

# **Eksperymenty z wykorzystaniem wiązek radioaktywnych**

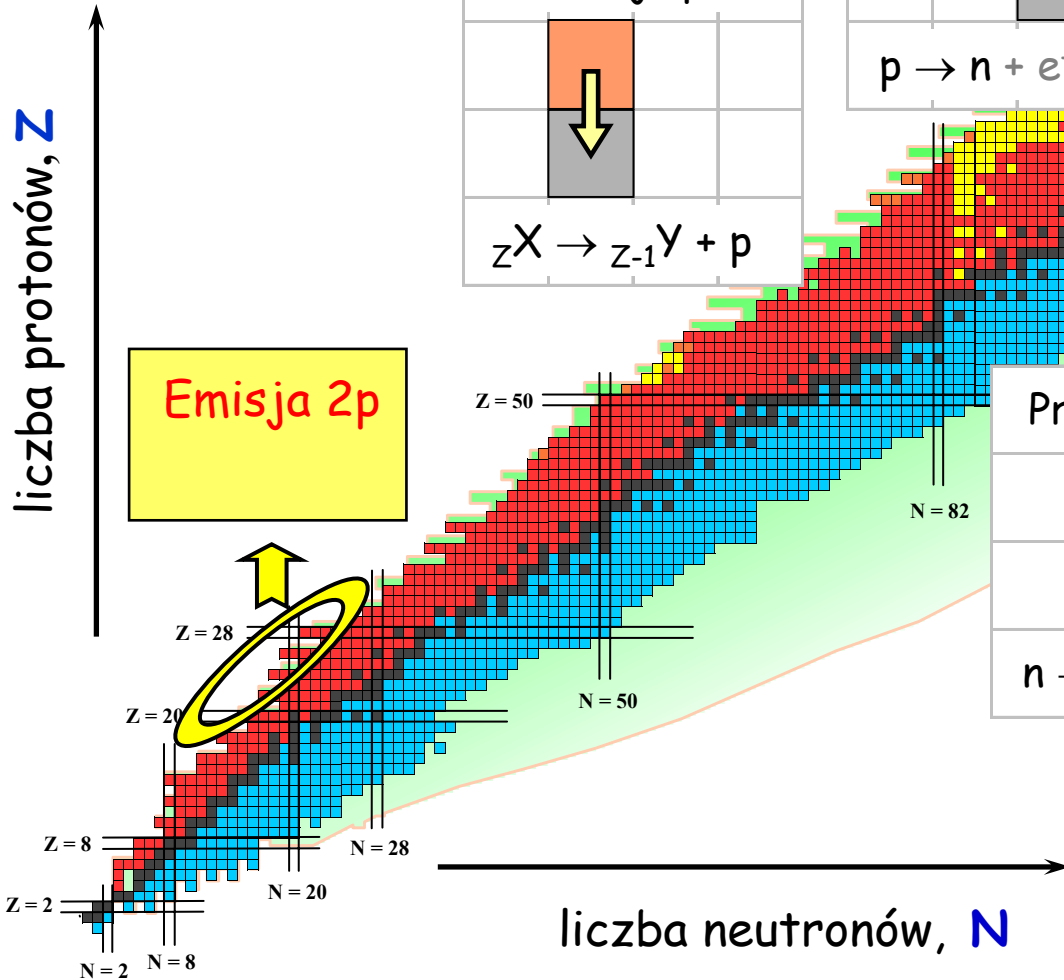
- 1. Co to są wiązki radioaktywne**
- 2. Metody wytwarzania wiązek radioaktywnych**
- 3. Ośrodki wytwarzające wiązki radioaktywne**
- 4. Nowe zagadnienia możliwe do badania dzięki zastosowaniu wiązek radioaktywnych**

264 jądra stabilne

ok. 2700 jąder znanych

ok. 7000 jąder przewidywanych

# Mapa nuklidów



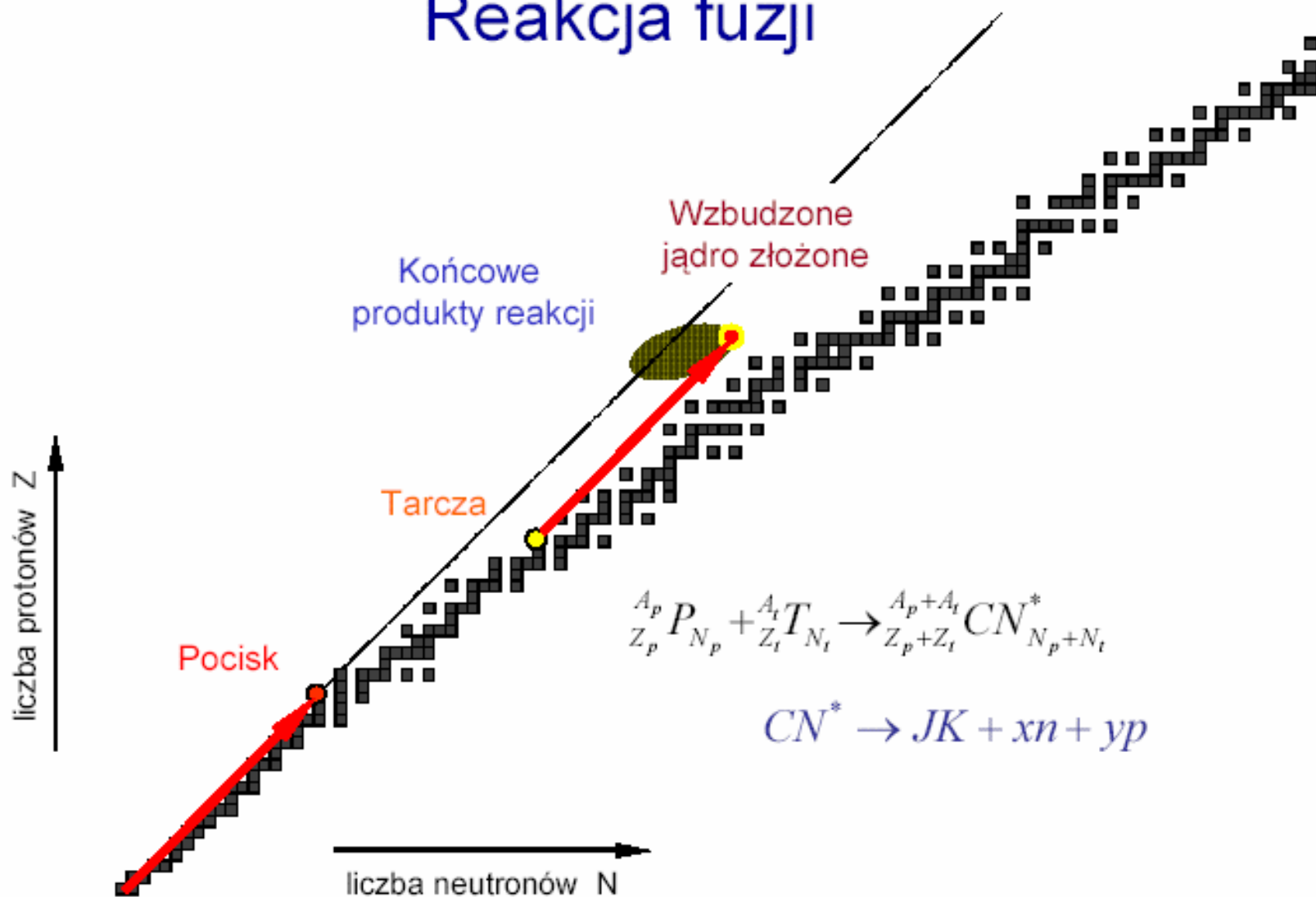
- - trwałe
- - rozszczepienie
- -  $\alpha$
- -  $\beta^-$
- -  $\beta^+$
- - p

# Jądra egzotyczne tzn. dalekie od ścieżki stabilności $\beta$

## Dlaczego powinniśmy badać nuklidy dalekie od ścieżki stabilności?

1. Odkrywanie nowych izotopów: nauka i zastosowania
2. Poszukiwanie nowych sposobów rozpadu promieniotwórczego i ustalanie granic świata nuklidów
3. Badanie jądrowej struktury izotopów: skóra n, halo, zanikanie powłok ?
4. Wyznaczanie stałych sprzężenia oddziaływań słabych
5. Uzyskanie informacji o istocie procesów nukleosyntezy w gwiazdach

# Reakcja fuzji



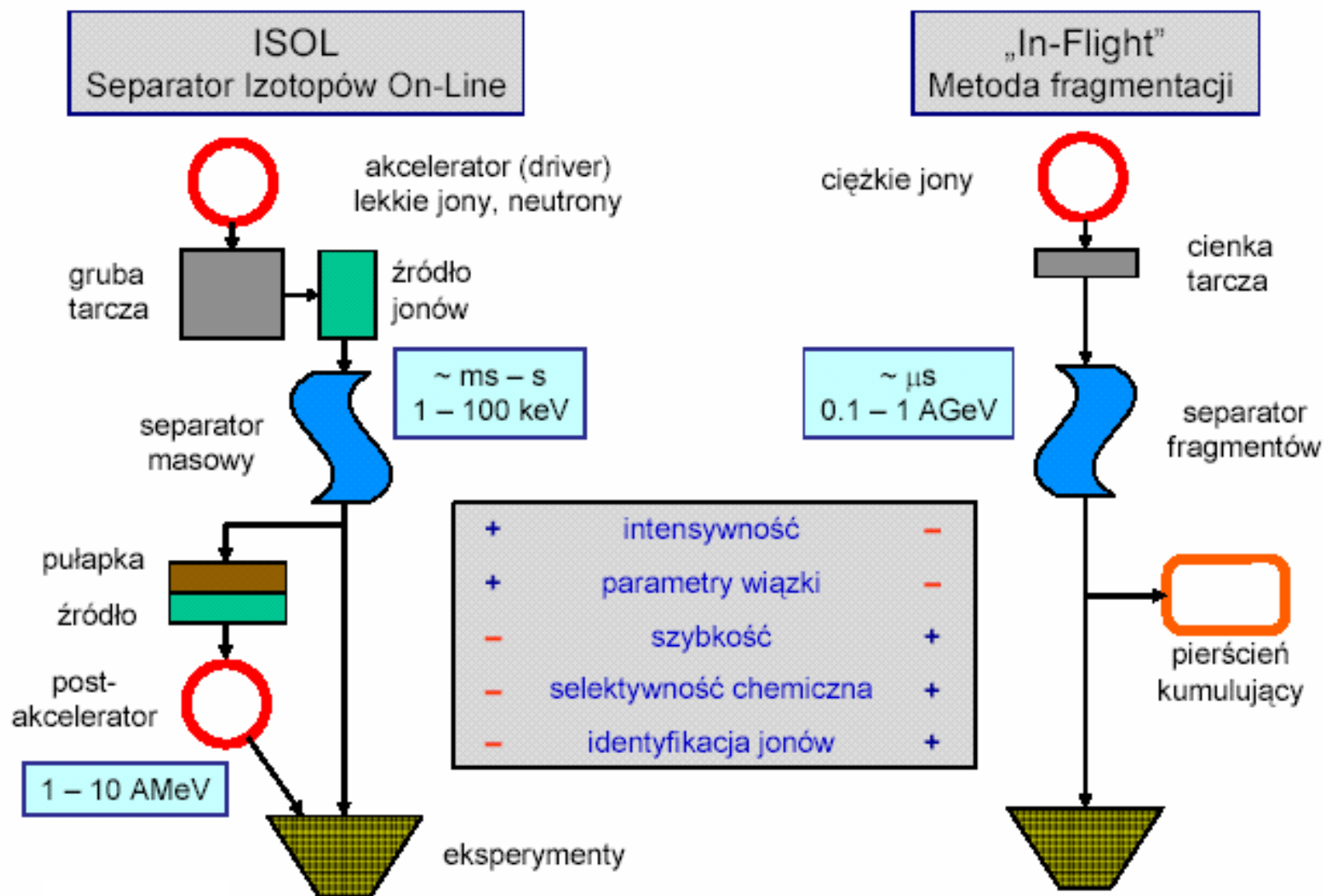
# Co to są wiązki radioaktywne

- 287 jąder (w tym 264 j.stabilnych reszta długożyciowych) może być używane jako pociski przyspieszane w standardowych akceleratorach
- ok. 2700 jąder jest obecnie znanych
- ok. 7000 jąder o N i Z pomiędzy linią oderwania protonu i linią oderwania neutronu - mogłoby być przyspieszane jako wiązki radioaktywne

## Trudności związane z uzyskaniem wiązek radioaktywnych

1. znalezienie drogi do wytworzenia jąder egzotycznych
2. małe przekroje czynne na produkcję
3. krótkie czasy życia
4. duże straty podczas transportu, jonizacji i akceleracji

# Wiązki radioaktywne: dwie metody



# **Metody wytwarzania wiązek radioaktywnych**

## **1. Metoda ISOL - Isotope Separation On Line**

**a) wytworzenie jąder egzotycznych w grubej tarczy/  
źródle jonów (konieczny wstępny akcelerator)**

**poprzez reakcję fuzji:**

$p, d, HI + \text{gruba tarcza} \rightarrow \text{jądro złożone} \rightarrow 2n + \text{jądro niestabil.}$

**b) uzyskanie jonów o wysokim stopniu jonizacji**

**c) wybór jonów o właściwej masie**

**d) przyspieszenie jonów do wybranej energii (drugi akcelerator)**

# Metoda ISOL - Isotope Separation On Line

## Zalety:

Dobra jakość wiązki (czystość, określenie energii, ogniskowanie)

Możliwość uzyskania dużych natężeń

## Wady:

Natężenie zależne od własności pierwiastka, szczególnie czasu życia jąder

min. czas życia ok. ms

Konieczność użycia 2 akceleratorów

## Przykłady:

$p + {}^{70}\text{Ge} \rightarrow {}^{69}\text{As} + 2n$        ${}^{69}\text{As} - 10^6$  jonów/s;    stabilny izotop:  ${}^{75}\text{As}$

$p + {}^{70}\text{Ge} \rightarrow {}^{67}\text{Ga} + \alpha$        ${}^{67}\text{Ga} - 10^5$  jonów/s;    stabilny izotop:  ${}^{69}\text{Ga}, {}^{71}\text{Ga}$

$d + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{17}\text{F} + n$      ${}^{17}\text{F} - 5 \times 10^4$  jonów/s na tarczy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;    stabilny izotop:  ${}^{19}\text{F}$   
 ${}^{17}\text{F} - 2 \times 10^7$  jonów/s na tarczy  $\text{HfO}_2$



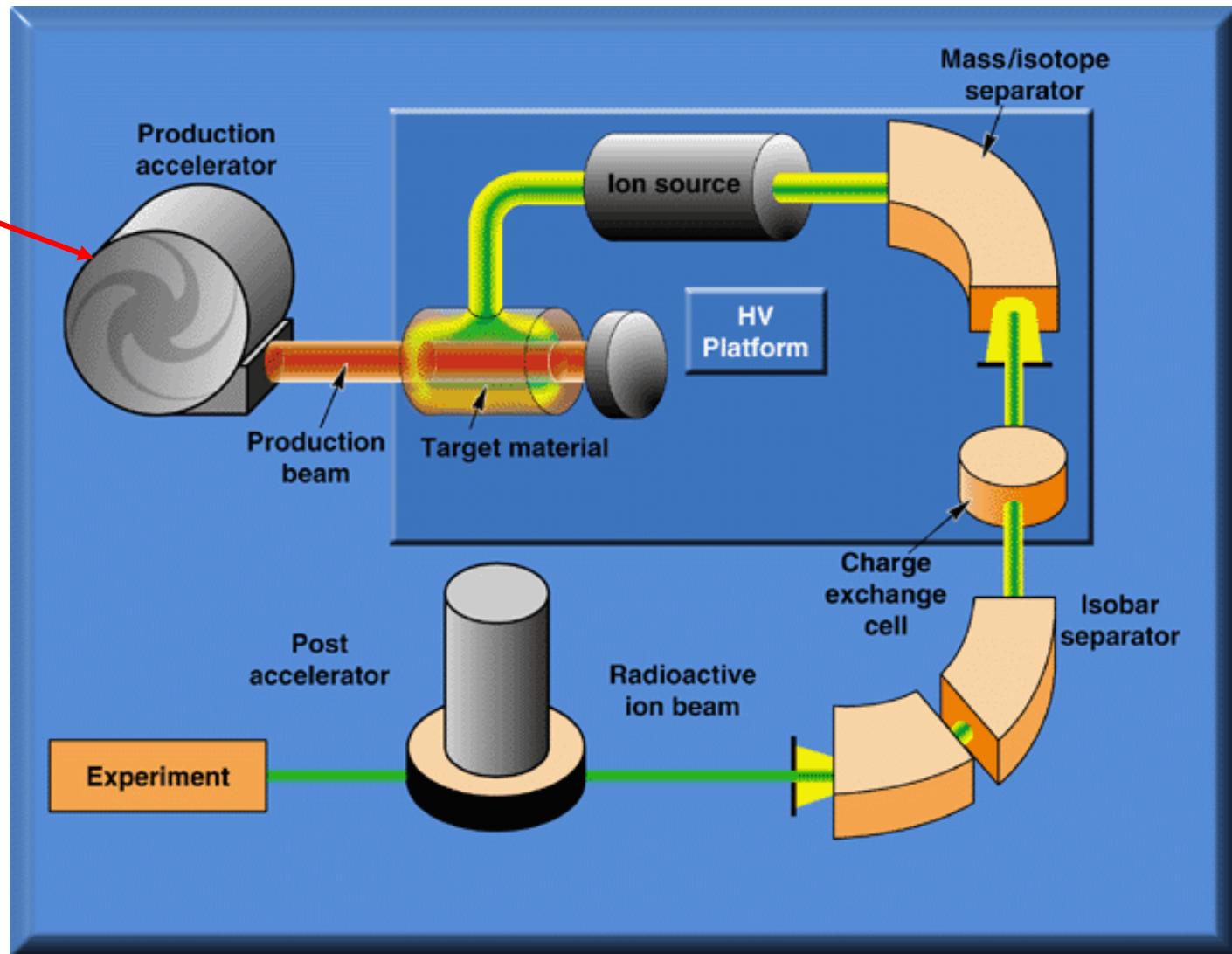
# ISOL w Oak Ridge National Laboratory

**Lekkie jony:**

p	50 MeV
d	50 MeV
$^3\text{He}$	120 MeV
$^4\text{He}$	100 MeV

**Tarcze:**

O w tlenkach
Ge ciekły
$\text{UC}_2$



# Separator

## **Cel:**

oddzielenie wiązki pierwotnej i selektywna transmisja  
wybranych produktów

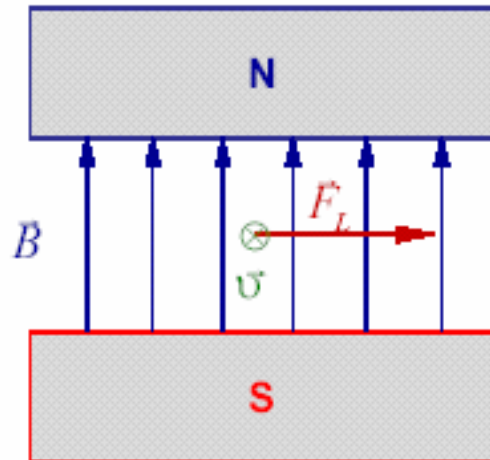
## **Budowa:**

element dyspersyjny - magnes dipolowy

element ogniskujący - soczewka kwadropolowa

układ filtrujący - np. filtr prędkości Wiena

## Magnes dipolowy



- ▶ Na cząstkę o ładunku elektrycznym  $q$ , poruszającą się z prędkością  $v$  w polu magnetycznym  $B$ , działa siła Lorentza :

$$F_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Gdy pole jest jednorodne, a prędkość prostopadła do linii pola, tor jest okręgiem o promieniu  $\rho$  :

$$qvB = \frac{mv^2}{\rho},$$

czyli

$$B\rho = \frac{mv}{q} = \frac{p}{q} \quad - \text{sztywność magnetyczna.}$$

W przypadku relatywistycznym :

$$B\rho = \frac{p}{q} = \frac{\gamma mv}{q} \cong \frac{\gamma Au\beta c}{eQ} = \frac{uc}{e} \gamma \beta \frac{A}{Q}.$$

$$\frac{uc}{e} = \frac{931.49 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2 c}{e} = \frac{931.49 \cdot 10^6 \text{ Vs}}{2.9978 \cdot 10^8 \text{ m}} = 3.107 \text{ Tm}$$

$$vB = E$$

$$\frac{\text{m}}{\text{s}} T = \frac{\text{V}}{\text{m}} \Rightarrow T = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$$

$$B\rho [\text{T m}] = 3.107 \gamma\beta \text{ A/Q}$$

## Dyspersja w stałym polu magnetycznym

Promień toru cząstki w polu B jest proporcjonalny do jej pędu. Odchylenie toru cząstki po przejściu przez sektor pola B zależy więc od jej pędu (**dyspersja**).

Założmy, że dwie cząstki o takim samym ładunku, ale o pędach  $p_0$  i  $p$ , wchodzą w obszar pola B w tym samym miejscu. Jaka jest odległość między nimi po przebyciu toru o długości L ?

Cząstki poruszają się po okręgach o promieniach odpowiednio :

$$\rho_0 = p_0/qB \quad \text{i} \quad \rho = p/qB$$

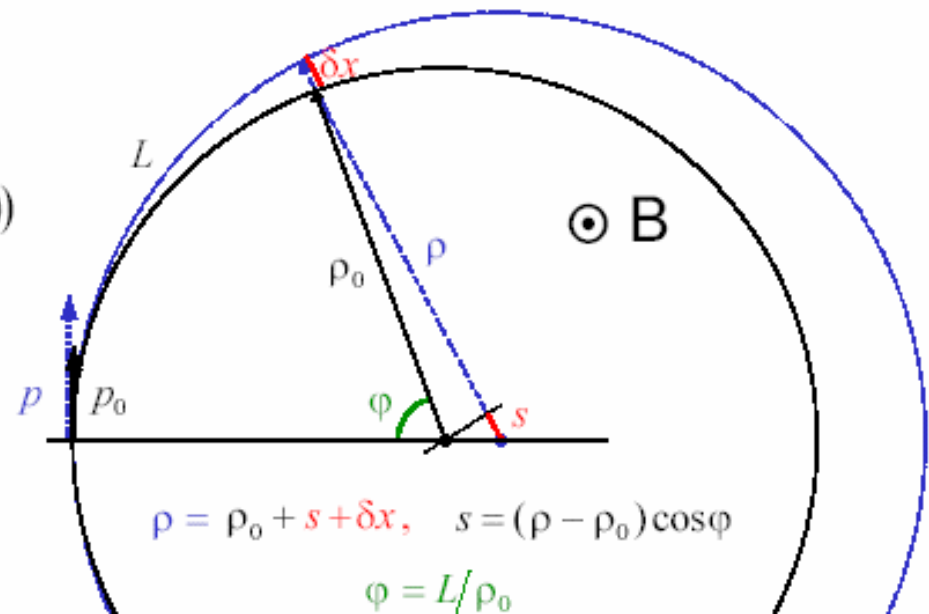
$$\delta x = (\rho - \rho_0)(1 - \cos(L/\rho_0))$$

$$\delta x = \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \rho_0 (1 - \cos(L/\rho_0))$$

$$\delta x = \frac{\Delta(B\rho)}{B\rho_0} D$$

Dyspersja :

$$D = \rho_0 (1 - \cos(L/\rho_0))$$

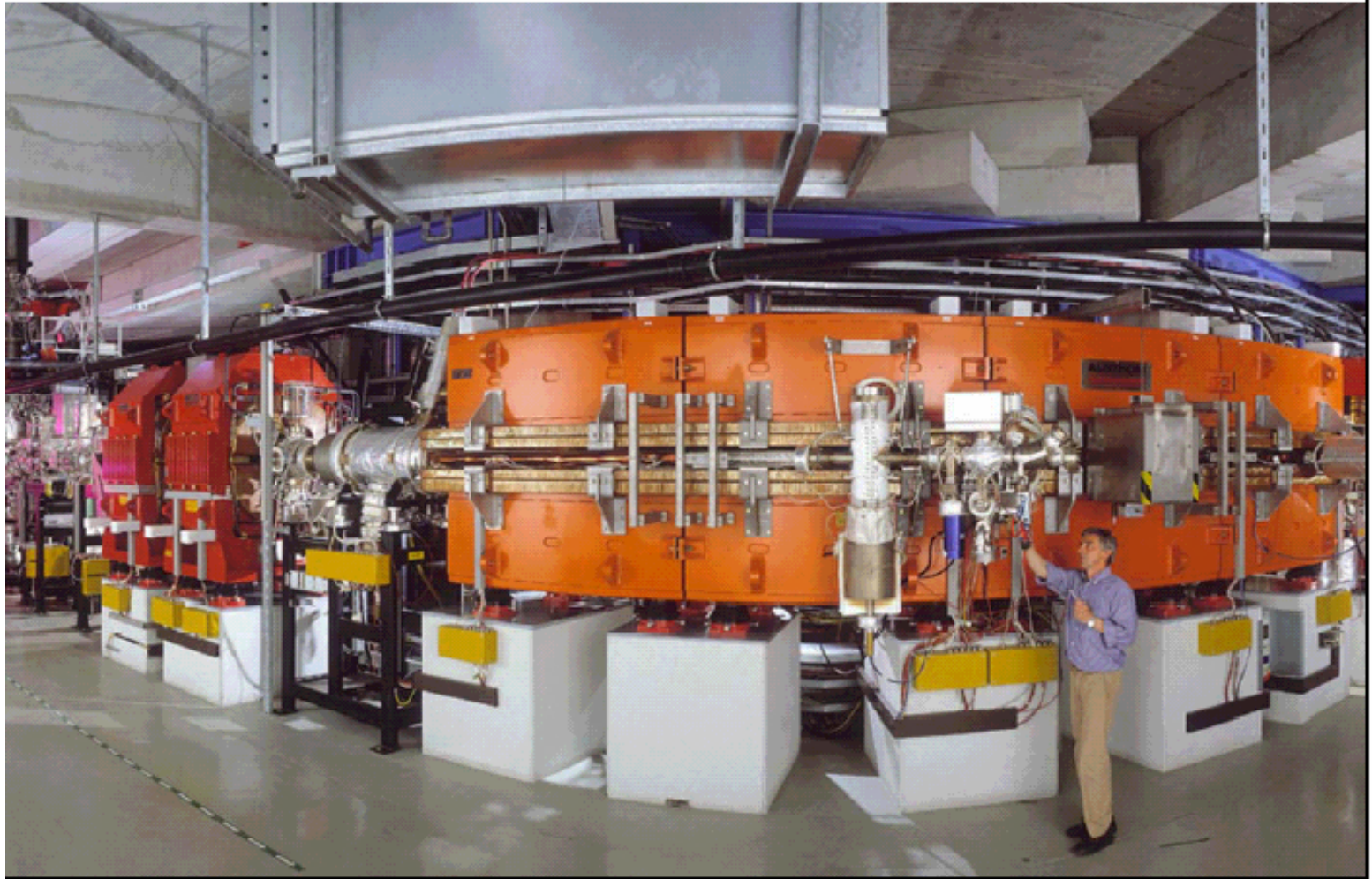


więcej szczegółowych informacji o optyce jonowej w wykładzie

dr hab. M. Pfutznera: „Fragmentacja pocisków”

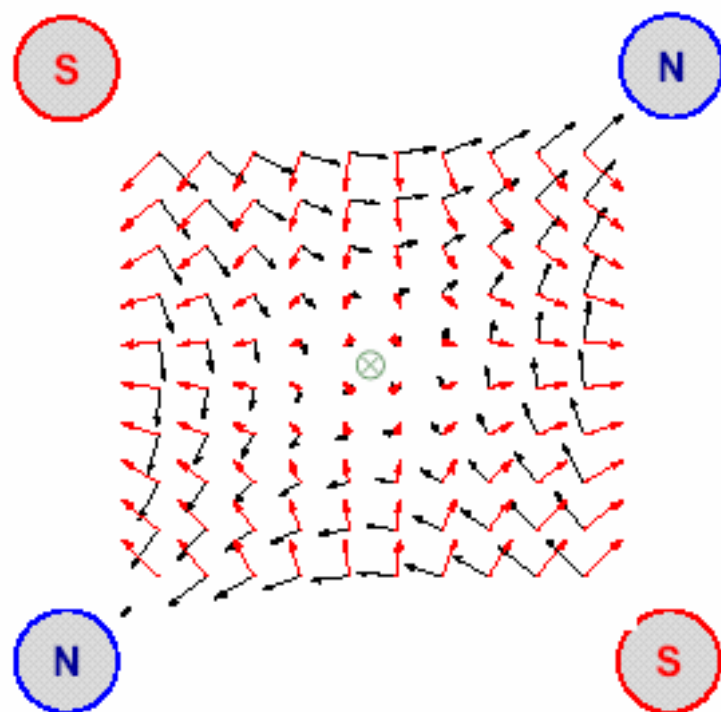
<http://zsj.fuw.edu.pl/pfutzner>

# Magnes dipolowy (GSI)





## Soczewka kwadrupolowa



- ▶ Kwadrupolowe pole magnetyczne, w płaszczyźnie prostopadłej do prędkości cząstki, w pobliżu osi :

$$\vec{B} = (Gy, Gx),$$

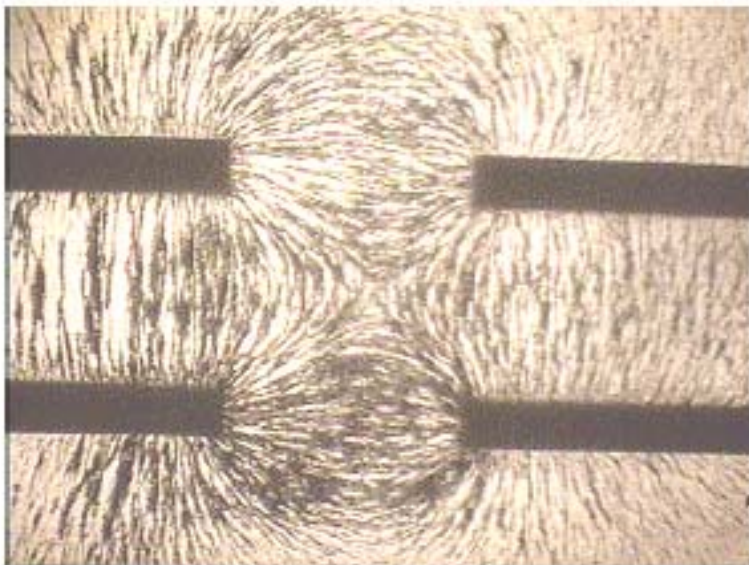
wówczas siła Lorentza :

$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B} = qv_z G(-x, y).$$

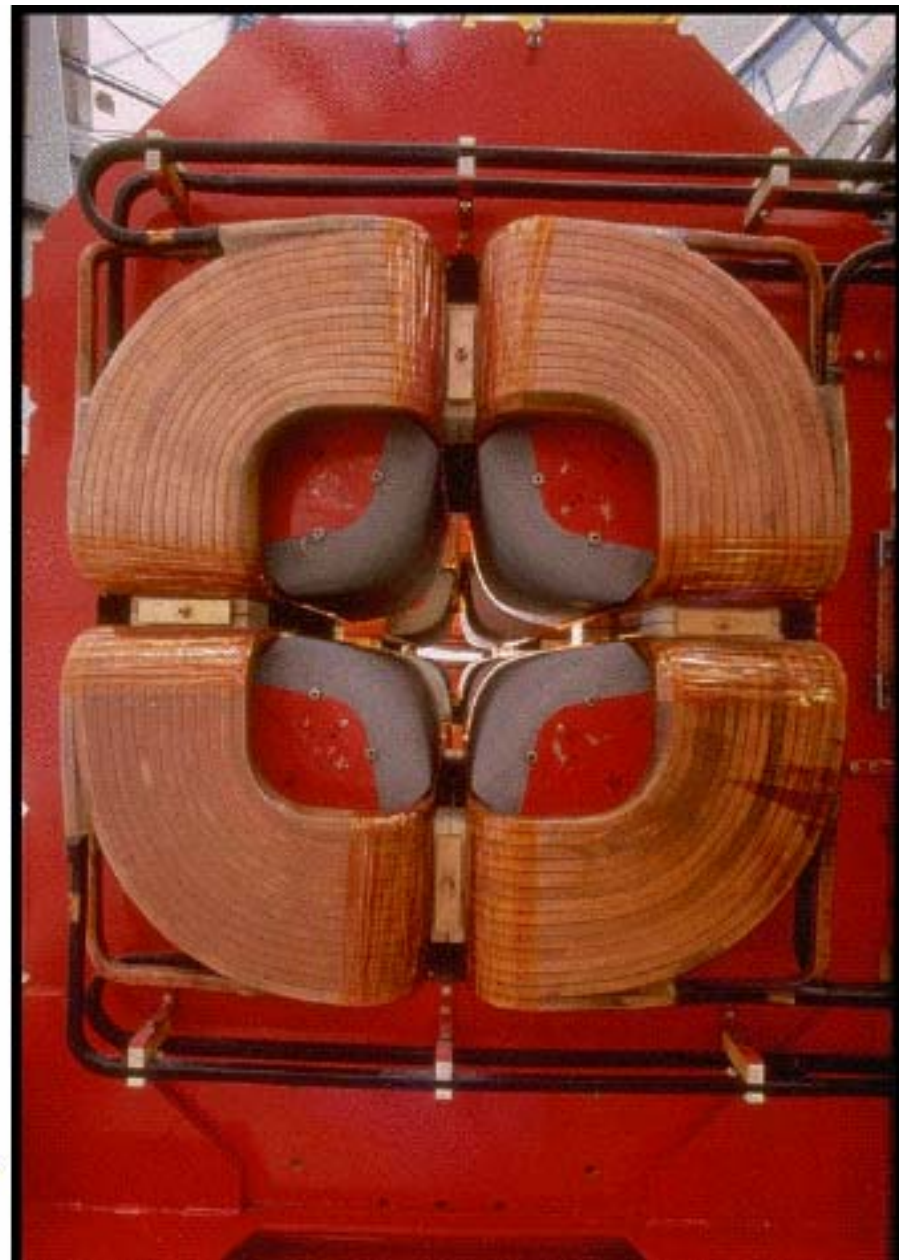
Jeśli  $qv_z G < 0$  (tak jak na rysunku), to występuje efekt ogniskowania w kierunku pionowym ( $y$ ) i rozpraszania w kierunku poziomym ( $x$ ).

Obrót układu biegunów o  $90^\circ$  (równoważny zmianie znaku  $G$ ) zmienia kierunek ogniskowania. Układ dwóch soczewek kwadrupolowych, jednej ogniskującej w kierunku  $x$  i drugiej ogniskującej w kierunku  $y$ , ma własność ogniskowania w obydwu kierunkach. Dlatego w separatorach zawsze występują dublety i tryplety takich soczewek.

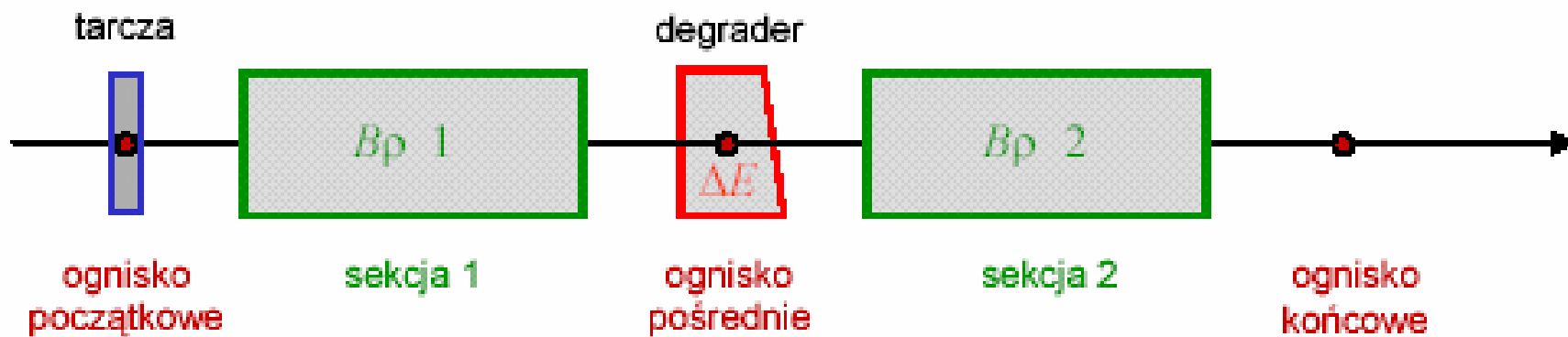
**Model soczewki kwadrupolowej**  
(4 magnesy sztabkowe) ,



**i prawdziwy „kwadrupol”**  
(ESR w GSI)



# Separator



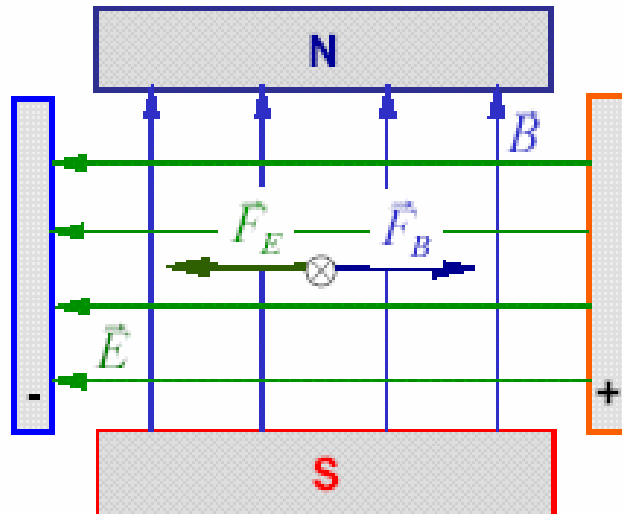
$$M/\Delta M \approx 1000$$

$$M/\Delta M \approx 20\ 000$$



## Filtr prędkości Wiena

Układ skrzyżowanych pól  $E$  i  $B$  :



- ▶ Na cząstkę naładowaną, poruszającą się z prędkością  $v$  prostopadle do linii pól  $E$  i  $B$ , działają przeciwnie skierowane siły o wartościach :

$$F_E = qE \quad \text{i} \quad F_B = qvB .$$

Siły te równoważą się wtedy gdy :

$$v = \frac{E}{B} .$$

Tylko cząstki o tej prędkości  $v$  przechodzą przez układ bez odchylenia.

**Przykład :** Filtr Wienera na separatorze LISE w GANIL.

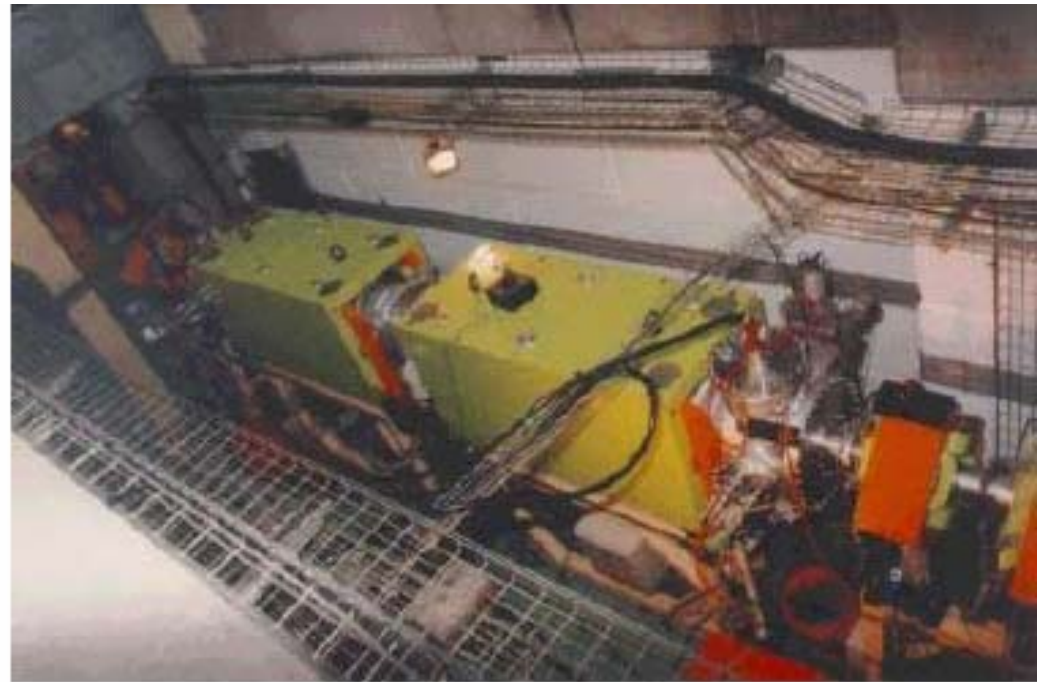
► **Parametry :**

długość : 2 x 2.5 m,

wysokie napięcie : do 350 kV,

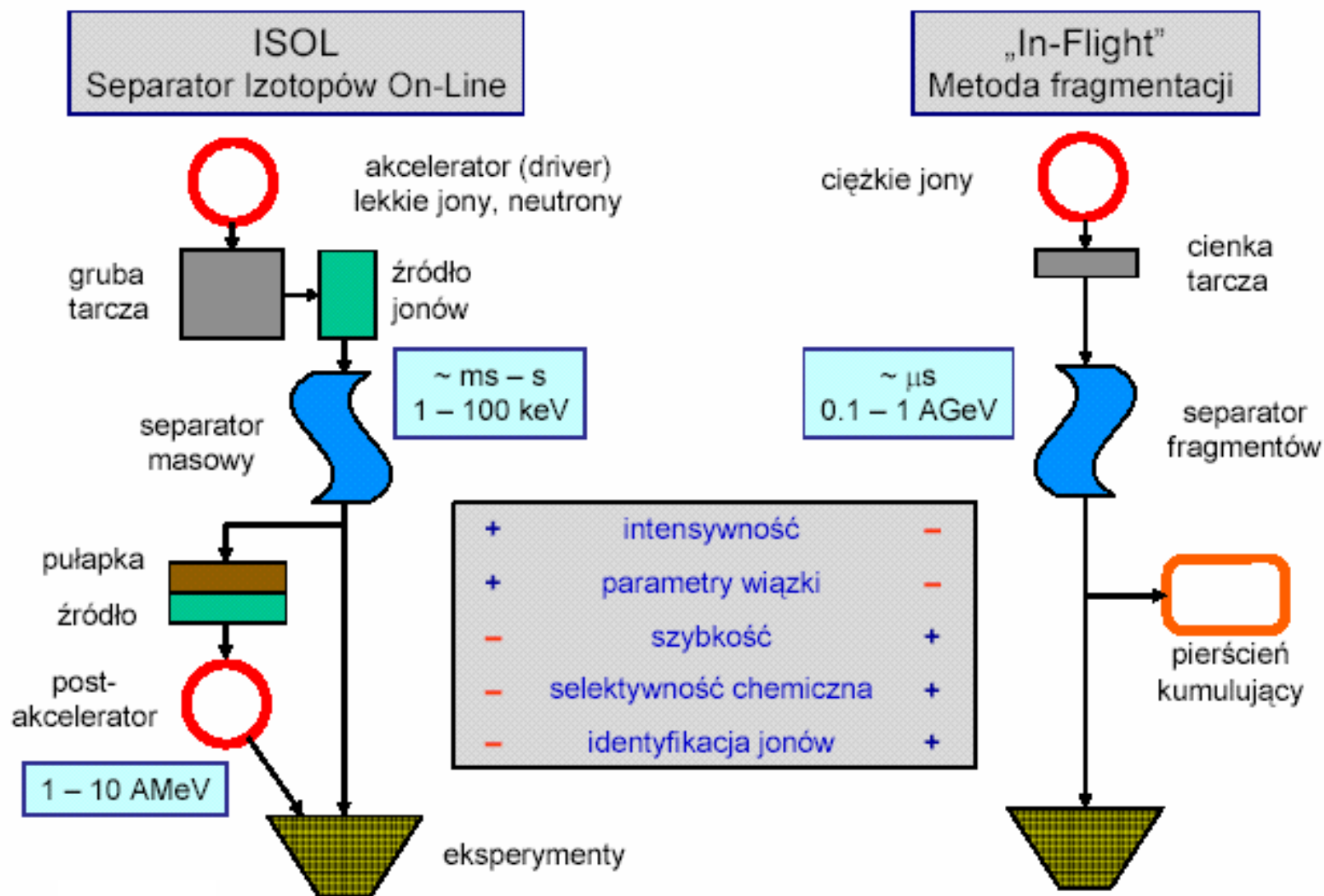
odleg. między elektr. : 10 cm,

pole B : 0.01 – 0.1 T.



Maksymalna dyspersja : 3 cm/°

# Wiązki radioaktywne: dwie metody



# **Metody wytwarzania wiązek radioaktywnych**

## **2. Metoda IFS - In Flight Separation**

- a) intensywna wiązka ciężkich jonów o wysokiej energii na cienkiej tarczy → fragmentacja lub rozszczepienie**
- b) identyfikacja produktów reakcji**
- c) druga tarcza**
- d) identyfikacja pojedynczych zdarzeń**

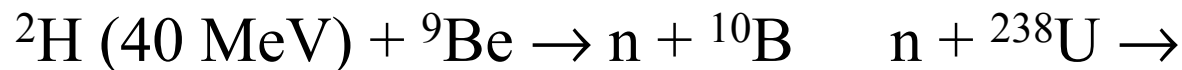
# Metoda IFS - In Flight Separation

**Produkcja jonów niestabilnych**

**poprzez fragmentację:**



**poprzez rozszczepienie:**



→ różne fragmenty n-nadmiarowe: Cu, Zn, As, Se, Br, Kr, Rb, Ag, Cd, In, Sb, I, Xe, Cs

# **Metoda IFS - In Flight Separation**

## **Zalety:**

**Możliwość wytwarzania wiązki o czasie życia jąder od ok. 150 ns (czas przejścia przez separator fragmentów)**

**Nie potrzeba wtórnego przyspieszania**

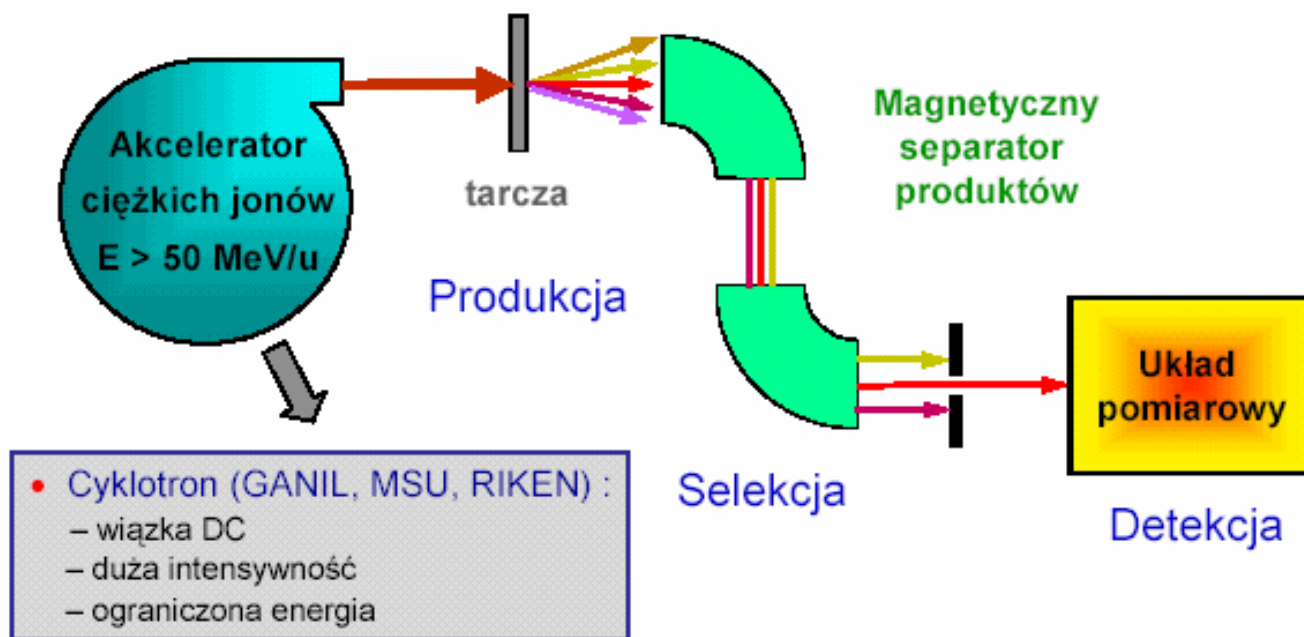
## **Wady:**

**Natężenie wiązek jest małe**

**Wiązki różnych jonów nie są rozdzielone w przestrzeni**

**Konieczne jest śledzenie każdego jonu poprzez określenie A, Z i pędu**

# Schemat układu fragmentacyjnego



- Synchrotron (GSI) :
  - wiązka paczkowana (ale możliwość powolnej ekstrakcji)
  - mniejsza intensywność
  - łatwo o większą energię
  - możliwość iniekcji do pierścienia

# **Ośrodki wytwarzające wiązki radioaktywne**

**CERN - ISOLDE (od 1998)**

**GANIL - SPIRAL (Francja) (od 2001)**

**GSI - ISOL (Niemcy)**

**INFN - EXCYT (Włochy, Katania) (od 1999)**

**JYFL- IGISOL (Finlandia, Jyväskylä)**

**KEK - (Japonia)**

**Louvain-la Neuve (Belgia) (od 1996)**

**ORNL (USA) (od 1996)**

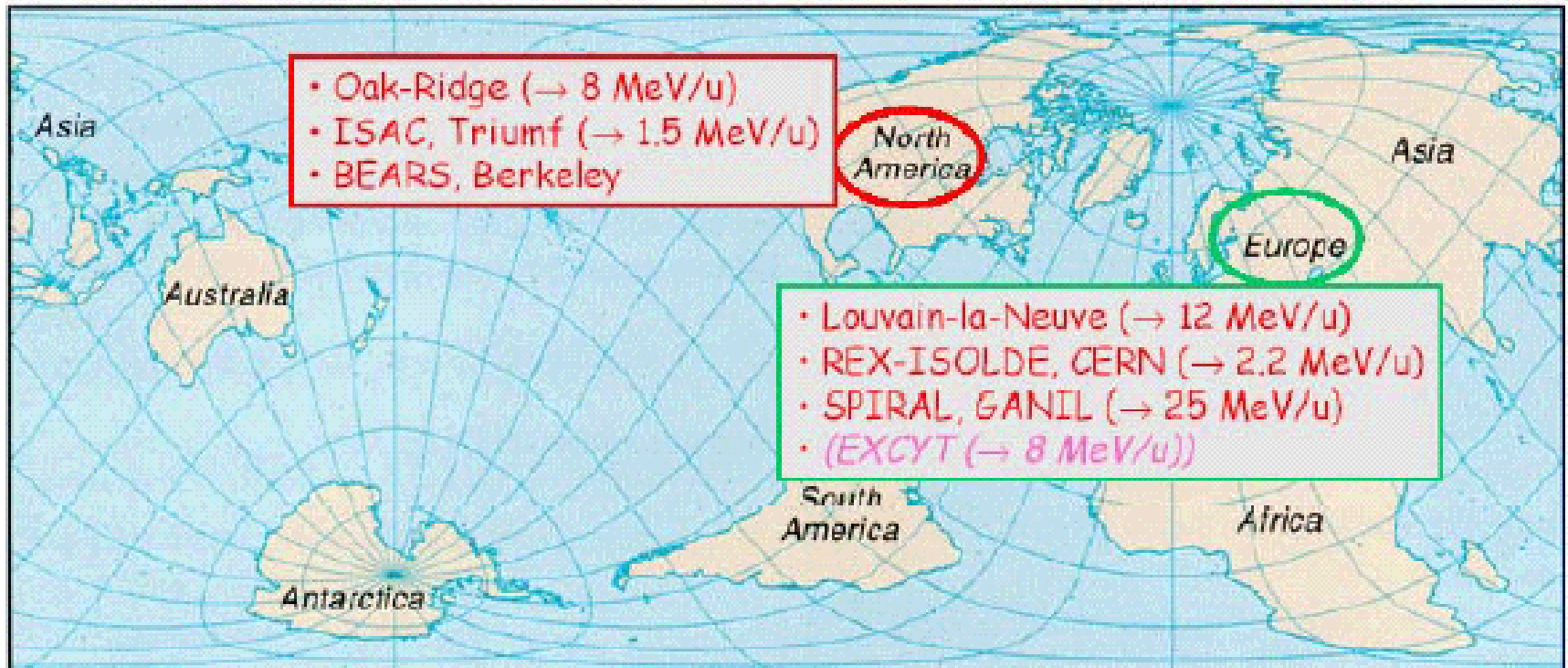
**RIKEN (Japonia)**

**TRIUMF- ISAC (Kanada) (od 2000)**

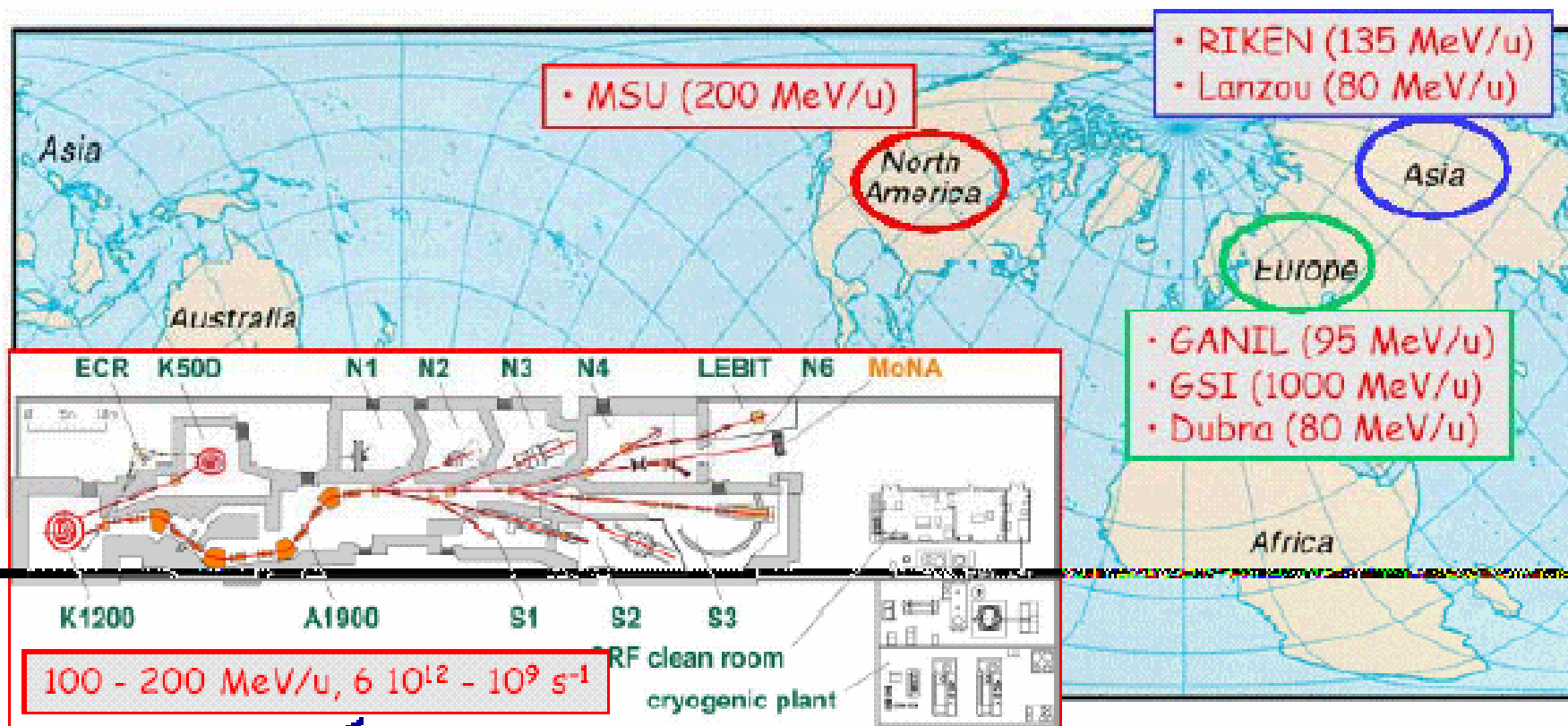
**NSCL - (Michigan, USA) (od 2001)**



# Układy typu ISOL na świecie



# Układy „In-Flight” na świecie



Przykład 1: MSU

# Nowe zagadnienia

## 1. Badania jąder w okolicy linii oderwania neutronu

a) skóra neutronowa

b) halo neutronowe

c) różnice w strukturze powłokowej

d) określenie położenia linii oderwania neutronu

e) badanie struktury jąder niestabilnych ( ${}^8\text{He}$ ,  $N=14$  i  $16$ )

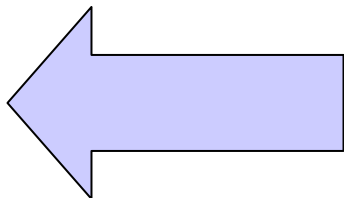
f) aspekty astrofizyczne - proces r

## 2. Kontynuacja badań jąder w okolicy linii oderwania protonu

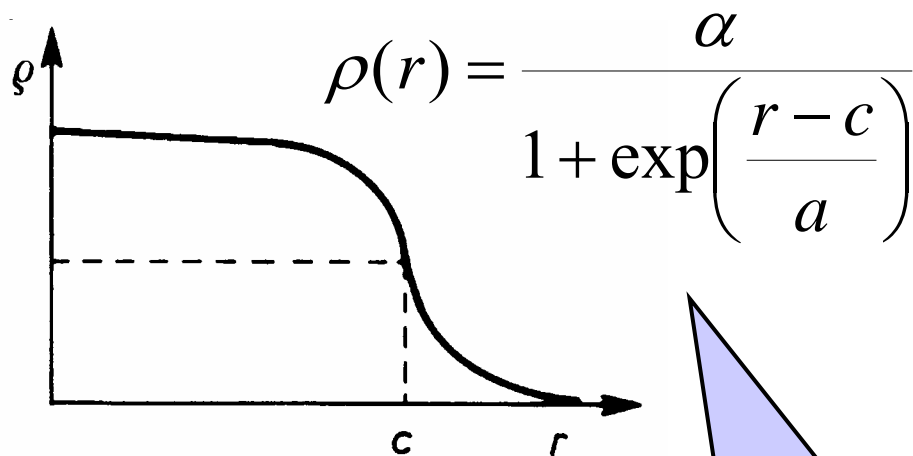
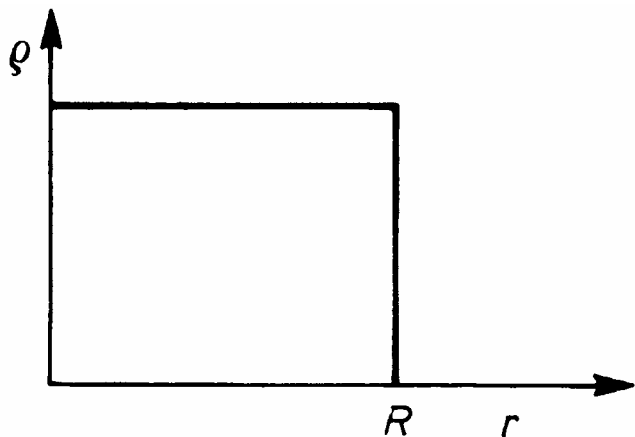
a) halo/skóra protonowa ?

b) badanie struktury jąder niestabilnych:  ${}^{19}\text{Na}$ ,  ${}^{15}\text{F}$ ,  ${}^{10,11}\text{N}$ ,  ${}^9\text{C}$

# Rozmiary i kształty

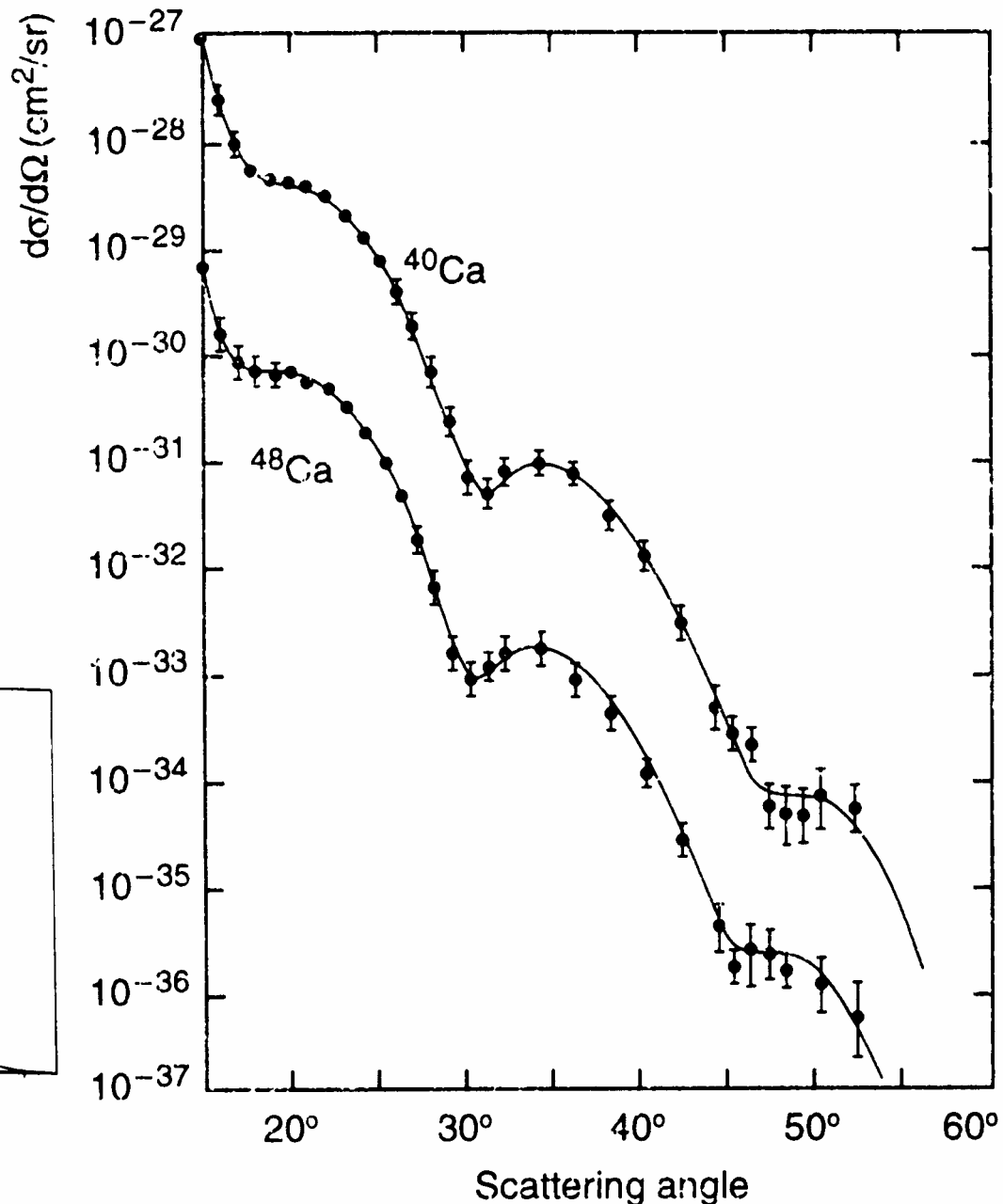
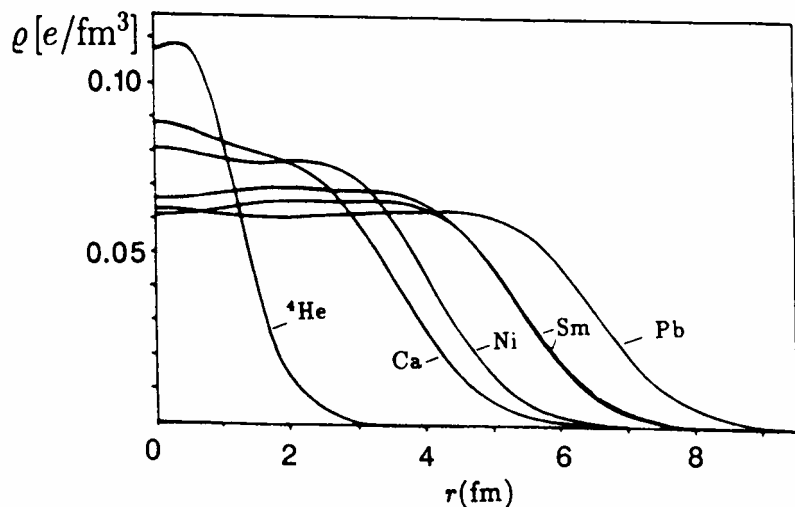


**oddziaływanie  
nukleon-nukleon  
jest krótkozasięgowe**



**rozkład Fermiego**

# Wyznaczanie rozkładu ładunku elektrycznego: elastyczne rozpraszanie elektronów



# Rozkład przestrzenny materii w jądrze atomowym

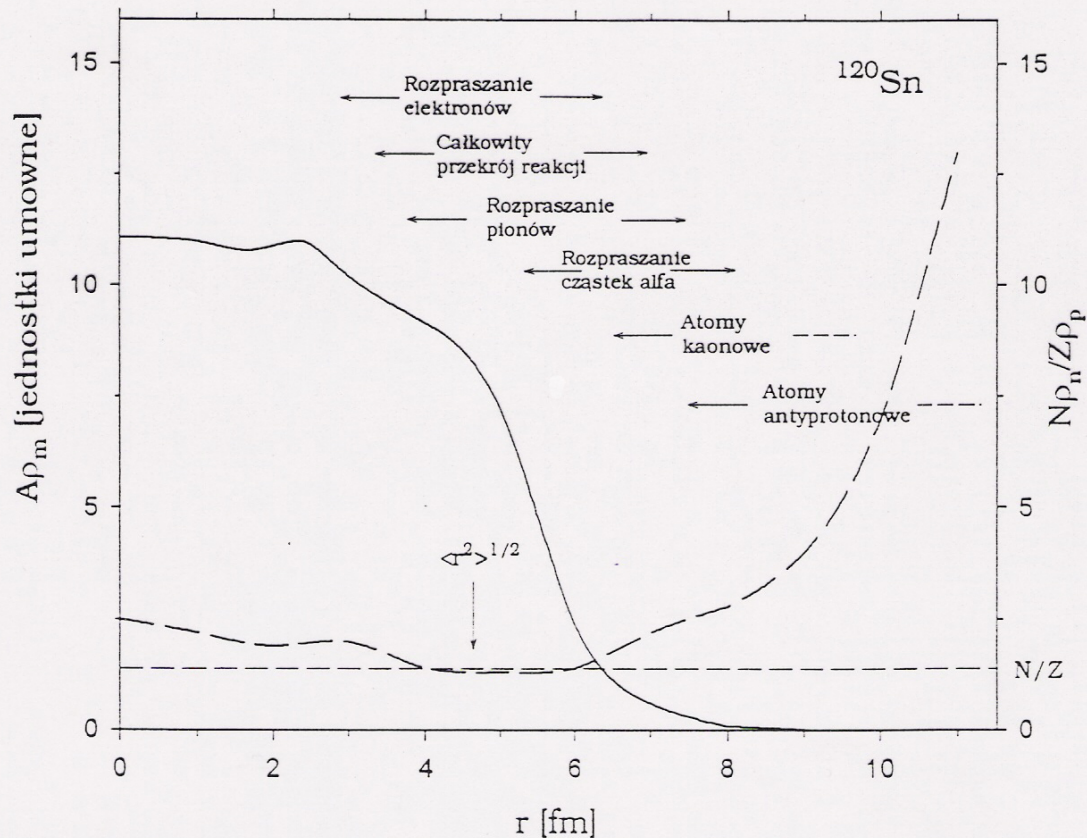
$$\rho(\mathbf{r}) = \rho_0 \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{R}}{\mathbf{a}}\right)}$$

$$\mathbf{R} = r_0 A^{1/3}$$

$$\rho_0 \approx 0.17 \frac{\text{nukleon}}{\text{fm}^3} = 3 \times 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$r_0 \approx 1.2 \text{fm} \quad \mathbf{a} \approx 0.6 \text{fm}$$

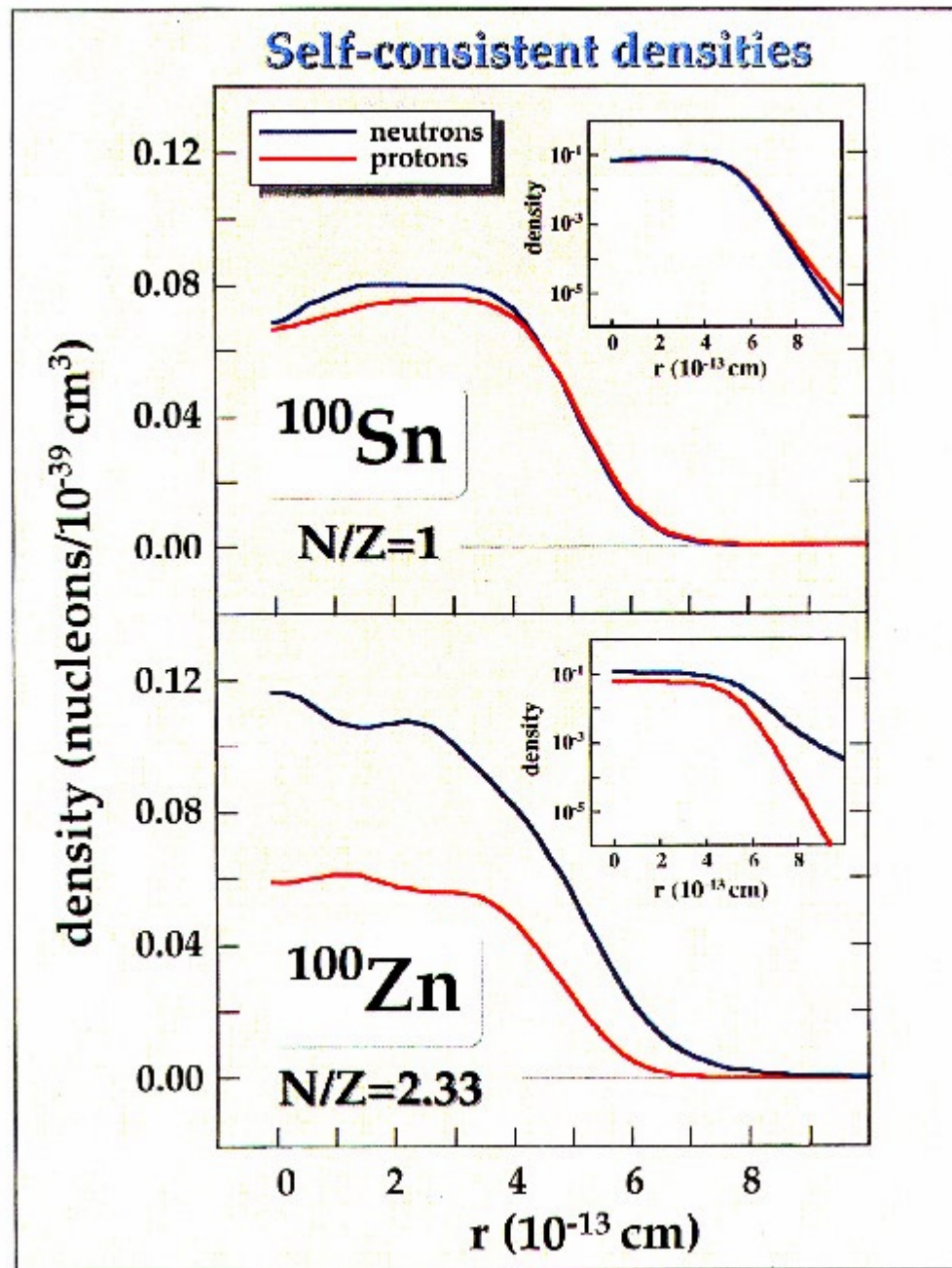
# Badanie rozkładu materii w jądrze antyprotonami



**skóra  
neutronowa  
w jądrze  
 $^{120}\text{Sn}$**

Rys. 3.3. Rozkład całkowitej,  $\rho_m$ , (linia ciągła) i względnej,  $(\rho_n/\rho_p)$ , (linia przerywana) gęstości materii w jądrze  $^{120}\text{Sn}$ , wyliczony na podstawie modelu jednocząstkowego. Strzałkami zaznaczono zakresy promieni jądrowego, do których badania stosują się metody wykorzystujące różne zjawiska. Średni promień kwadratowy dla tego jądra jest równy około 4.5 fm.

skóra neutronowa  
w jądrze  $^{100}\text{Zn}$

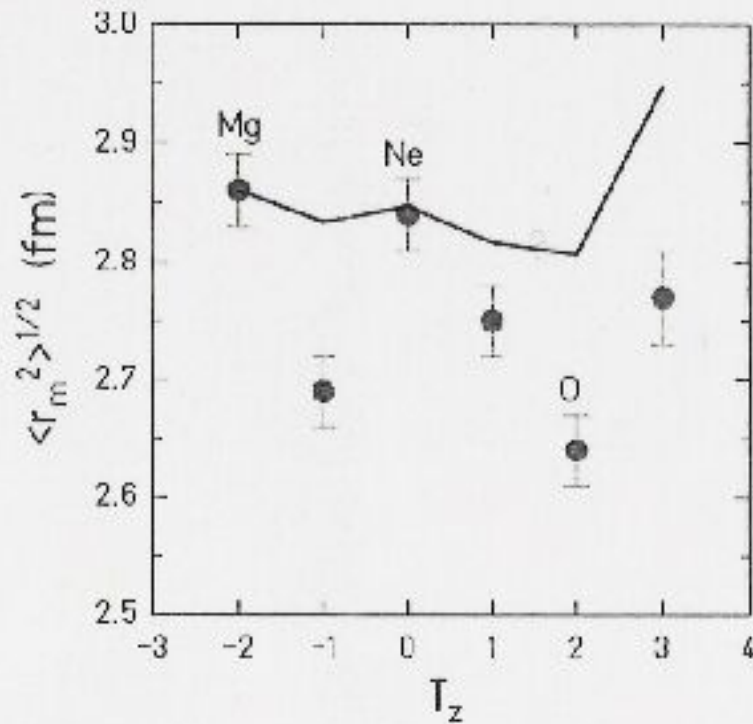




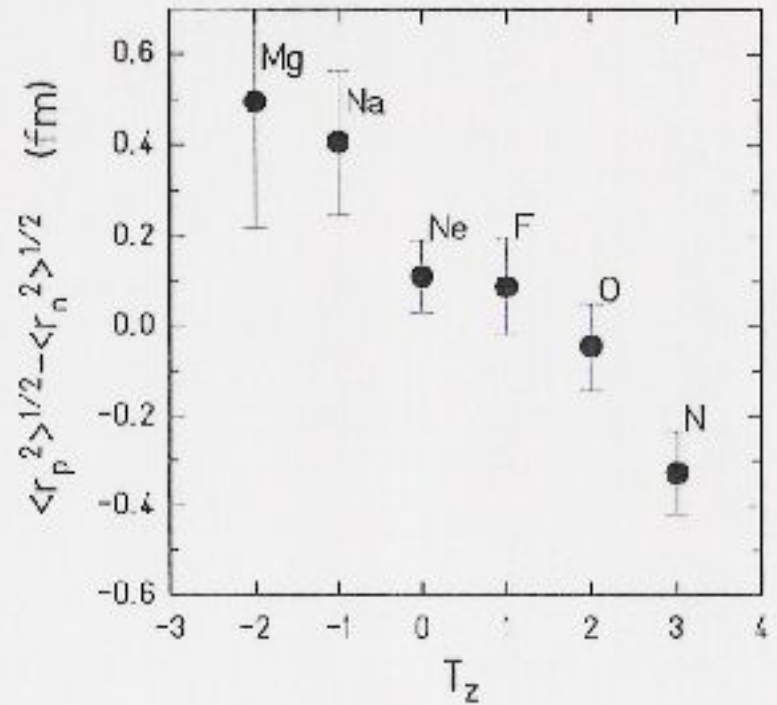
# Czy w jądrach o nadmiarze protonów występuje skóra protonowa?

$$A = 20$$

$$T_z = (N-Z)/2$$



(a)



(b)

Figure 2. Left panel: Dependence of r.m.s. matter radii on isospin projection  $T$  for  $A=20$  isobars; the experimental data (full circles) are confronted to predictions obtained from a relativistic mean-field calculation. Right panel: Dependence of the difference between experimental r.m.s. neutron and proton radii on isospin projection  $T$  for  $A=20$  isobars.

# Halo neutronowe w jądrach lekkich

$${}^6\text{Li} \quad R = 2 \text{ fm}$$

$${}^{11}\text{Li} \quad R = 7,5 \text{ fm}$$

$${}^{208}\text{Pb} \quad R = 7,5 \text{ fm}$$

**H. n. zaobserwowano dla:**

${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{B}$ ,  ${}^{19}\text{C}$ ,  ${}^8\text{He}$  (4n klaster)

**Halo protonowe jest poszukiwane dla:**  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^{17}\text{F}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$ ,  ${}^{20}\text{Mg}$

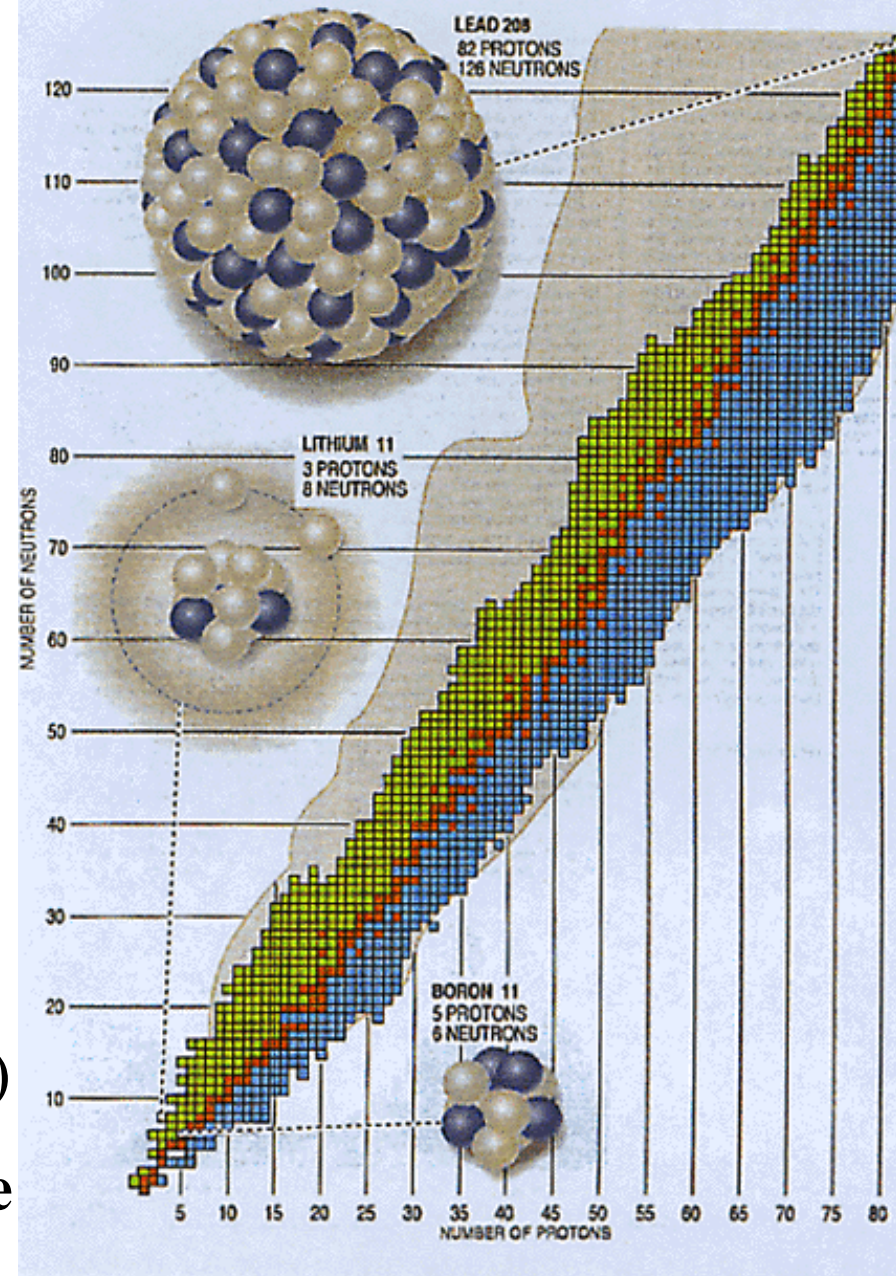


Figure I.2: Representation of the chart of nuclides nuclei are given by squares, positioned horizontally according to the number of protons and vertically ac

# **Nowe zagadnienia c.d.**

## **3. Badanie jąder o $N=Z$**

**a) oddziaływanie pairing**

**b) mieszanie izospinu**

## **4. Badanie struktury powłokowej jąder niestabilnych**

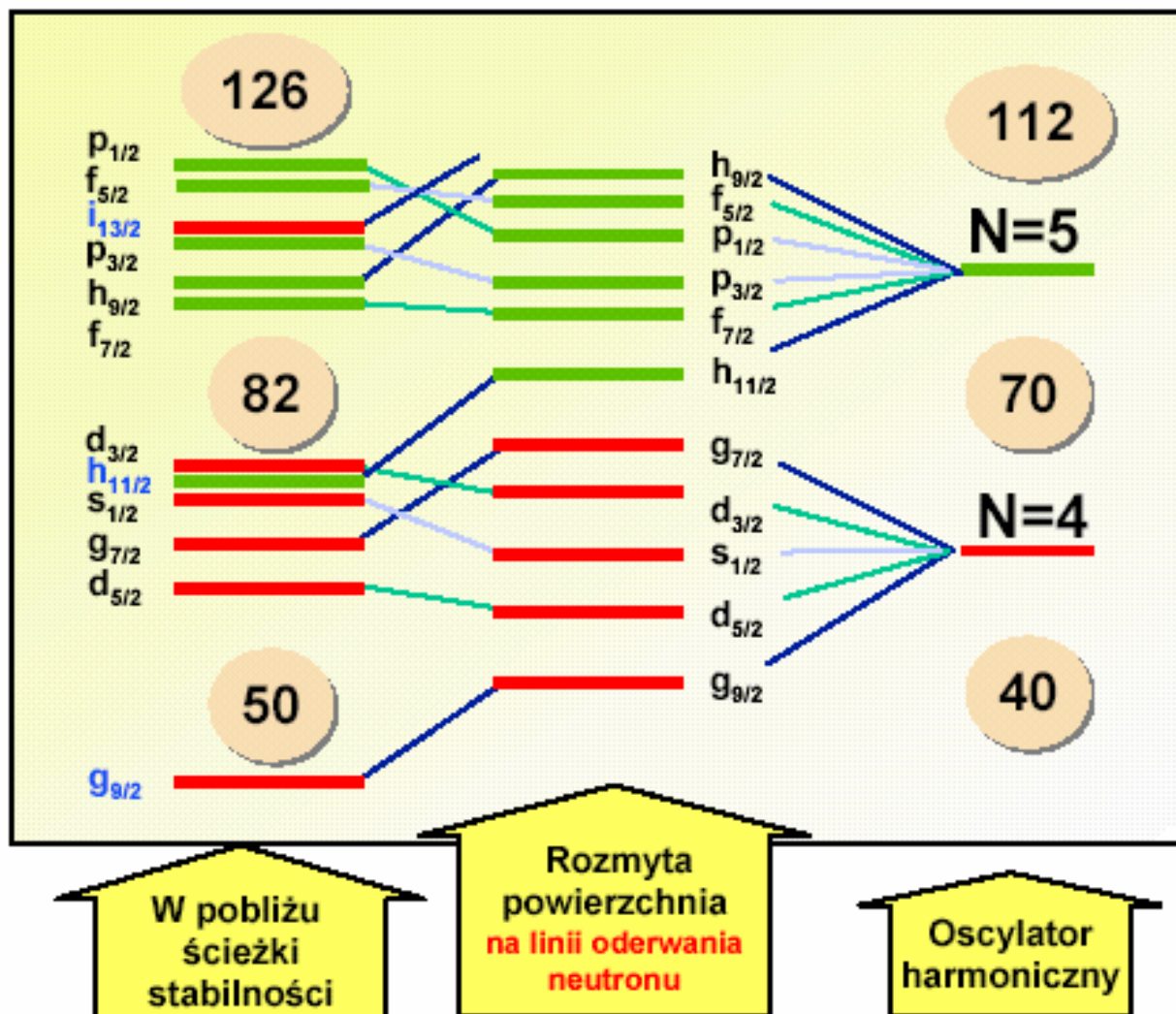
**a) osłabienie struktury powłokowej dla jąder o dużym  $N$**

## **5. Badanie procesów nukleosyntezy**

## **6. Badania jąder superciężkich i ich stabilności**

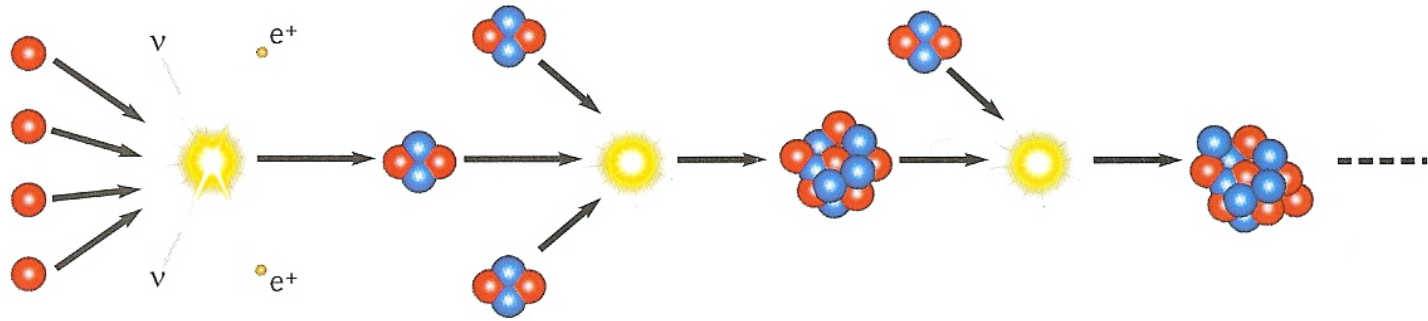
# Struktura jednocząstkowa

Przewidywania teoretyczne : Dobaczewski i in., 1996



# Badanie procesów nukleosyntezy

## 1. Reakcje fuzji wewnątrz gwiazd – do żelaza

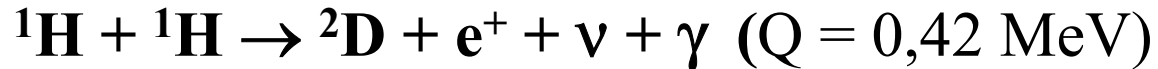


Fusion reactions inside stars (protons: red; neutrons: blue).

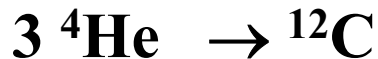


# Synteza jąder lekkich w gwiazdach

Proces pp w gwiazdach:

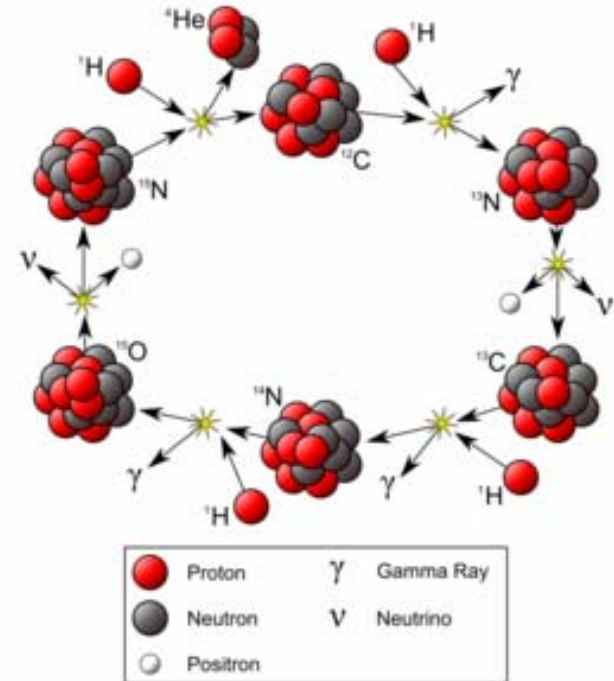
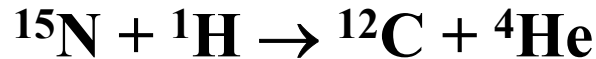
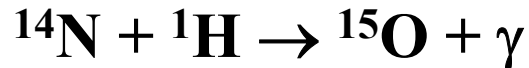
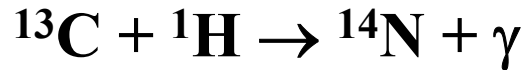
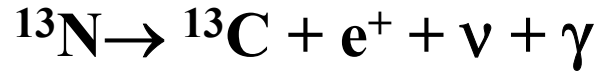
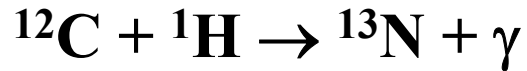


$$Q (4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}) = [4 M ({}^1\text{H}) - M({}^4\text{He})]c^2 = 26,7 \text{ MeV}$$



# Synteza jąder lekkich w gwiazdach

## Cykl węglowo-azotowy (CNO):

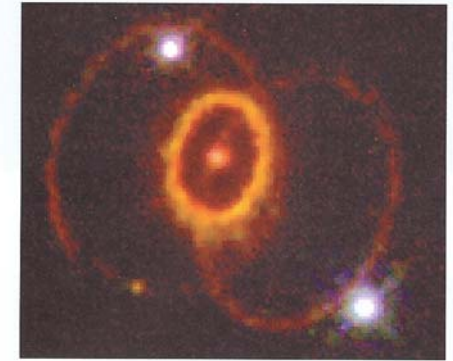


Cykl CNO daje tyle samo energii co proces pp

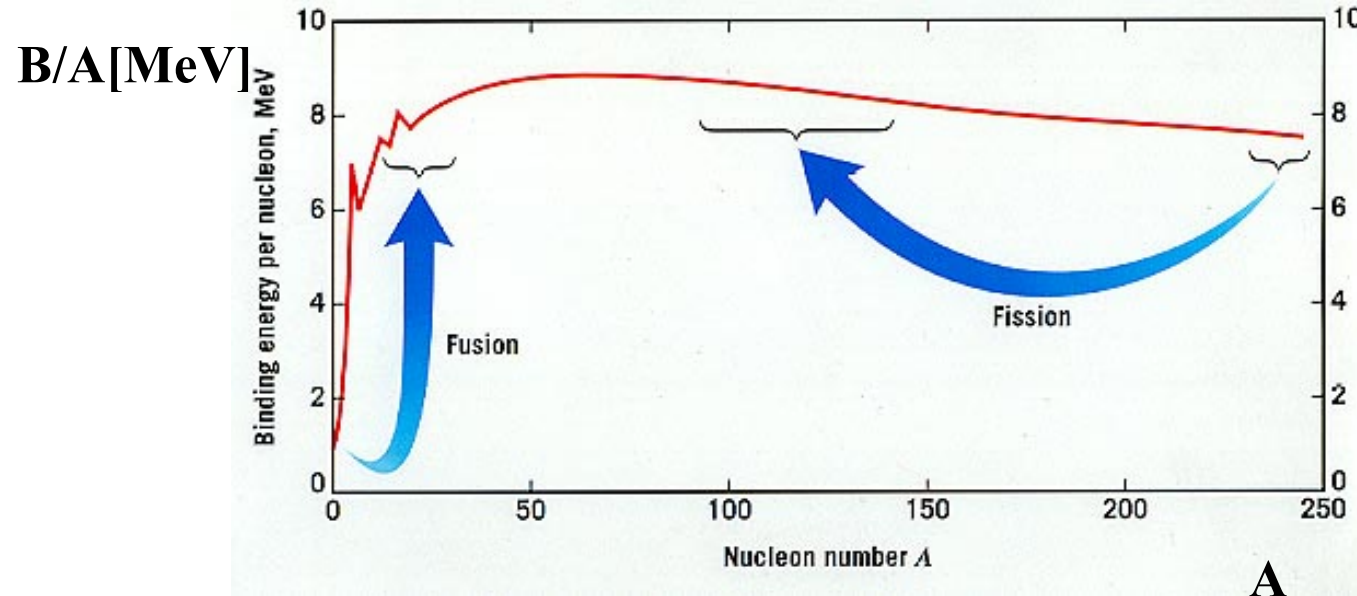
CNO jest dominującym procesem w większych gwiazdach

# Badanie procesów nukleosyntezy

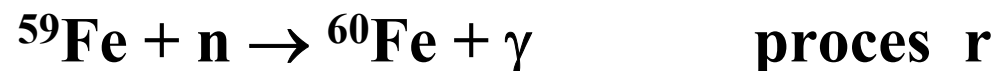
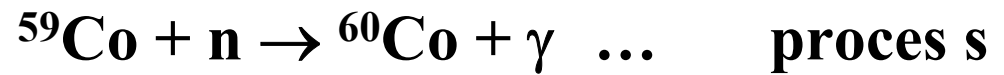
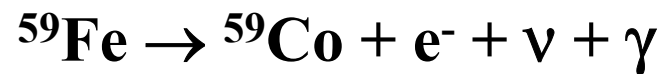
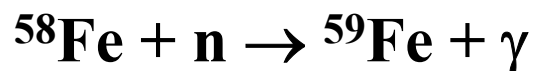
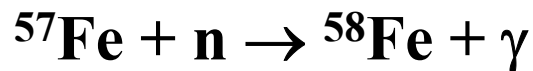
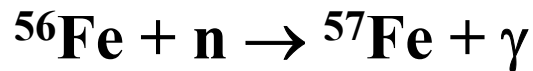
## 2. Wytwarzanie pierwiastków cięższych od żelaza – wybuch supernowej



The heavy elements beyond iron are predominantly produced in supernova explosions such as the one observed in 1987 (SN1987A).



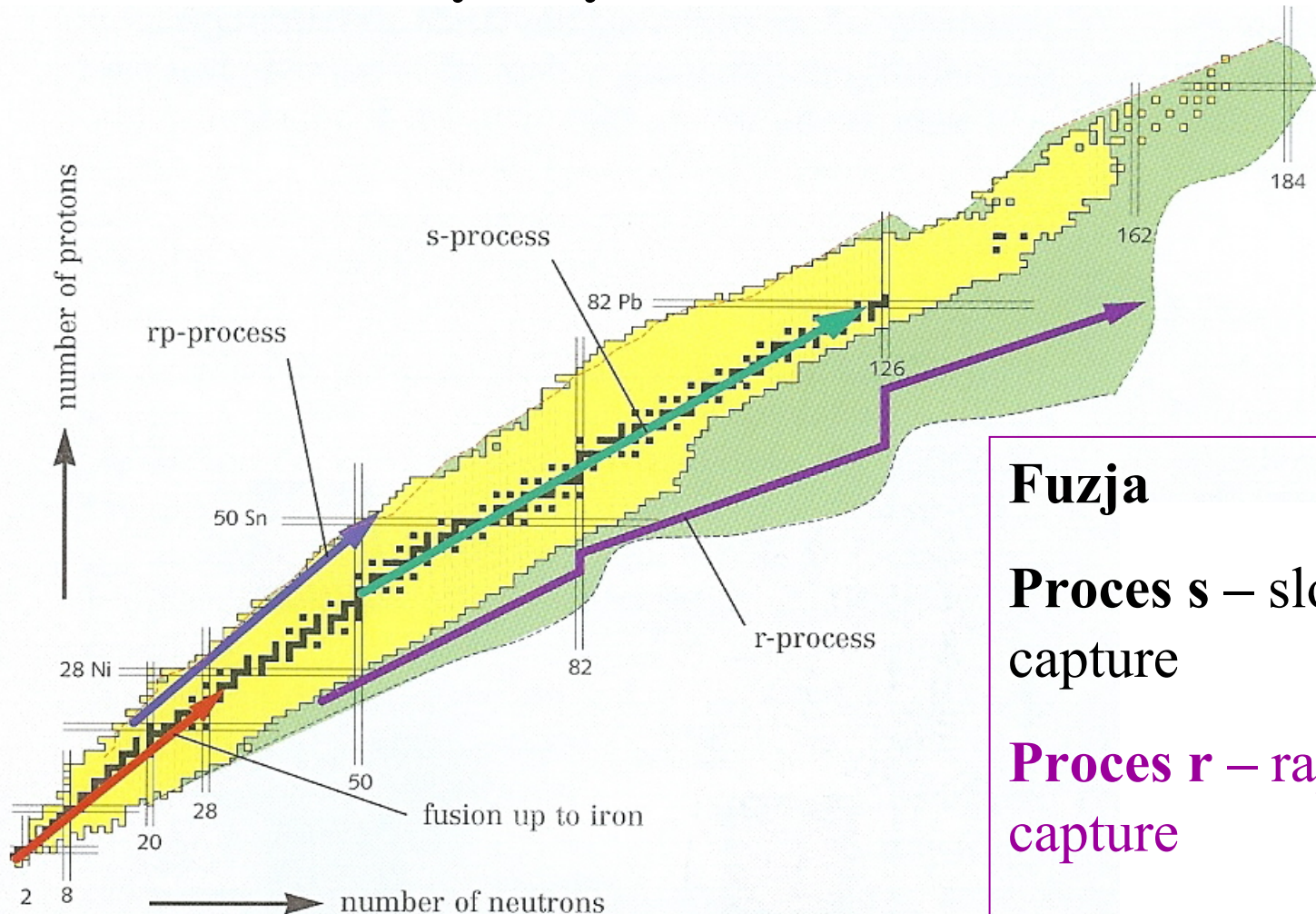
### Wychwył neutronów





# Badanie procesów nukleosyntezy

## 3. Badanie nukleosyntezy w laboratorium



**Fuzja**

**Proces s** – slow neutron capture

**Proces r** – rapid neutron capture

**Proces rp** – rapid proton capture

**Wiązki izotopów radioaktywnych**

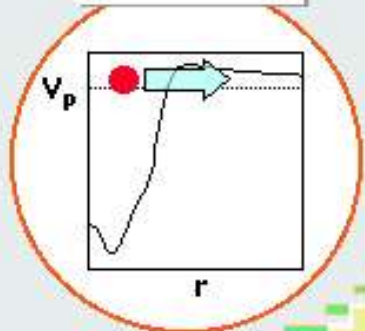
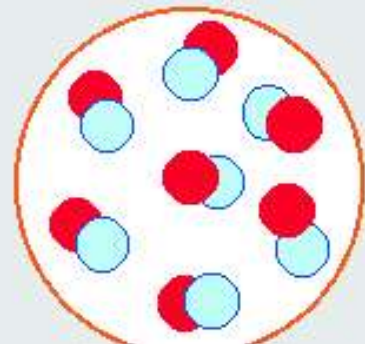
nuklidy stabilne lub długożyciowe

*terra incognita*

emitory protonowe

nuklidy sztucznie wytworzone

Znikanie struktury powłokowej



protony

pary p-n

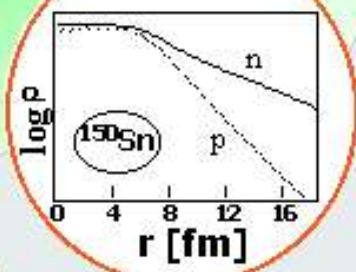
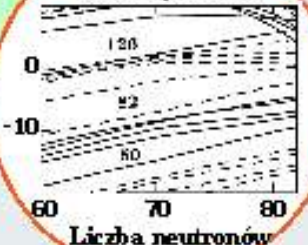
2 8 20 28 50 82 126

50

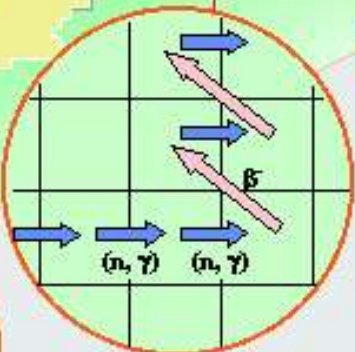
82

126

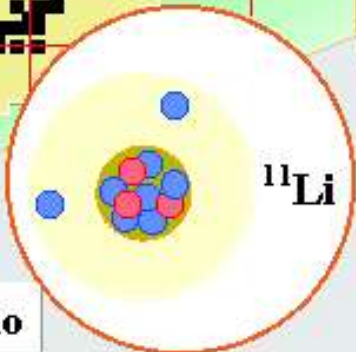
izobary A=120



skóry neutronowe

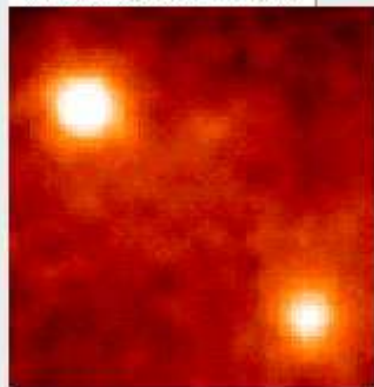


proces r



halo

gwiazdy neutronowe



neutrony