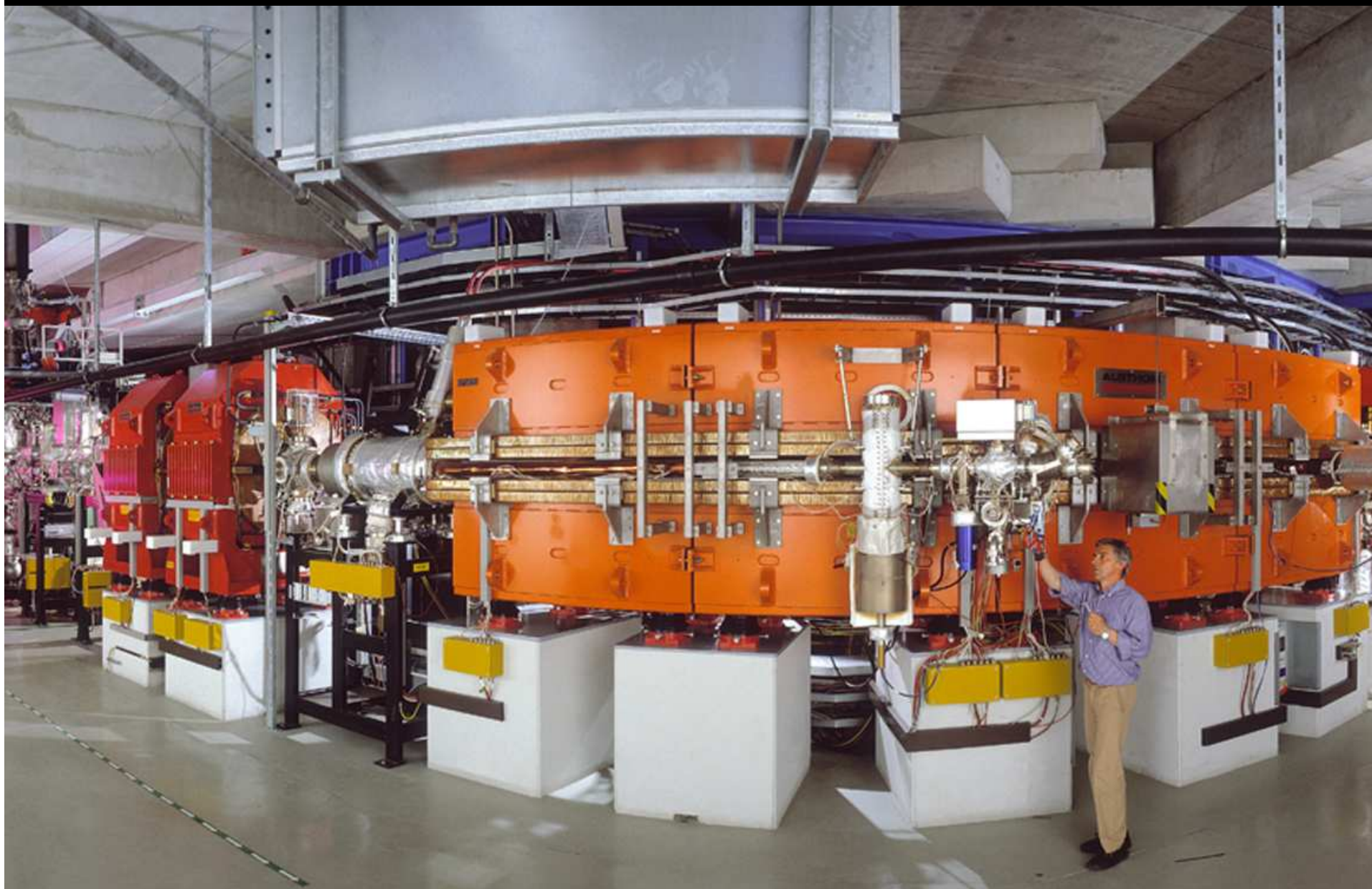
Laboratorium GSI Darmstadt



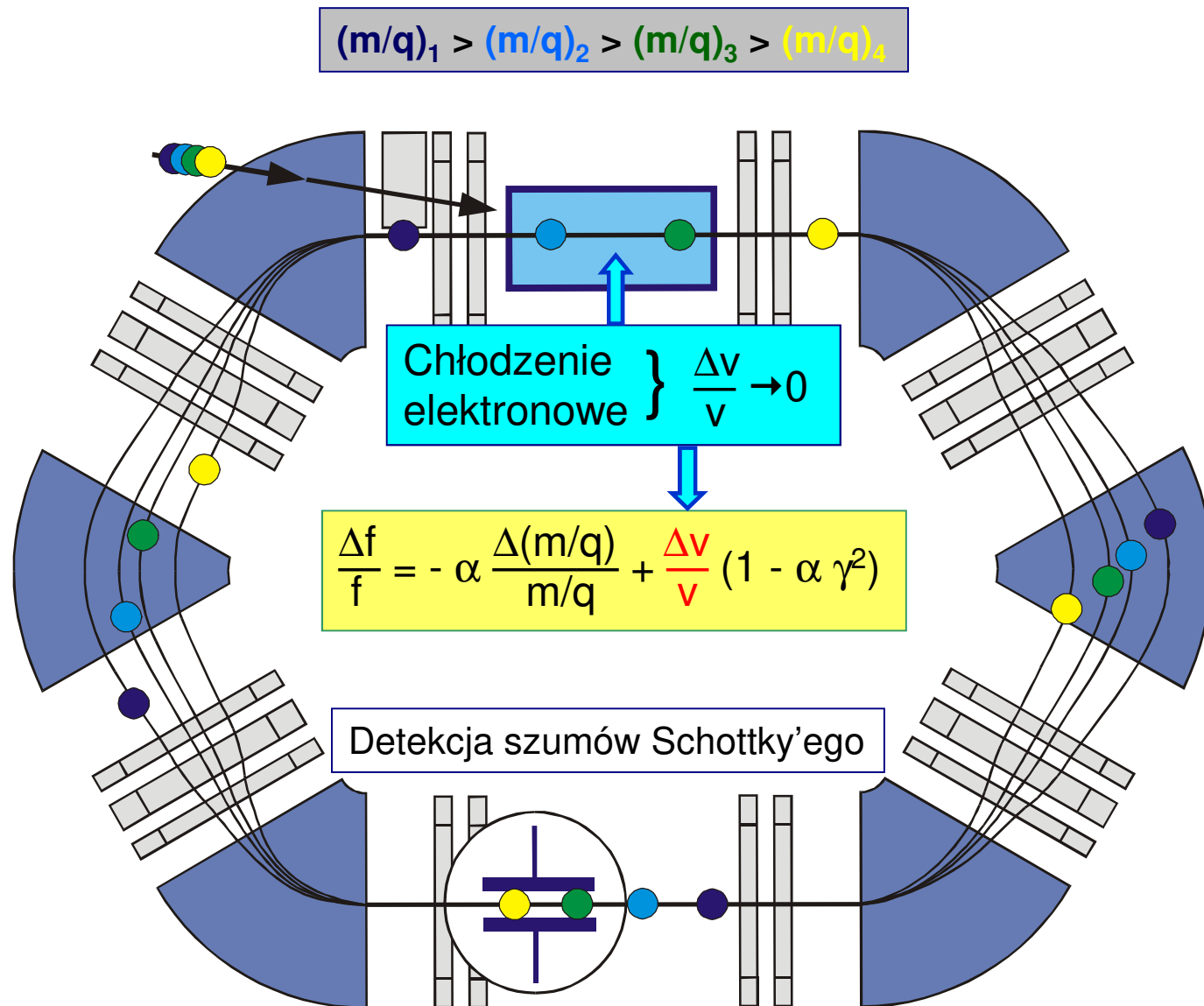
Pierścień kumulacyjny ESR



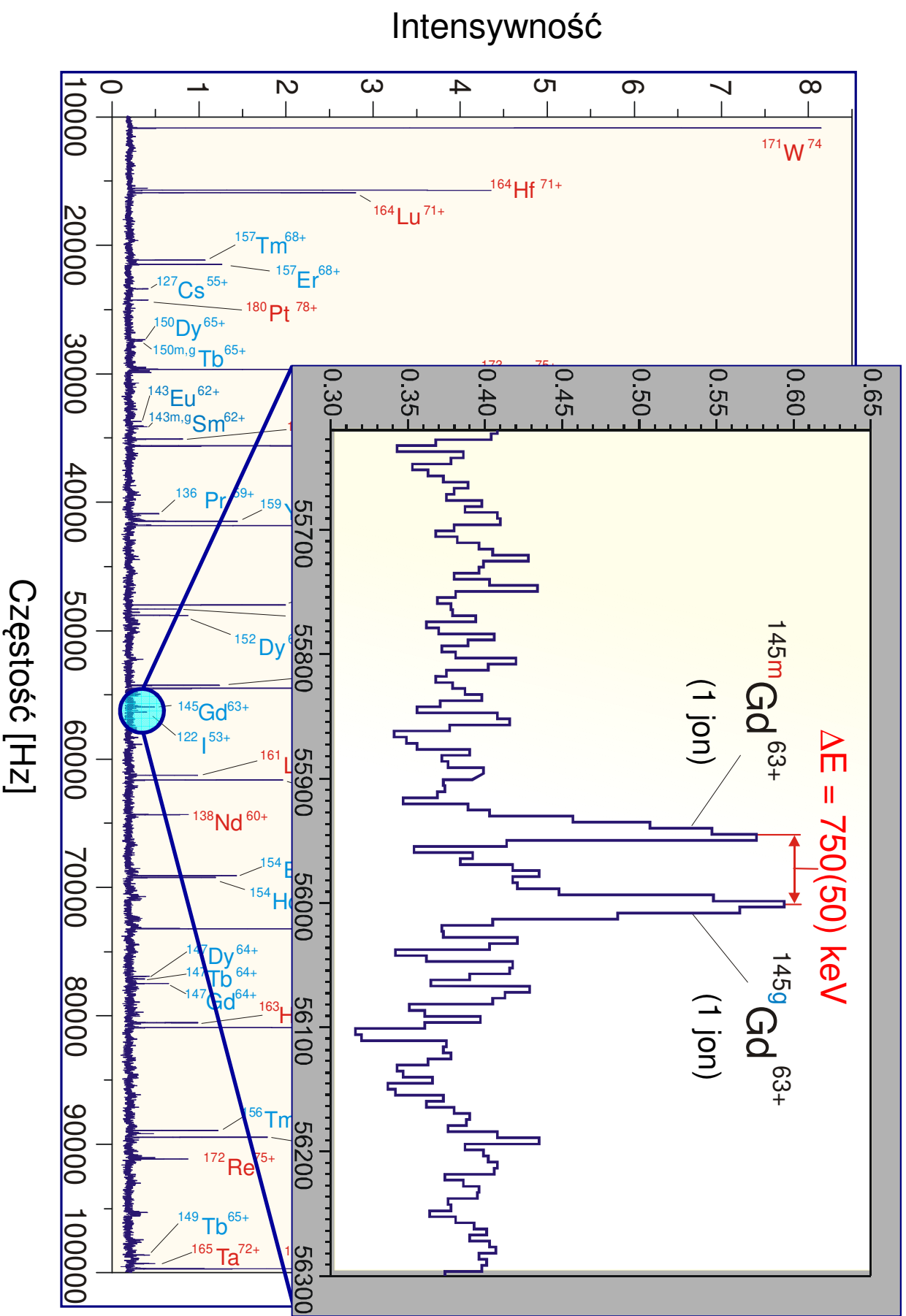
Fragment pierścienia ESR



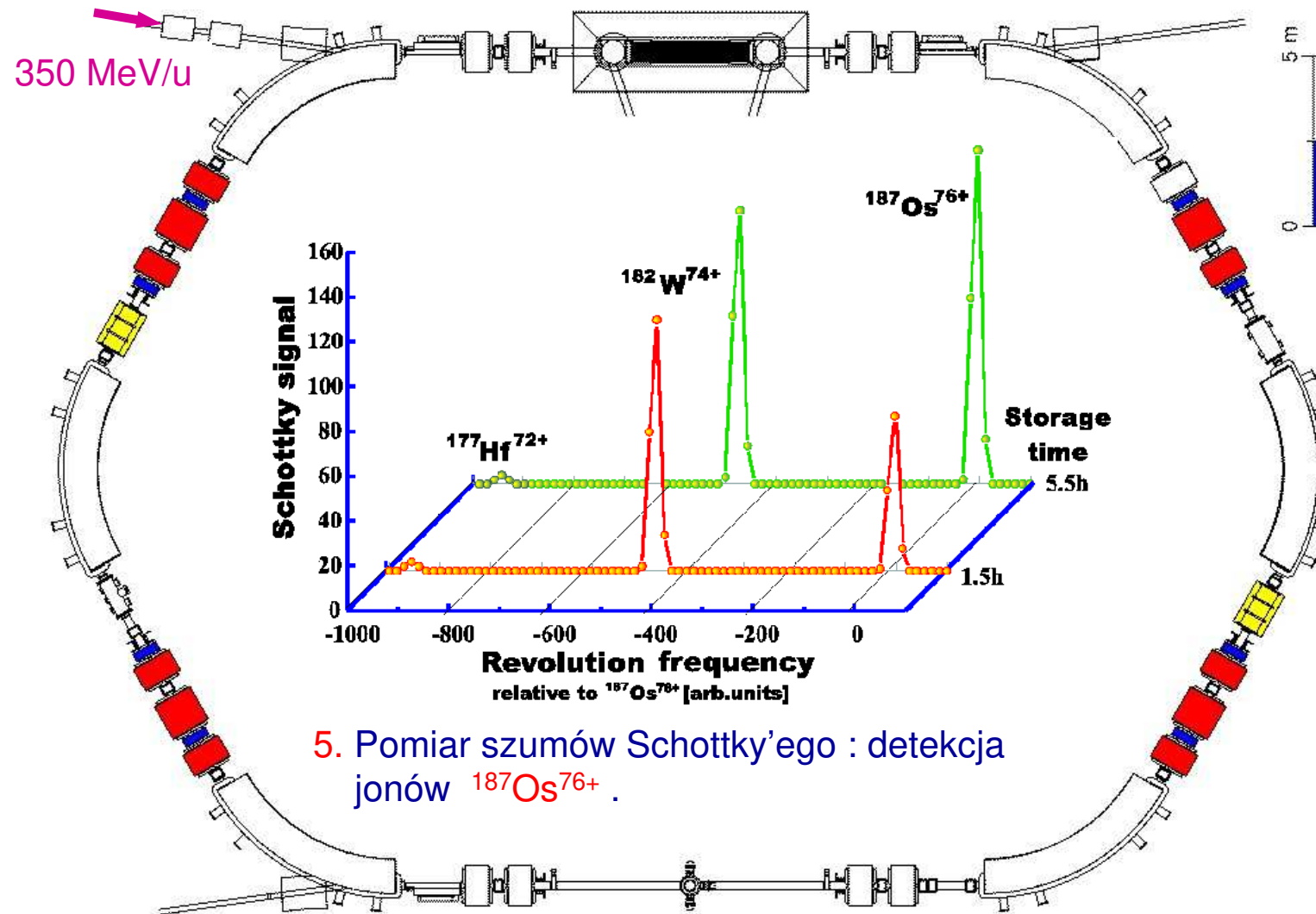
Pomiar m/q w pierścieniu ESR



Przykład widna częstotści szumów

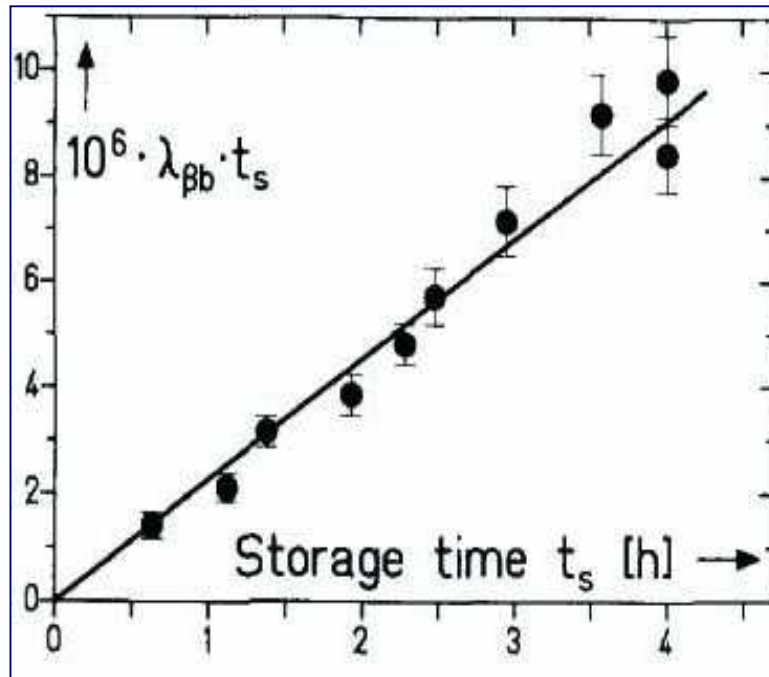


Pomiar ^{187}Re w pierścieniu ESR



Wynik eksperymentu

Liczba jonów $^{187}\text{Os}^{76+}$ w funkcji czasu

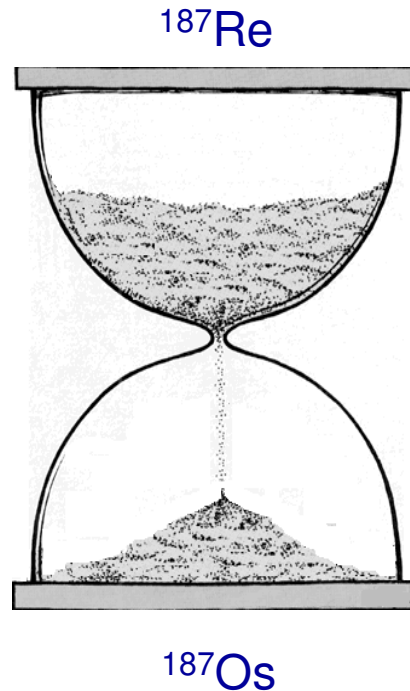


➔ Wniosek :
Półokres rozpadu całkowicie
zjonizowanego ^{187}Re :
 $T_{1/2} = 32.9 \pm 2.0 \text{ lat}$

Półokres rozpadu
obojętnego ^{187}Re :
 $T_{1/2} = 42.3 \cdot 10^9 \text{ lat}$

Jeśli ^{187}Re pozbawimy elektronów, to rozpada się miliard (10^9) razy szybciej !

Kosmiczny zegar



- ▶ Długożyciowe nuklidy, jak ^{187}Re , pomagają wyznaczyć wiek naszej Galaktyki.
- ▶ W trakcie swej historii ^{187}Re mógł znajdować się w warunkach b. wysokiej temperatury (wnętrza gwiazd), gdzie był zjonizowany. Zegar oparty na tym nuklidzie przyspiesza wtedy do 10^9 razy.
- ▶ Efektywne tempo zaniku ^{187}Re zależy od :
 - $T_{1/2}$ w stanie obojętnym i zjonizowanym (fizyka jądrowa),
 - chemicznej ewolucji Galaktyki (astrofizyka).

▶ Obecny stan wiedzy :

$$T_{1/2}^{\text{eff}}(^{187}\text{Re}) \approx 25 \text{ Gy} \rightarrow \text{wiek Galaktyki} : T_G > 12 \text{ Gy}$$

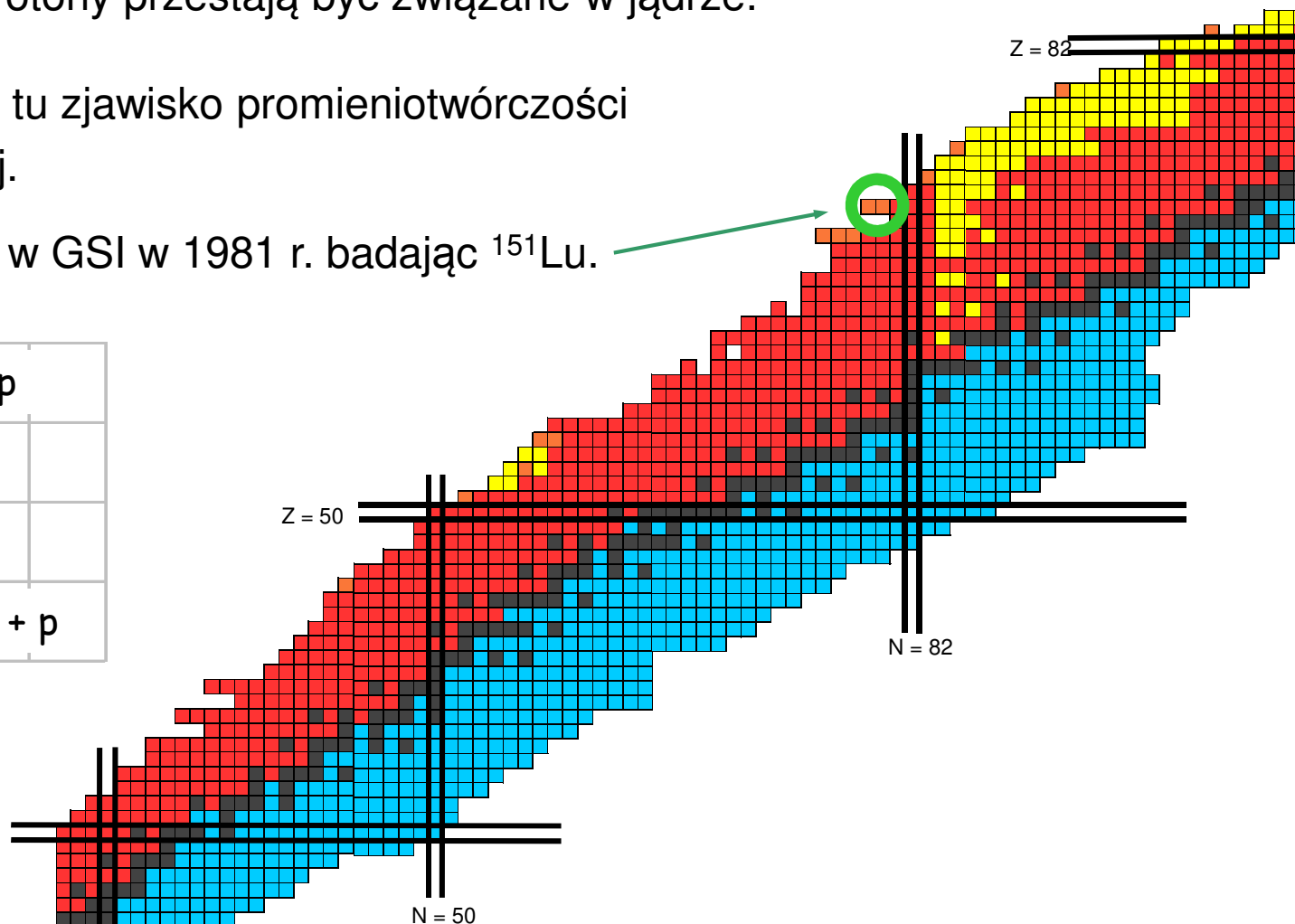
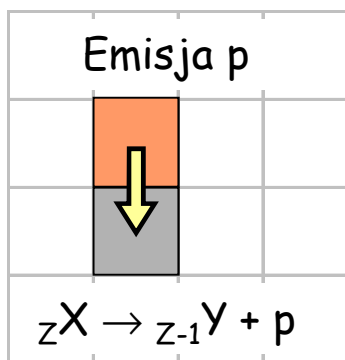
Chwila odprężenia



Na skraju neutrono-deficytowym

Gdy przesuwamy się w stronę malejącej liczby neutronów, osiągamy tzw. linię odpadania protonu, poza którą protony przestają być związane w jądrze.

- ▶ Występuje tu zjawisko promieniotwórczości protonowej.
- ▶ Odkryto je w GSI w 1981 r. badając ^{151}Lu .

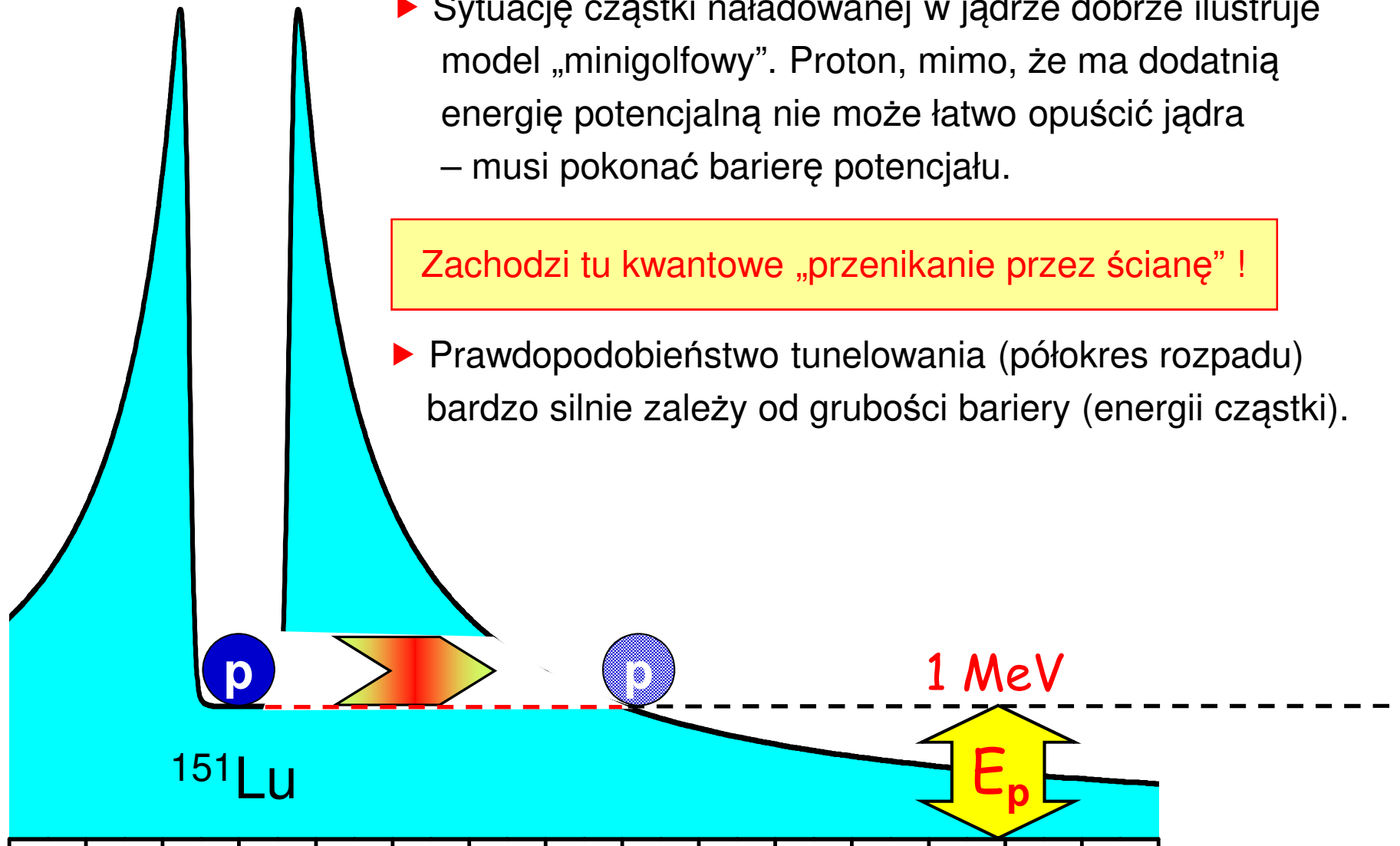


Model „minigolfowy”

- ▶ Sytuację cząstki naładowanej w jądrze dobrze ilustruje model „minigolfowy”. Proton, mimo, że ma dodatnią energię potencjalną nie może łatwo opuścić jądra – musi pokonać barierę potencjału.

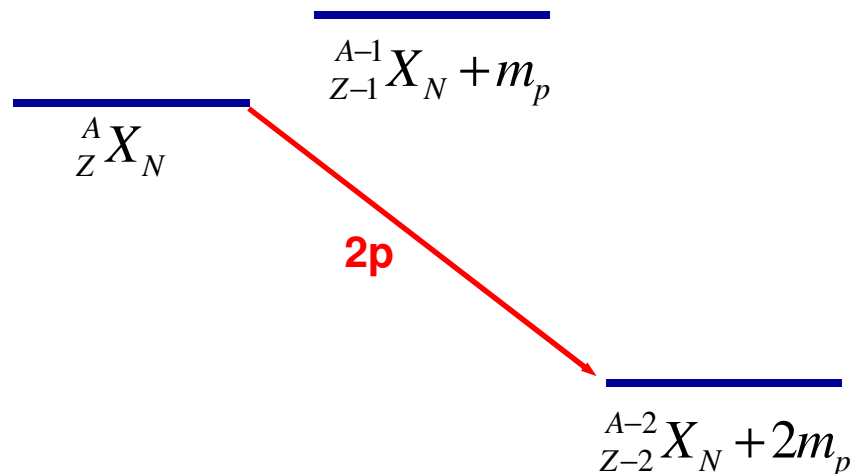
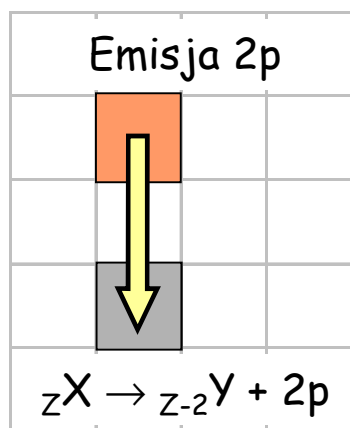
Zachodzi tu kwantowe „przenikanie przez ścianę” !

- ▶ Prawdopodobieństwo tunelowania (półokres rozpadu) bardzo silnie zależy od grubości bariery (energii cząstki).



Promieniotwórczość dwuprotonowa

W 1960 r. przewidziano możliwość przemiany, w której z jądra wyrzucane są jednocześnie dwa protony. Należy jej 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 : ${}^{45}\text{Fe}$, ${}^{48}\text{Ni}$, ${}^{54}\text{Zn}$.

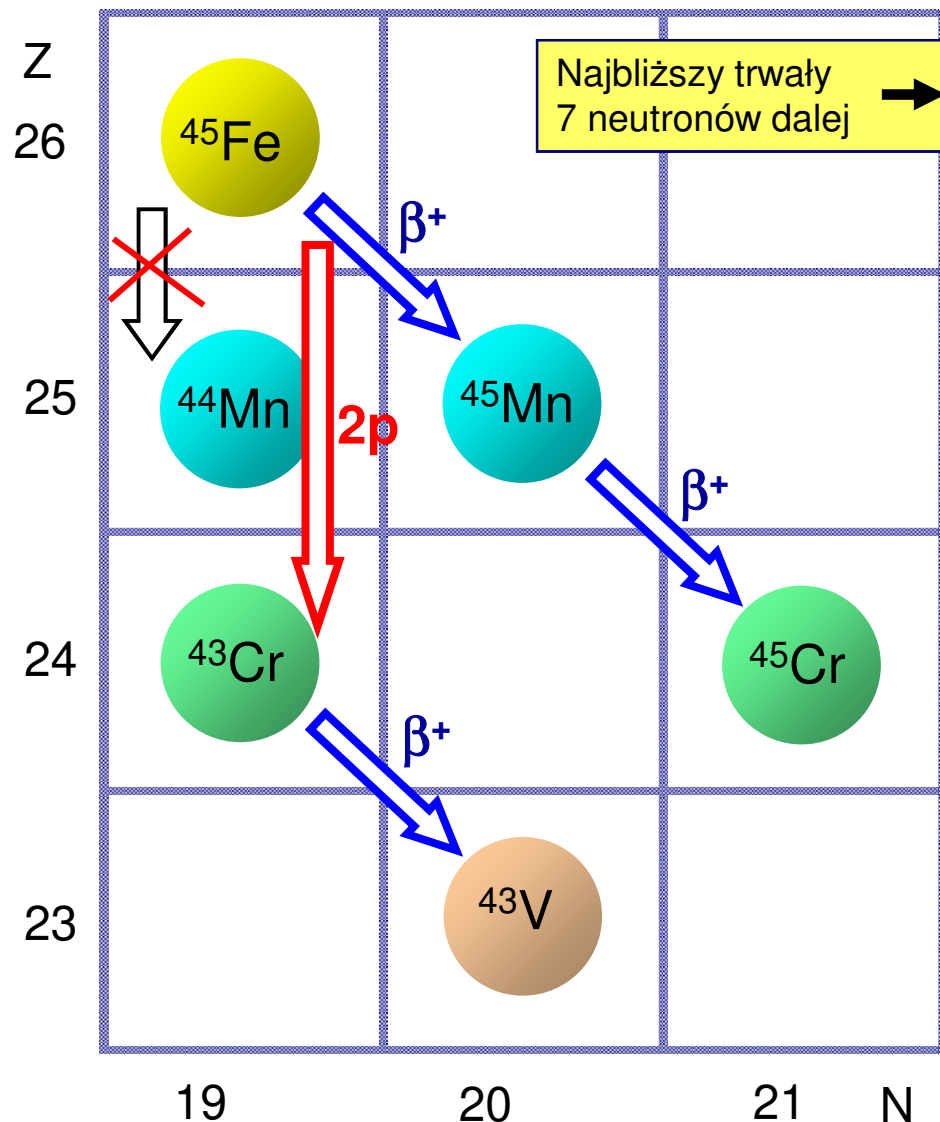
Jak rozpada się ^{45}Fe ?

Aby doszło do emisji $2p$ oba protony muszą przetunelować przez barierę zanim zajdzie przemiana β^+

$\rightarrow 1 \mu\text{s} < T_{2p} < 10 \text{ ms}$; $E_{2p} \approx 1 \text{ MeV}$

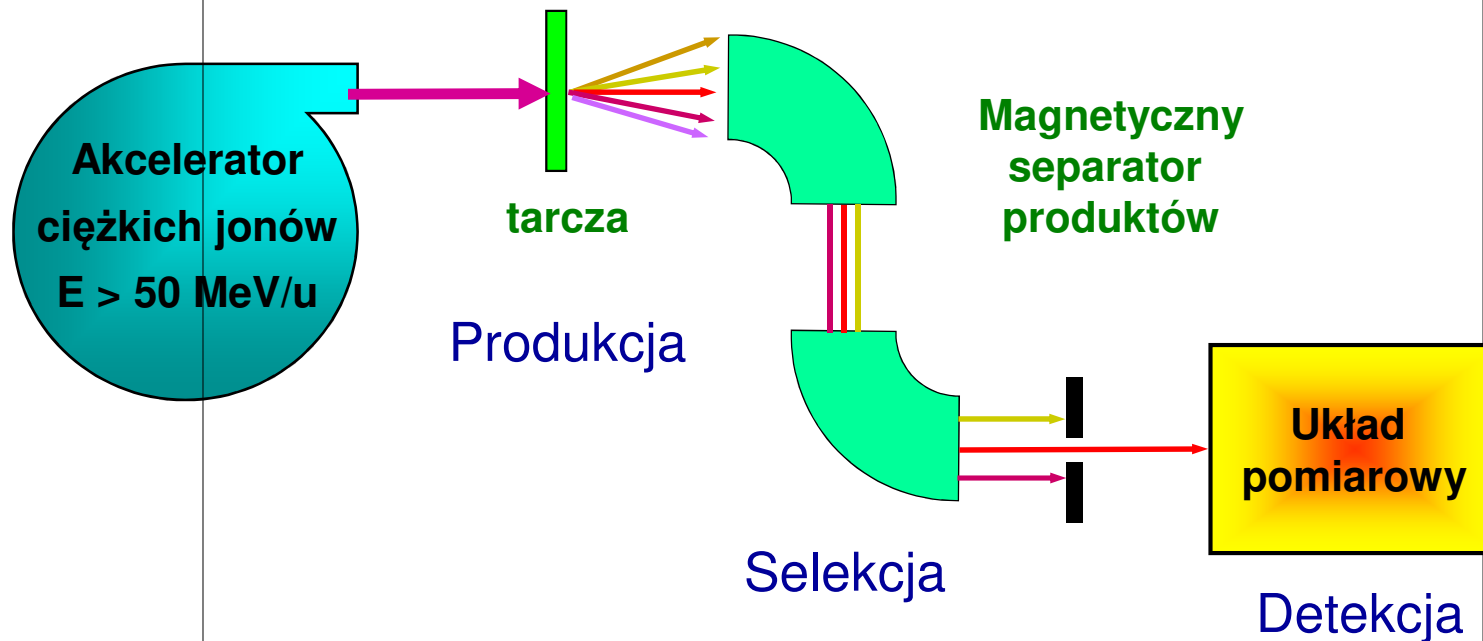
Wyzwanie dla eksperymentu

- 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^+ .



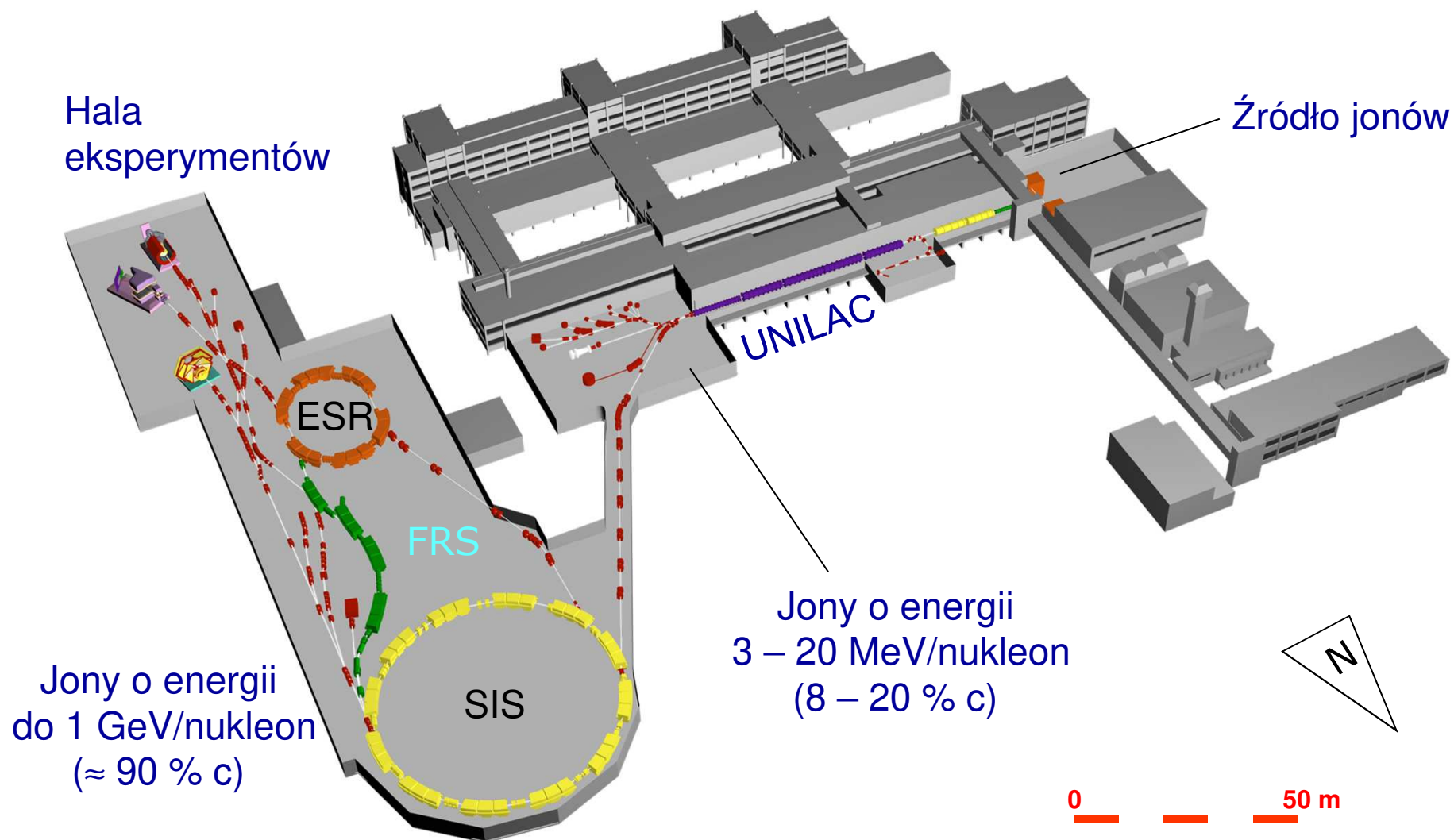
Jak dobrać się do nuklidów na skraju mapy ?

Metoda fragmentacji ciężkich jonów

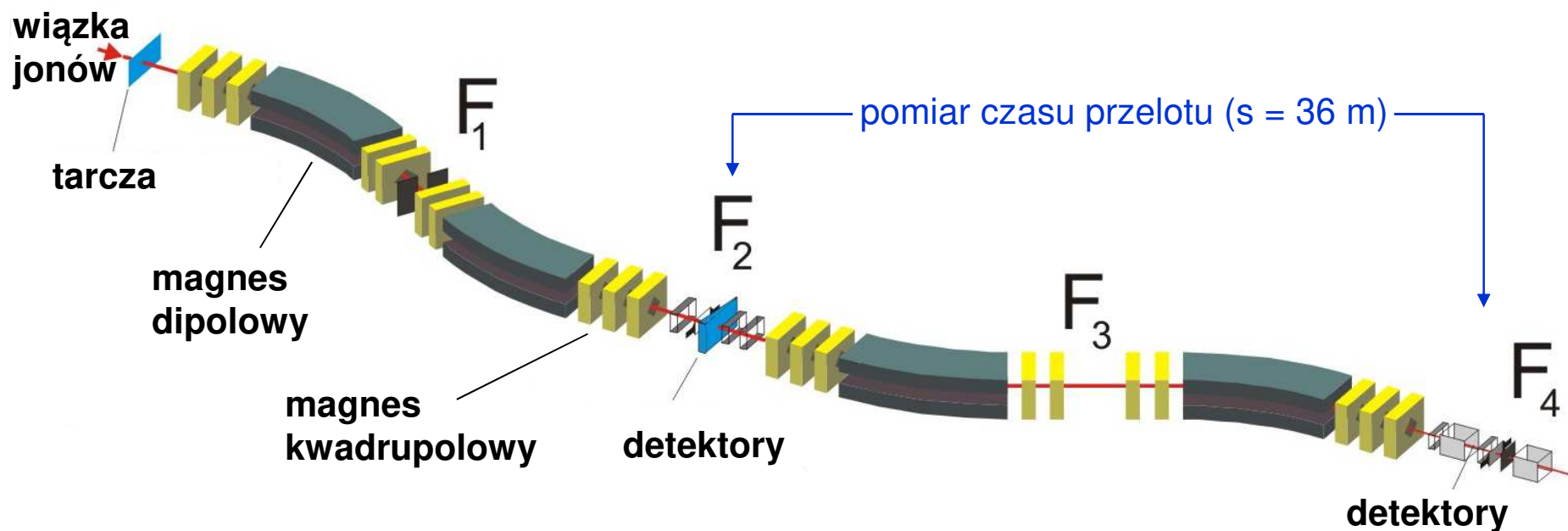


► Każdy jon wychodzący z separatora jest identyfikowany w locie !

Laboratorium GSI Darmstadt

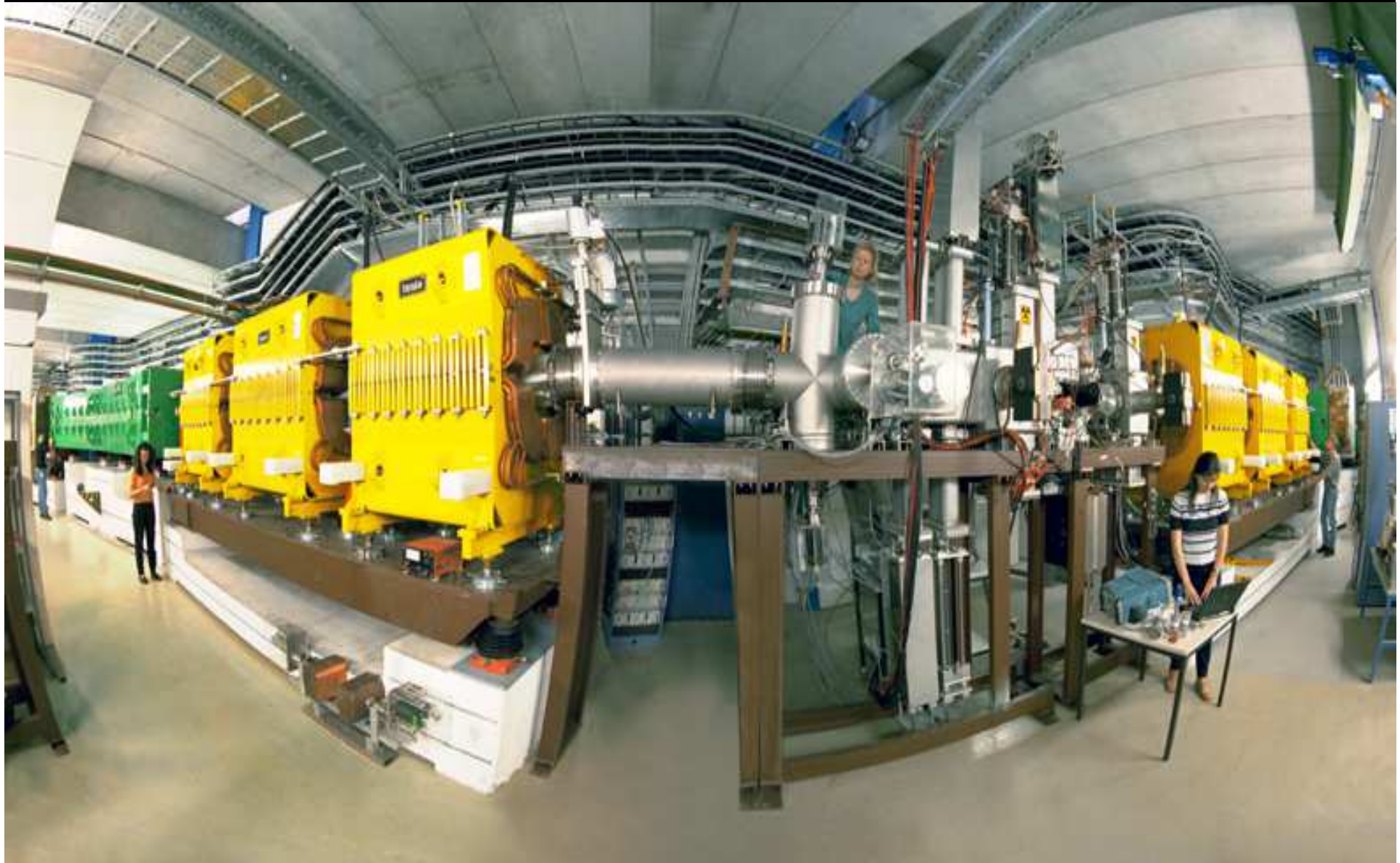


FRS : separator fragmentów w GSI



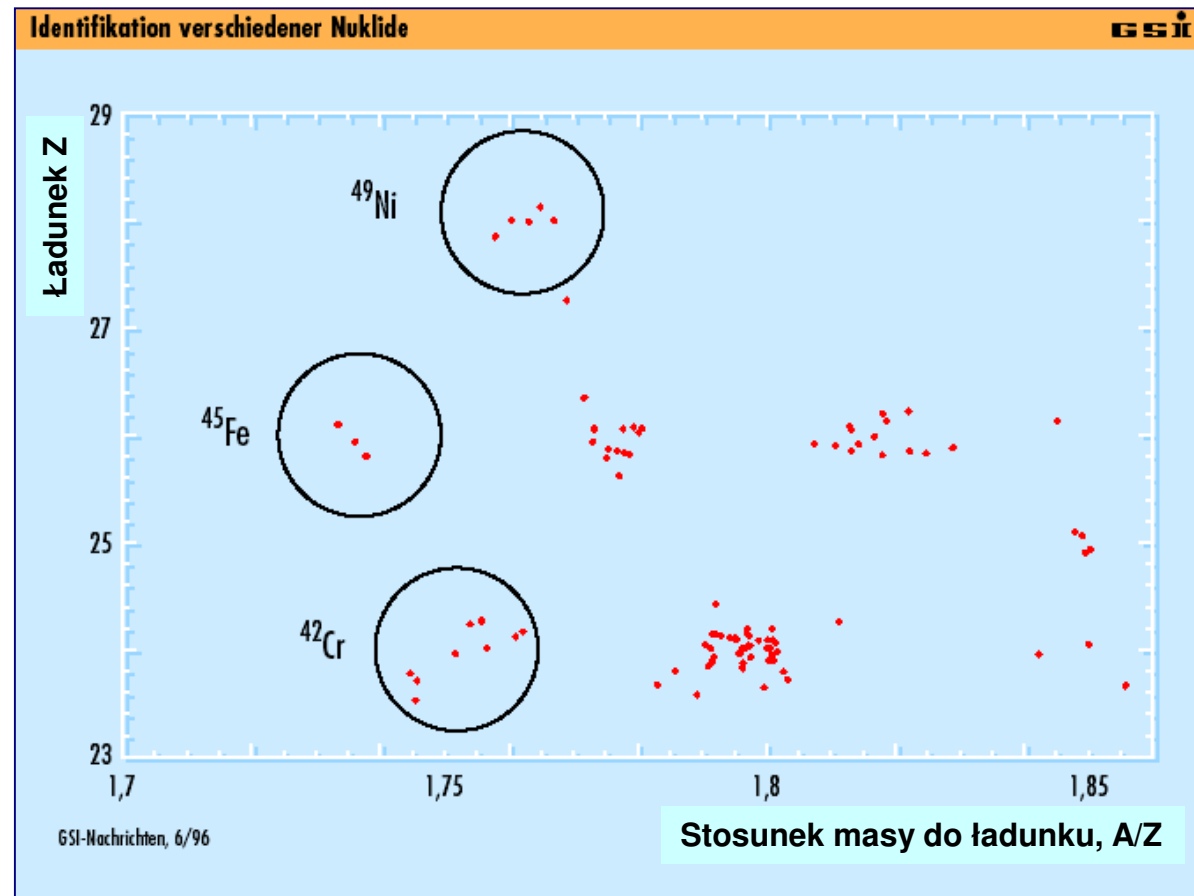
Czas przelotu jonu $\rightarrow v$
Tor lotu + pole B $\rightarrow B\rho$ } $\rightarrow A/q \approx \mathbf{A/Z}$
Strata energii ΔE w komorze jonizacyjnej $\rightarrow \mathbf{Z}$

Separator FRS

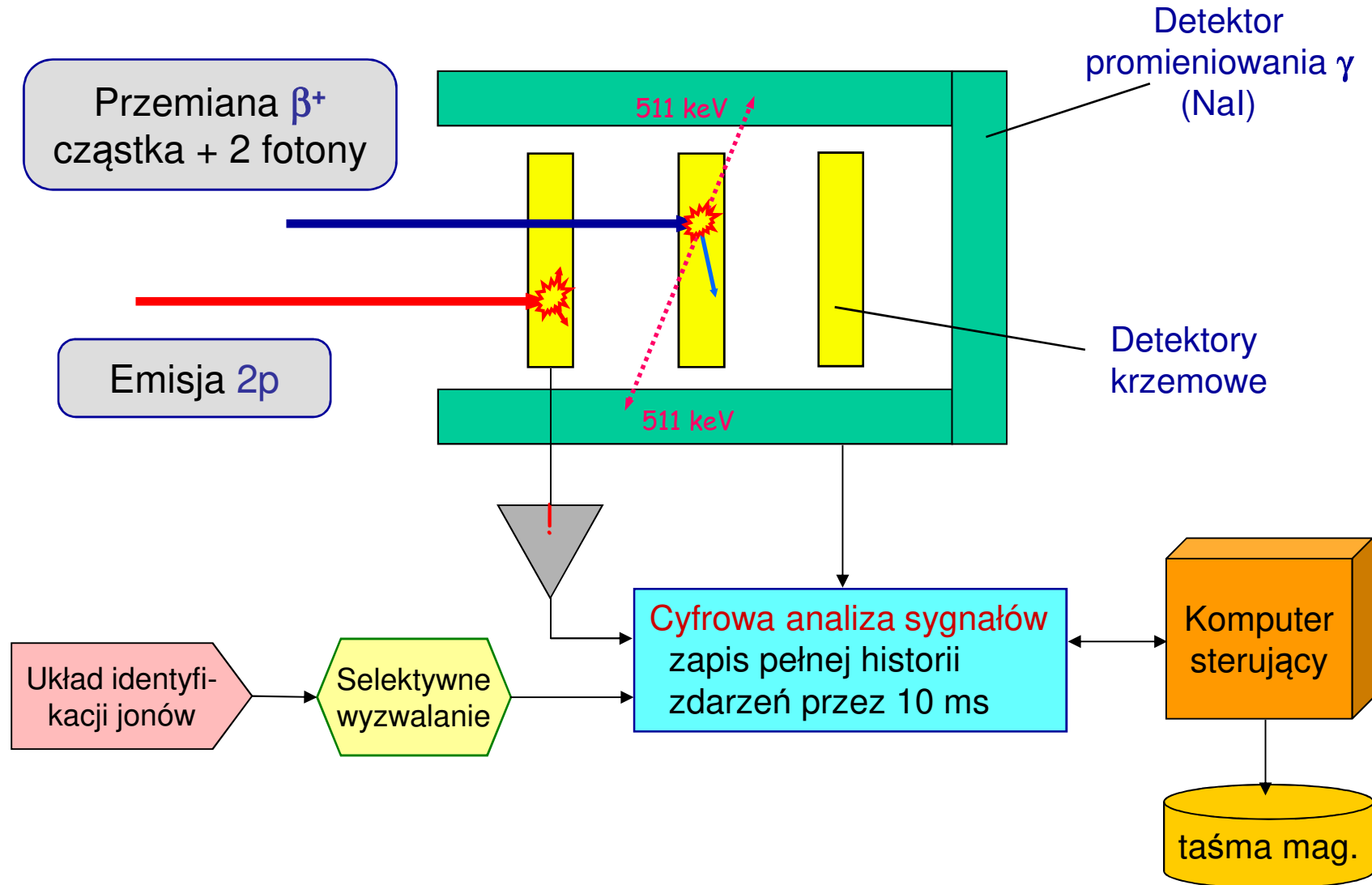


Przykład identyfikacji jonów

Pierwsza obserwacja trzech nowych nuklidów : ^{42}Cr , ^{45}Fe i ^{49}Ni .
GSI, 1996.



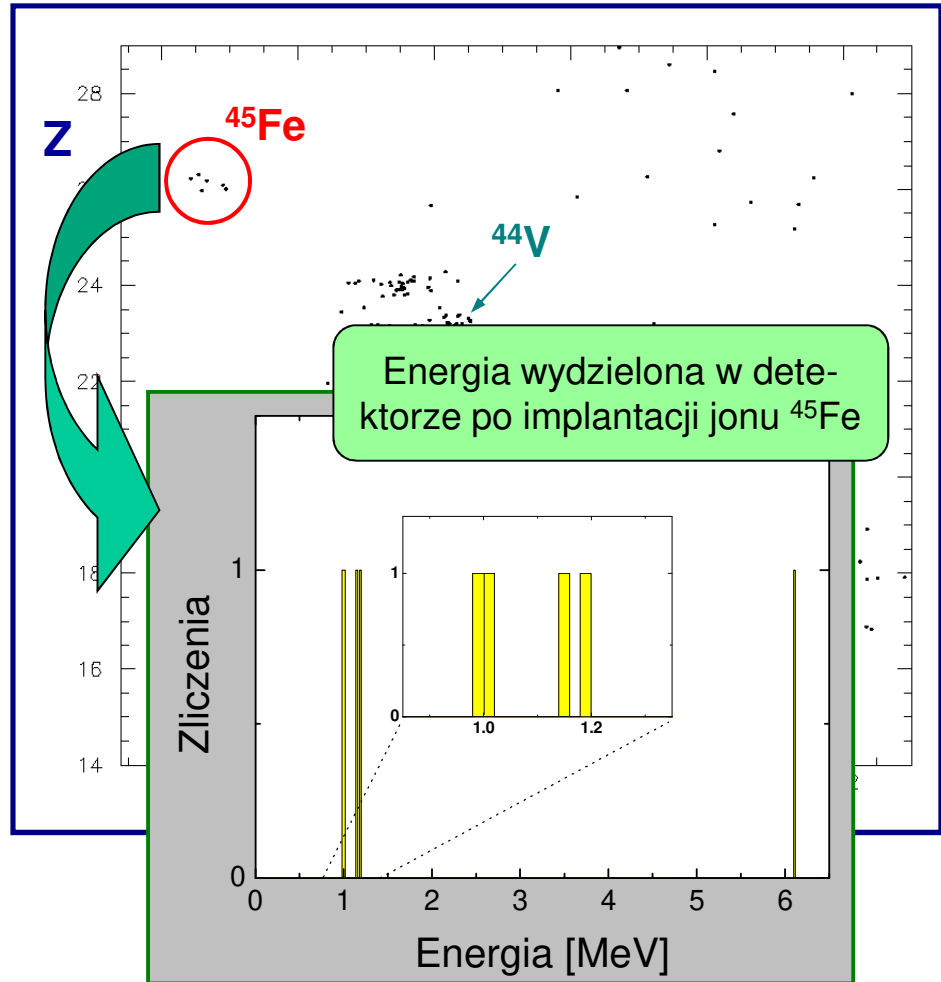
Detekcja rozpadu ^{45}Fe



Wyniki eksperymentu w GSI

- Lipiec 2001 : 5 dni pomiaru
- Fragmentacja jonów
 ^{58}Ni , $E = 650 \text{ MeV/u}$
- Separator FRS $\rightarrow$ 6 jonów ^{45}Fe
- Zaobserwowano 5 skorelowanych rozpadów:
 - ▶ 4 zdarzenia : $E \approx 1 \text{ MeV}$ (bez γ)
 - ▶ 1 przypadek : $E \approx 10 \text{ MeV} + \gamma$
- Interpretacja : emisja 2p jest głównym (80%) sposobem rozpadu ^{45}Fe

$$E_{2p} = 1.1(1) \text{ MeV}$$
$$T_{1/2} = 3.4^{+3.4}_{-1.1} \text{ ms}$$



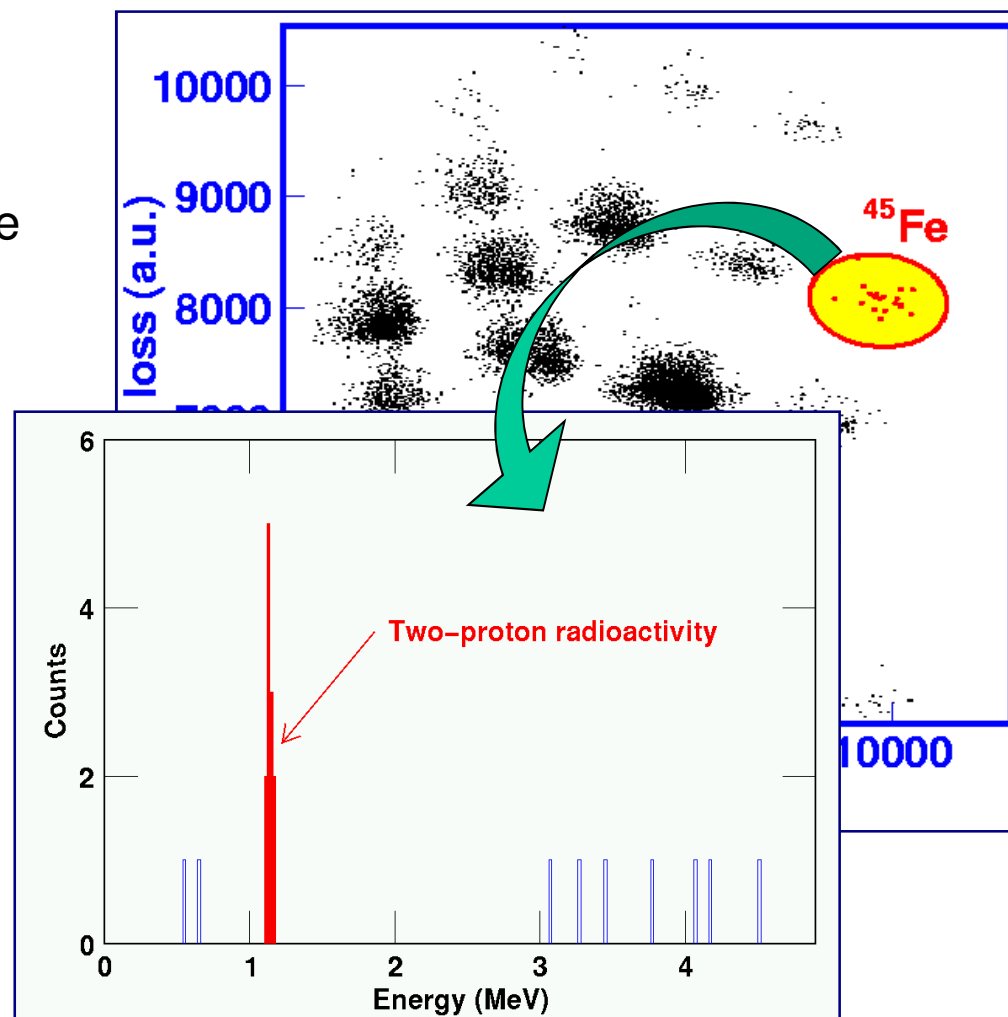
Eksperyment w GANIL (Francja)

- Lipiec 2000 : 36 godz. pomiaru
- Fragmentacja jonów :
 ^{58}Ni , $E = 75 \text{ MeV/u}$
- Separator LISE $\rightarrow$ 22 jonów ^{45}Fe
- Zaobserwowano :
 - ▶ 12 zliczeń w wąskim piku
 - ▶ żadnych cząstek β i γ w koincydencji

$\rightarrow$ Potwierdzenie wyniku z GSI

$$E_{2p} = 1.14(5) \text{ MeV}$$

$$T_{1/2} = 4.7^{+3.4}_{-1.4} \text{ ms}$$



Czy na pewno 2p ?

W eksperymencie zmierzaliśmy tylko sumaryczną energię wydzieloną w przemianie. Skąd wiemy, że była to emisja 2p ? Nie zarejestrowaliśmy przecież tych dwu cząstek oddzielnie.

- ▶ Wykorzystujemy dotychczasową wiedzę i obliczenia teoretyczne.

Hipotezy alternatywne :

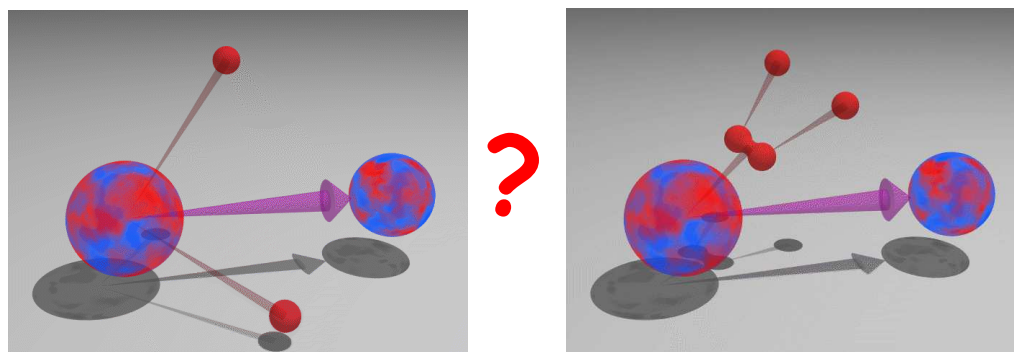
- ▶ Emisja jednego protonu $\rightarrow E_p = 1 \text{ MeV} : T_{1/2} < 1 \times 10^{-15} \text{ s} .$
- ▶ Emisja cząstki $\alpha \rightarrow E_p = 1 \text{ MeV} : T_{1/2} \approx 10^{10} \text{ s} .$
- ▶ Przemiana $\beta^+ \rightarrow$ prawdopodobieństwo ucieczki fotonów $\gamma : \approx 10^{-5}$,
przewidywana energia $\approx 10 \text{ MeV}$.

Przewidywanie dla emisji 2p :

- ▶ Obliczona energia rozpadu : $1.15 \pm 0.09 \text{ MeV}$.

Następne kroki

- ▶ Poszukiwanie innych nuklidów podlegających rozpadowi 2p.
- ▶ Konieczna jest detekcja obydwu emitowanych protonów oddzielnie i określenie korelacji między nimi (np. rozkładu kątów).
- ▶ Pytanie fizyczne :
czy oba protony uciekają niezależnie od siebie,
czy też tworzą wirtualną cząstkę (diproton) na czas przejścia
przez barierę potencjału ?



Podsumowanie

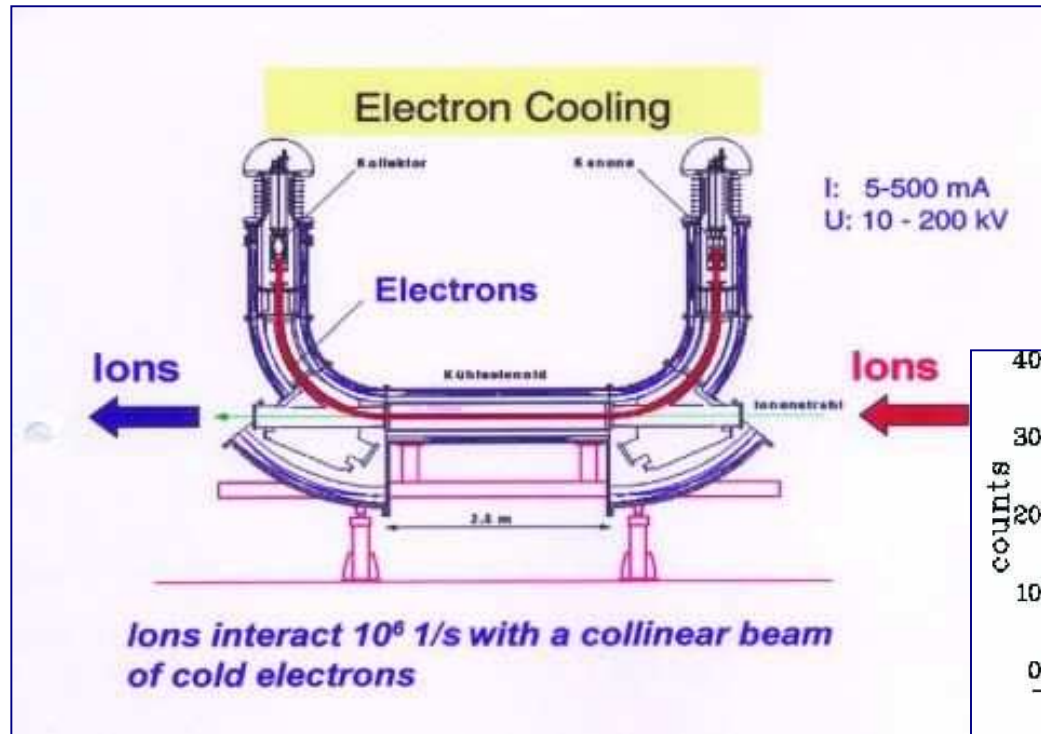
- ▶ Przyspieszanie ciężkich jonów do dużych energii (> 50 MeV/nukleon) otworzyło nowe kierunki badań.
- ▶ Dzięki nowoczesnym urządzeniom (separator, pierścień kumulacyjny) można wytwarzać i badać z wielką czułością (pojedyncze atomy !), m.in.:
 - wysoko zjonizowane atomy ciężkich pierwiastków,
 - nuklidy b. dalekie od trwałości.
- ▶ Jako ilustrację nowych metod doświadczalnych przedstawiłem dwa ważne wyniki uzyskane w GSI Darmstadt :
 - rozpad beta do stanu związanego,
 - promieniotwórczość dwuprotonową.
- ▶ Przykłady innych osiągnięć :
 - identyfikacja > 100 nowych izotopów,
 - pomiar mas kilkuset nuklidów dalekich od trwałości,
 - testowanie QED w silnym polu E.
- ▶ Podobne techniki badawcze stosuje się też w laboratoriach :
 - GANIL w Caen (Francja),
 - RIKEN k/Tokio (Japonia),
 - NSCL w East Lansing (USA).

Planowana rozbudowa GSI

Projekt zatwierdzony do realizacji → <http://www.gsi.de>

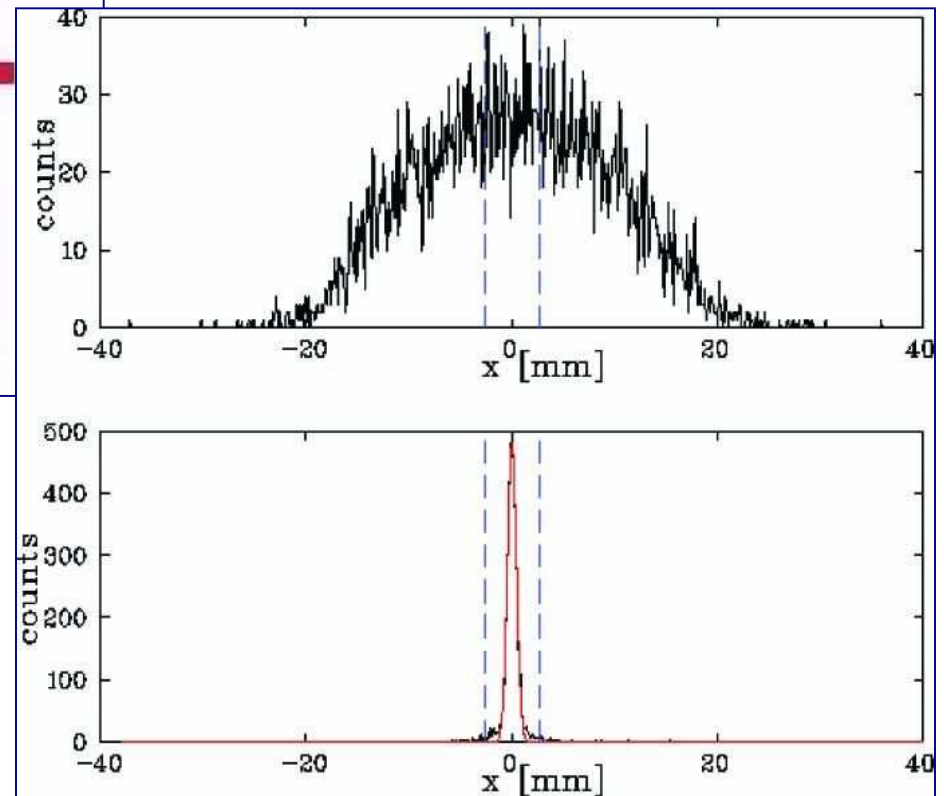


Chłodzenie elektronami

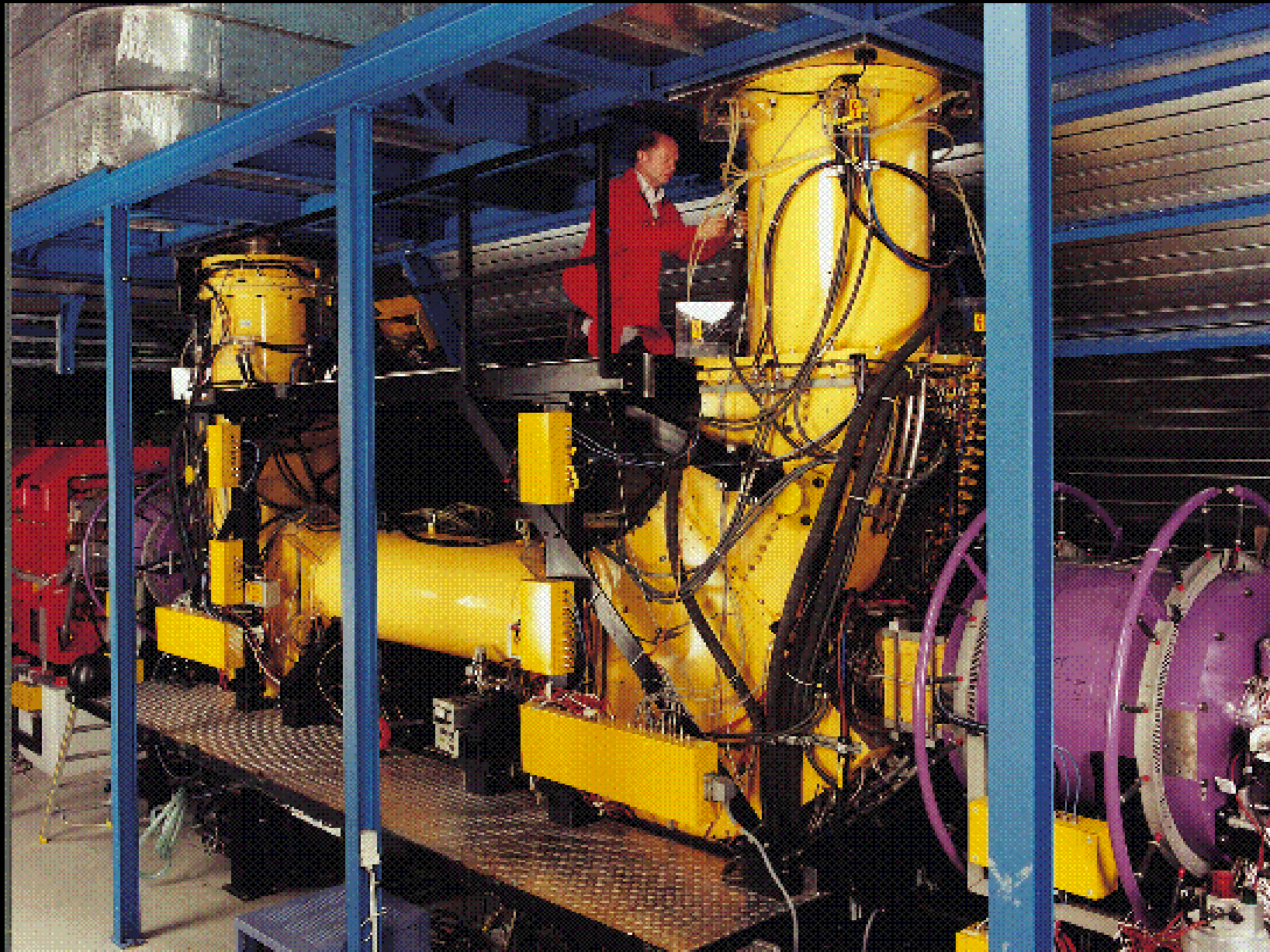


$$\frac{\Delta p}{p} = 10^{-5}$$

$$\Delta x = 2 \text{ mm}$$

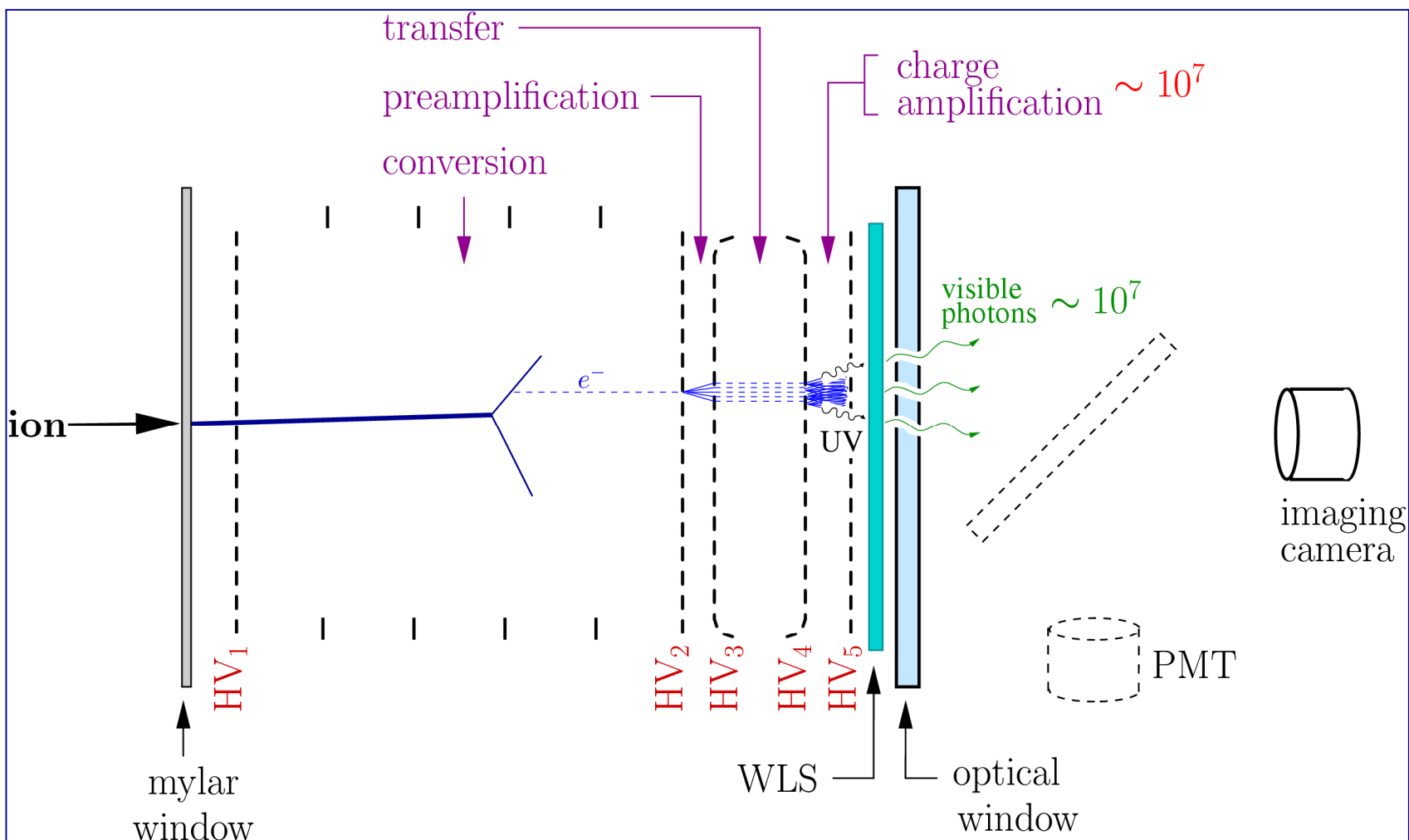


Elektronowa chłodziarka



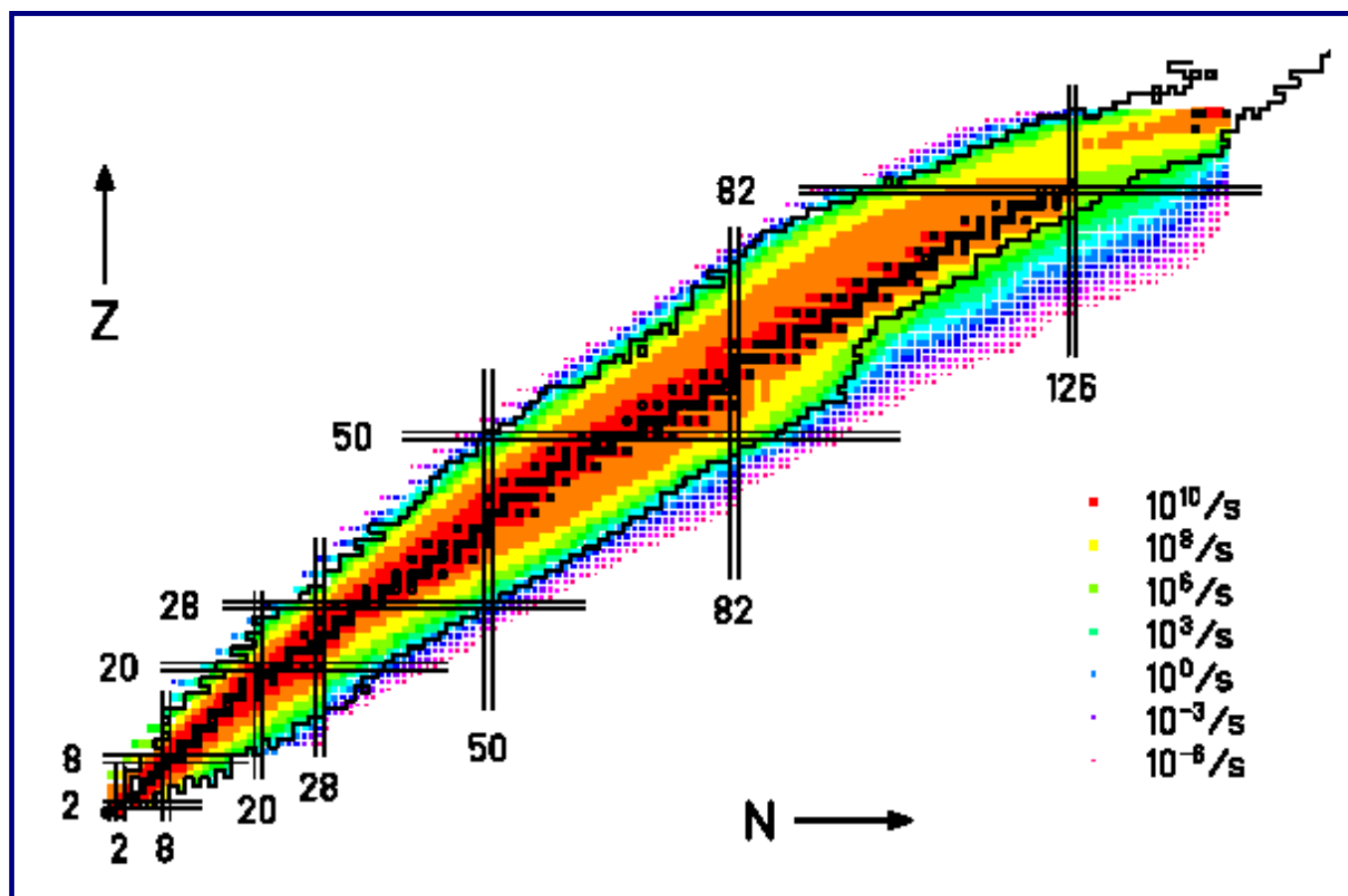
Jak zarejestrować oba protony ?

Pomysł komory dryfowej z odczytem optycznym (prof. W. Dominik)



Planowane intensywności wiązek radioaktywnych

GSI Conceptual Design Report



Procesy nukleosyntezy

