

Reakcje jądrowe

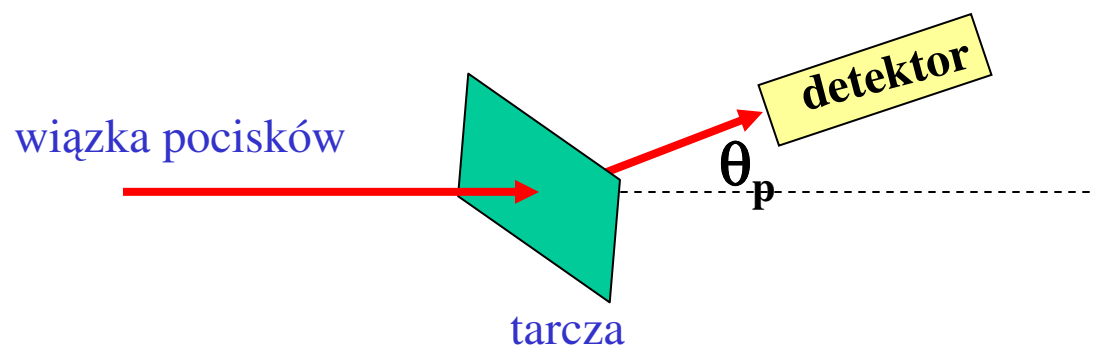


kanał wejściowy

kanał wyjściowy

- Reakcje wywołane przez nukleony - mechanizm reakcji
- Wielkości mierzone
- Reakcje wywołane przez ciężkie jony
 - a) niskie energie pocisków
 - b) pośrednie energie pocisków
 - c) wysokie energie pocisków

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej



Charakteryzują mechanizm reakcji:

energia wychodzących cząstek -

widmo energetyczne

kierunki emisji - rozkład kątowy

przekrój czynny (E_p) - krzywa wzbudzenia

Określenie mechanizmu reakcji

1. wymaga wyznaczenia wielu parametrów charakteryzujących dany proces
2. dodatkowe utrudnienie: zmieszanie mechanizmów
3. pomoc: stosowanie modeli reakcji
4. podstawowe modele reakcji:
 - a) reakcja wprost
 - b) reakcja przez jądro złożone

Reakcje wywołane przez nukleony

1. Rozpraszanie elastyczne $a + X \rightarrow a + X$

a) reakcja wprost

b) reakcja przez jądro złożone

2. Rozpraszanie nieelastyczne $a + X \rightarrow a' + X^*$

a) reakcja wprost

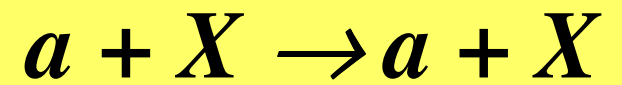
b) reakcja przez jądro złożone

3. Typowe reakcje wprost

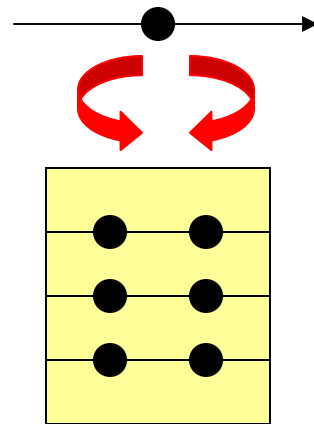
a) reakcja zderzenia i reakcja wychwyty

4. Typowe reakcje przez jądro złożone

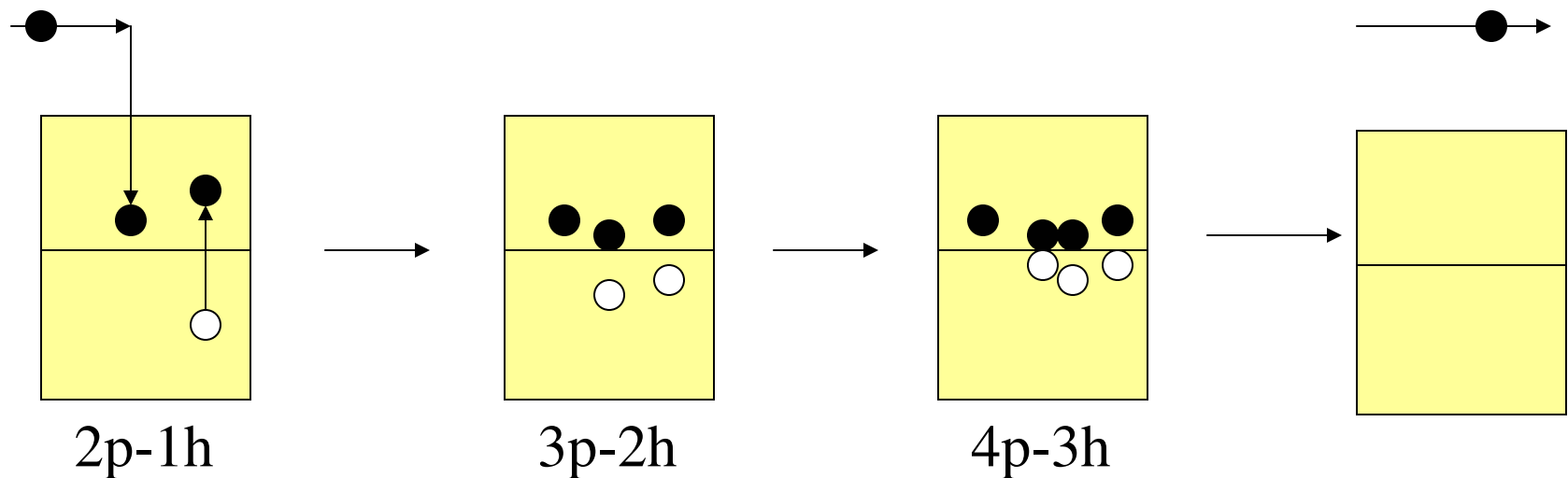
Rozpraszanie elastyczne



a) reakcja wprost

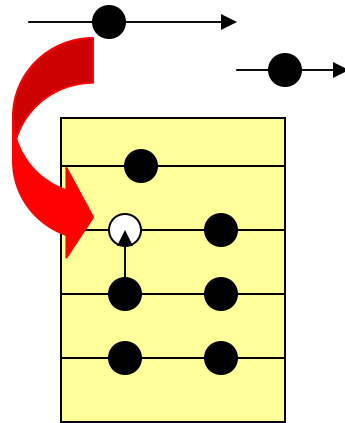


b) reakcja przez jądro złożone



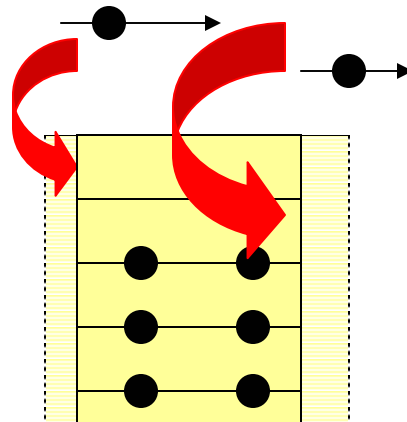
Rozpraszanie nieelastyczne $a + X \rightarrow a' + X^*$

reakcja wprost - wzbudzenie jednocząstkowe



$$\tau \approx 10^{-22} \text{ s}$$

reakcja wprost - wzbudzenie kolektywne



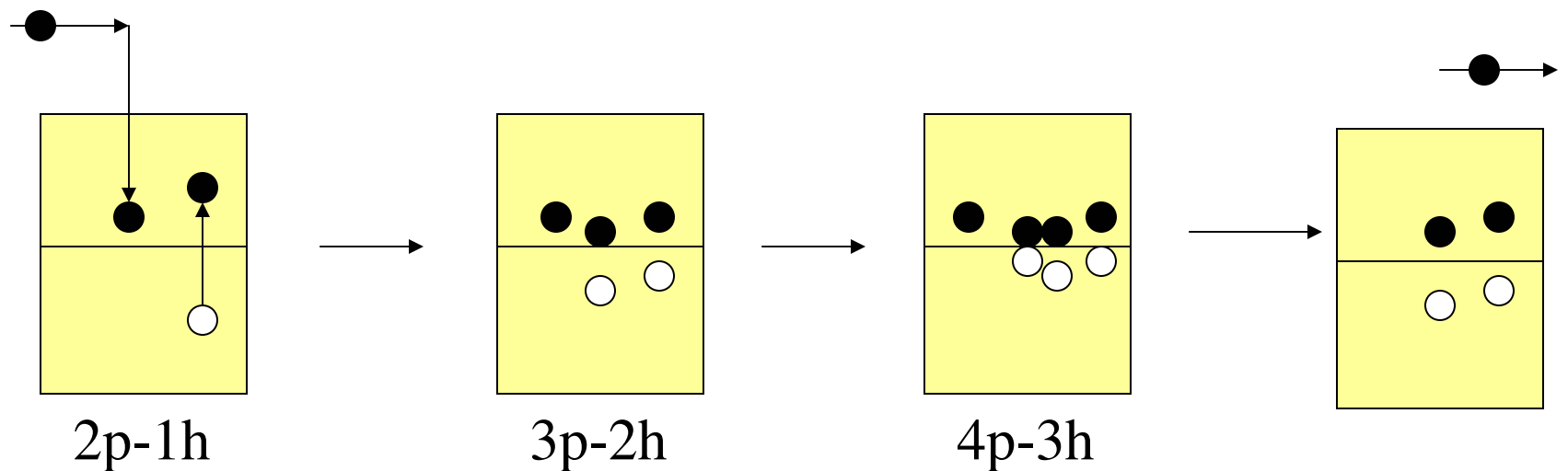
oscylacje,
rotacje,
rezonanse
gigantyczne

Rozpraszanie nieelastyczne $a + X \rightarrow a' + X^*$

reakcja przez jądro złożone

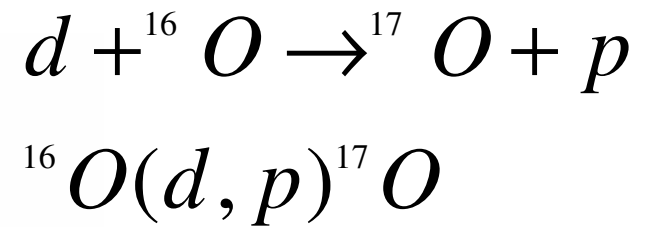
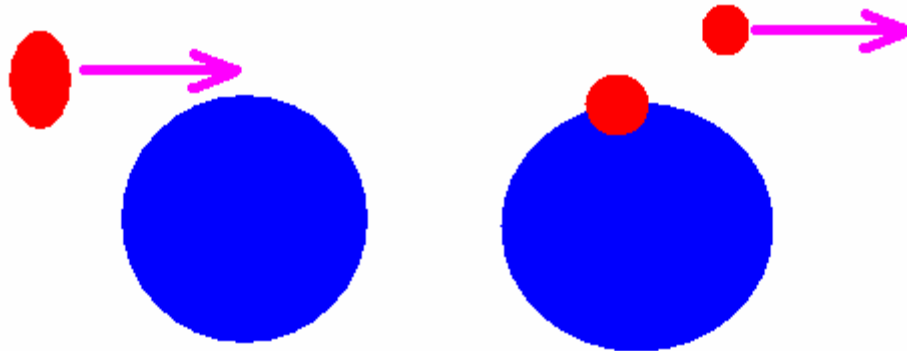


$$\tau \approx 10^{-16} \text{ s}$$



Typowe reakcje *wprost*

stripping



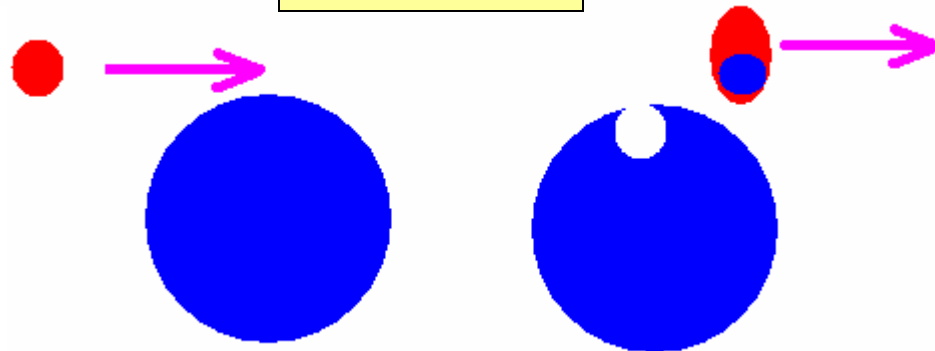
(p, d)

(p, α)

(d, α)

.....

pick-up



Cechy charakterystyczne reakcji wprost

- Emitowane cząstki mają wyższe energie niż dla reakcji przez jądro złożone
- Większość cząstek jest mało odchylonych od kierunku wiązki (*rozkład kątowy anizotropowy z maksimum dla małych kątów*)
- Słaba zmienność zależności przekroju czynnego z energią wiązki

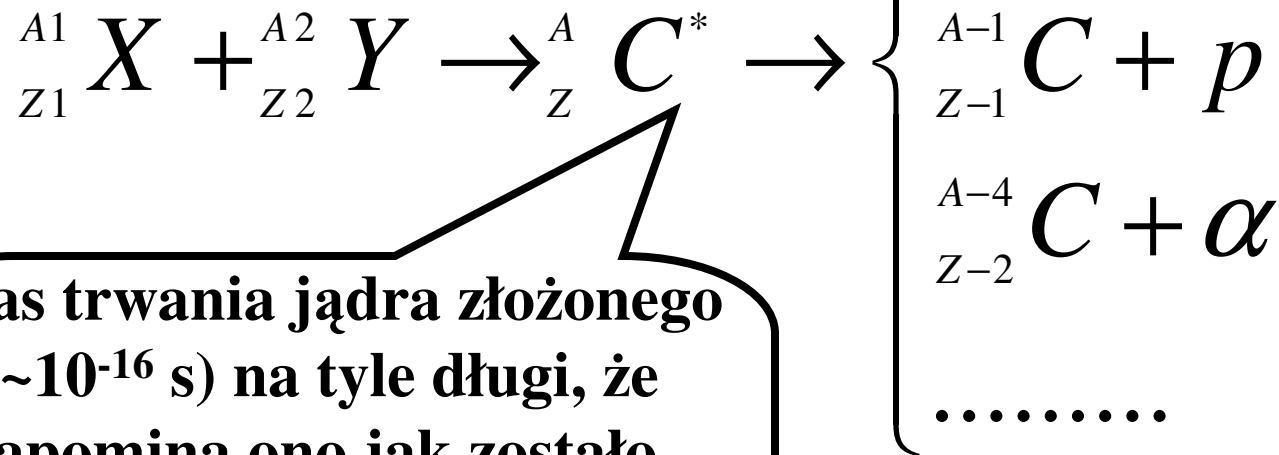
Reakcje wprost jako źródło informacji o strukturze jąder

- w szczególności informacje o strukturze jednocząstkowej:
 - energie wzbudzenia
 - liczby kwantowe
 - amplitudy jednocząstkowych składowych funkcji falowych
- reakcje strippingu - badanie stanów niezapełnionych i częściowo niezapełnionych stanów protonowych i neutronowych
- reakcje pick-up- badanie stanów zapełnionych

Typowe reakcje przez jądro złożone

$$A1 + A2 = A$$

$$Z1 + Z2 = Z$$



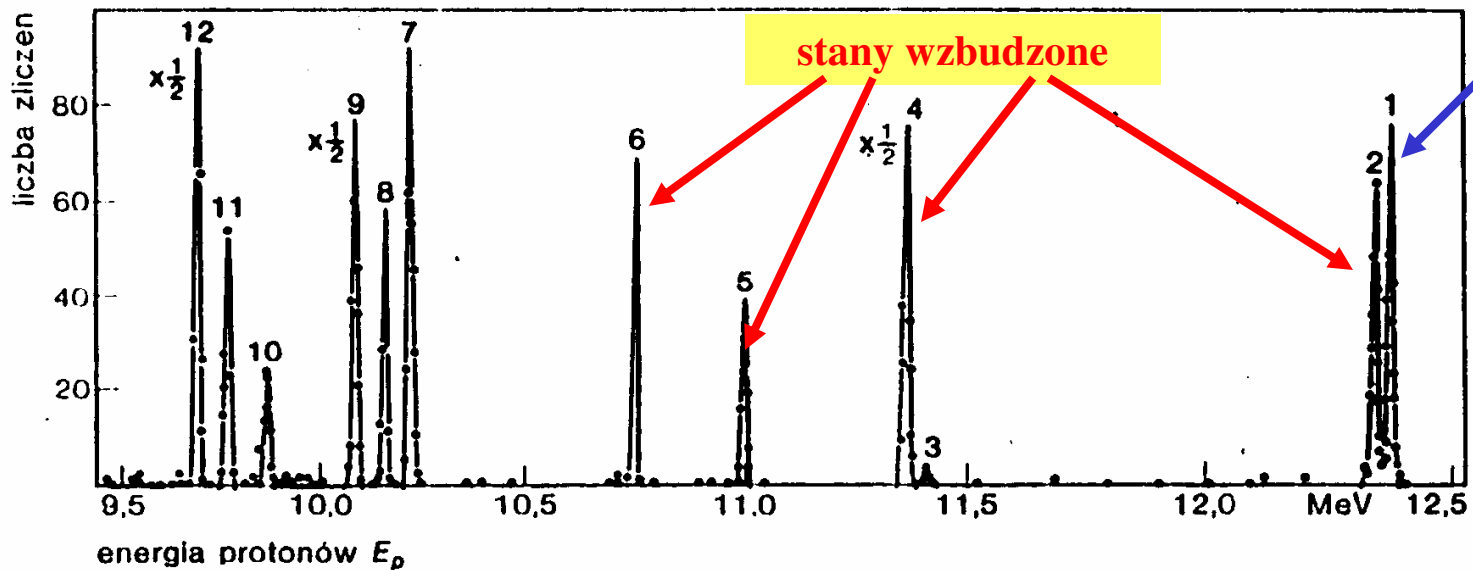
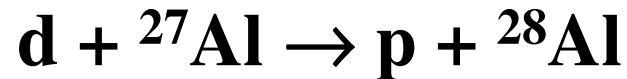
Czas trwania jądra złożonego ($\sim 10^{-16}$ s) na tyle długi, że zapomina ono jak zostało wytworzone i rozpada się zgodnie z dostępną energią i momentem pędu

Cechy charakterystyczne reakcji przez jądro złożone

- Emitowane cząstki mają niskie energie
- Cząstki są emitowane równomiernie dla wszystkich kątów względem kierunku wiązki (*rozkład kątowy izotropowy, symetryczny względem 90°*)
- Rezonansowa zależność przekroju czynnego od energii wiązki

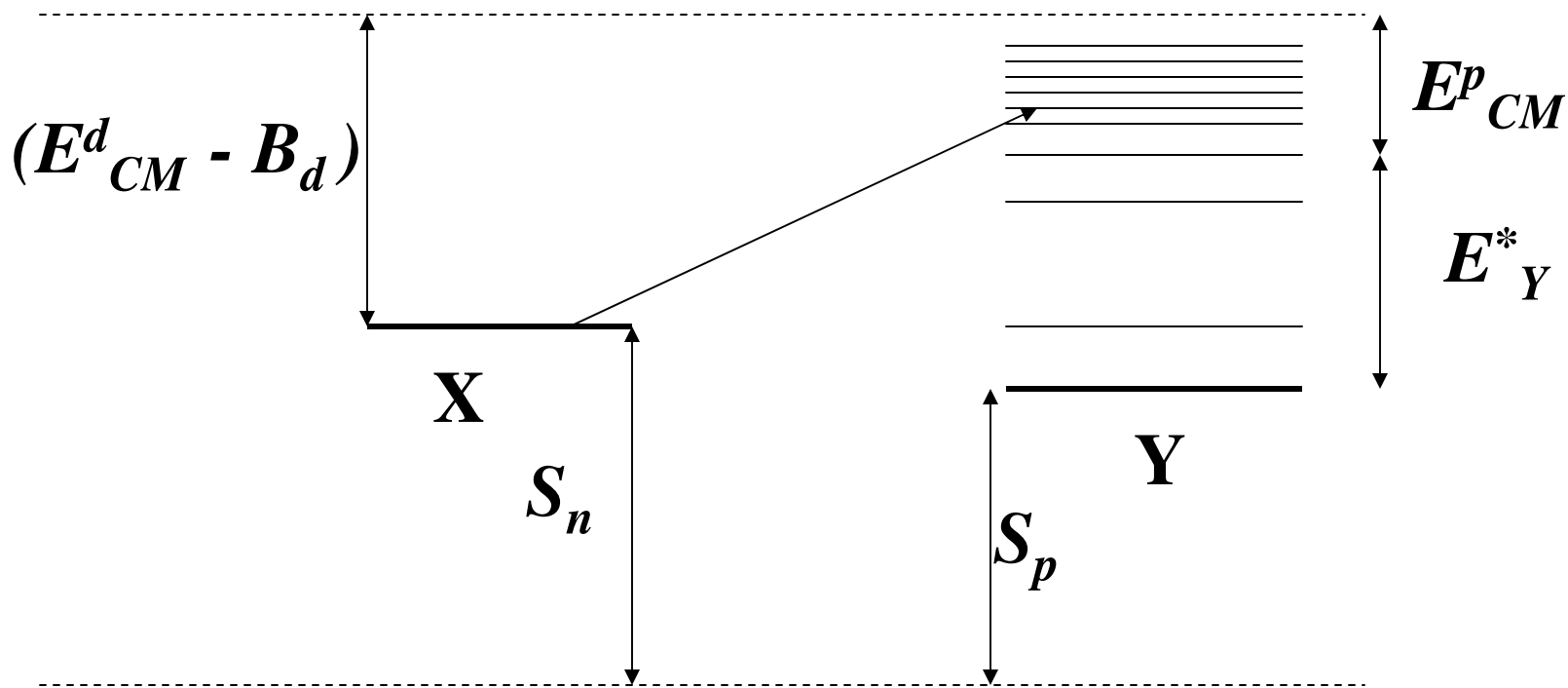
Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Energie wychodzących cząstek (kwantów γ) -
widmo energetyczne $N_p = N_p(E_p)$



reakcja wprost

Schemat poziomów a widmo energetyczne $N_p = N_p(E_p)$ w reakcji strippingu

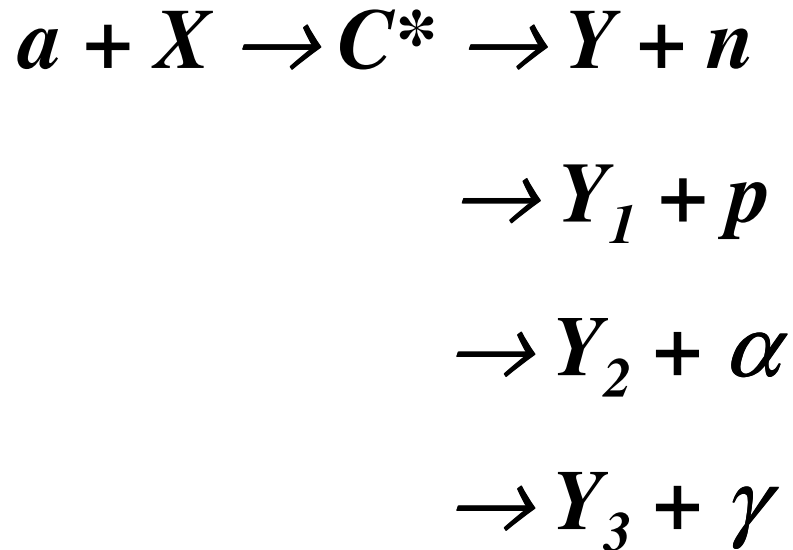


Maksymalna energia cząstki p: $E^{p \max}_{CM} = E^d_{CM} + S_n(Y) - B_d$

Energia cząstki p: $E^p_{CM} = E^{p \max}_{CM} - E^*_Y$

Ciepło reakcji $X(d,p)Y$ $Q = S_n(Y) - B_d$

Rozpad jądra złożonego

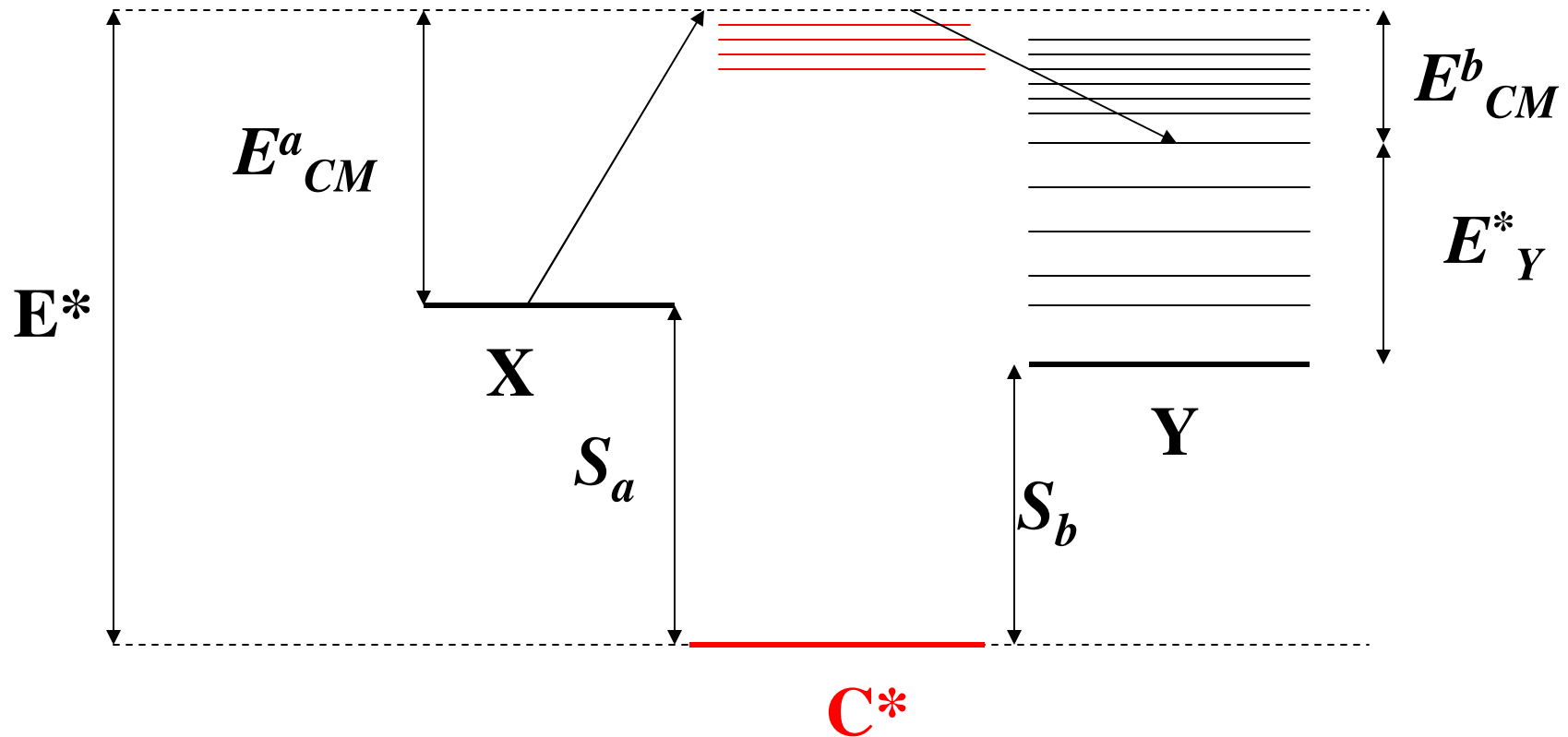


Czas trwania jądra złożonego ($\sim 10^{-16}$ s) na tyle długi, że zapomina ono jak zostało utworzone i rozpada się zgodnie z dostępną energią i momentem pędu

hipoteza niezależności: $\sigma [X(a,b)Y] = \sigma_C(a) P_C(b)$

Rozpad z emisją kwantu γ jest 1000 razy mniej prawdopodobny !

Schemat poziomów a widmo energetyczne $N_p = N_p(E_p)$ w reakcji przez jądro złożone

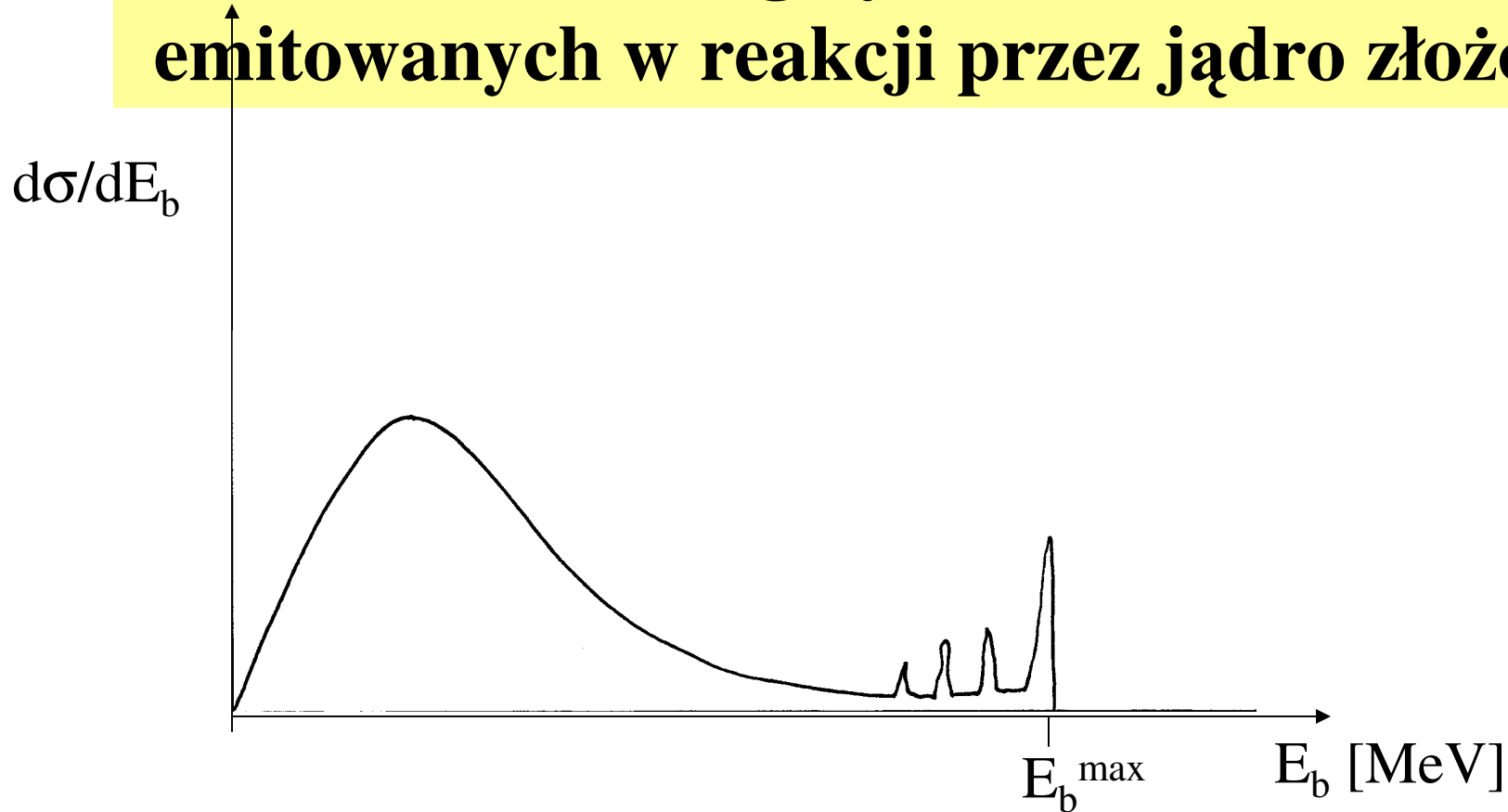


Maksymalna energia cząstki b: $E^{b \max}_{CM} = E^a_{CM} + S_a(C) - S_b(C)$

Energia cząstki b: $E^b_{CM} = E^{b \max}_{CM} - E^*_Y$

Ciepło reakcji $X(a,b)Y$ $Q = S_a(C) - S_b(C)$

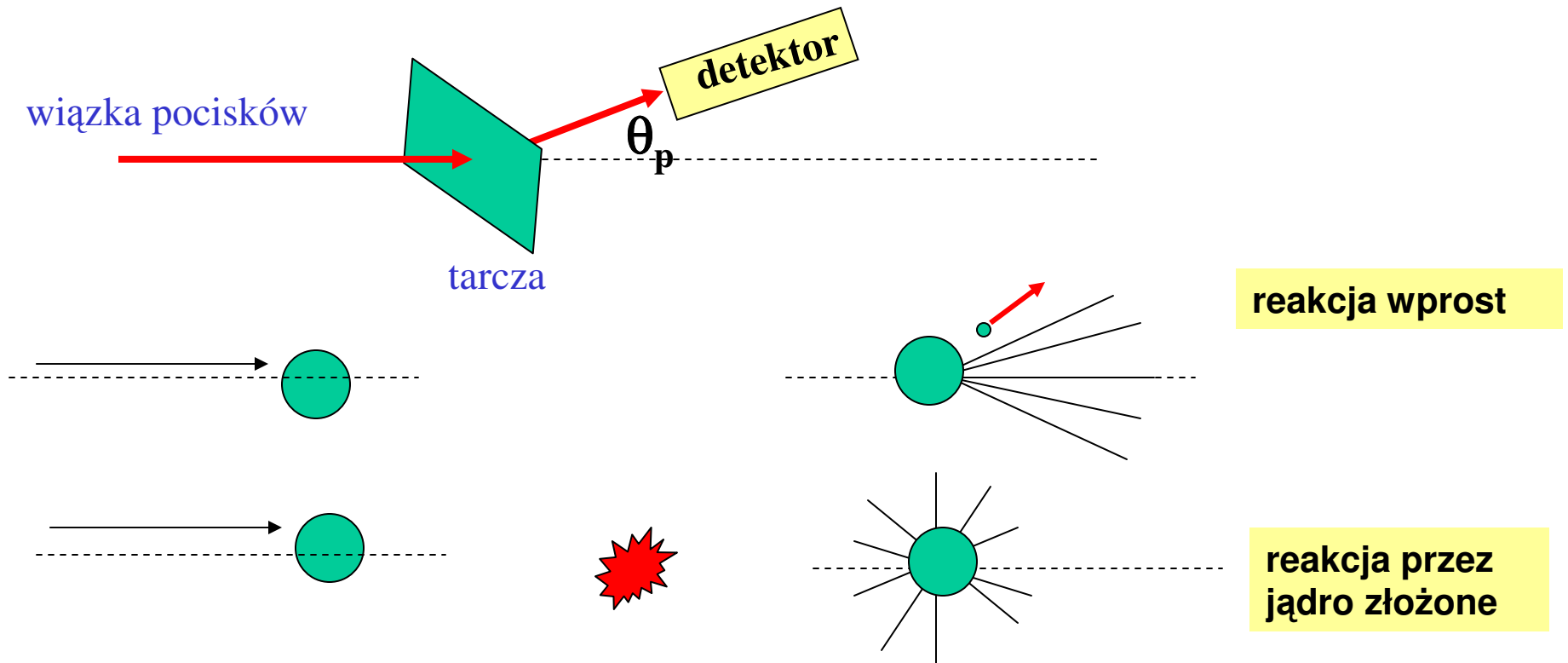
Widmo energetyczne neutronów emitowanych w reakcji przez jądro złożone



- a) przejście do stanu podstawowego Y
- b) przejście do dyskretnych stanów wzbudzonych
- c) obszar zachodzących na siebie poziomów jądra Y

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

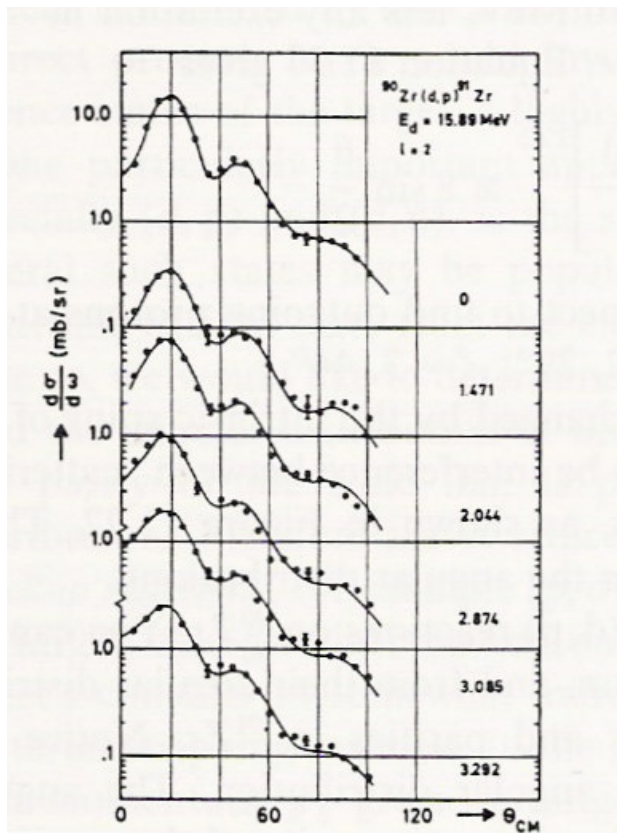
Kierunki emisji wychodzących cząstek
- rozkład kątowy $N_p = N_p(\theta_p)$



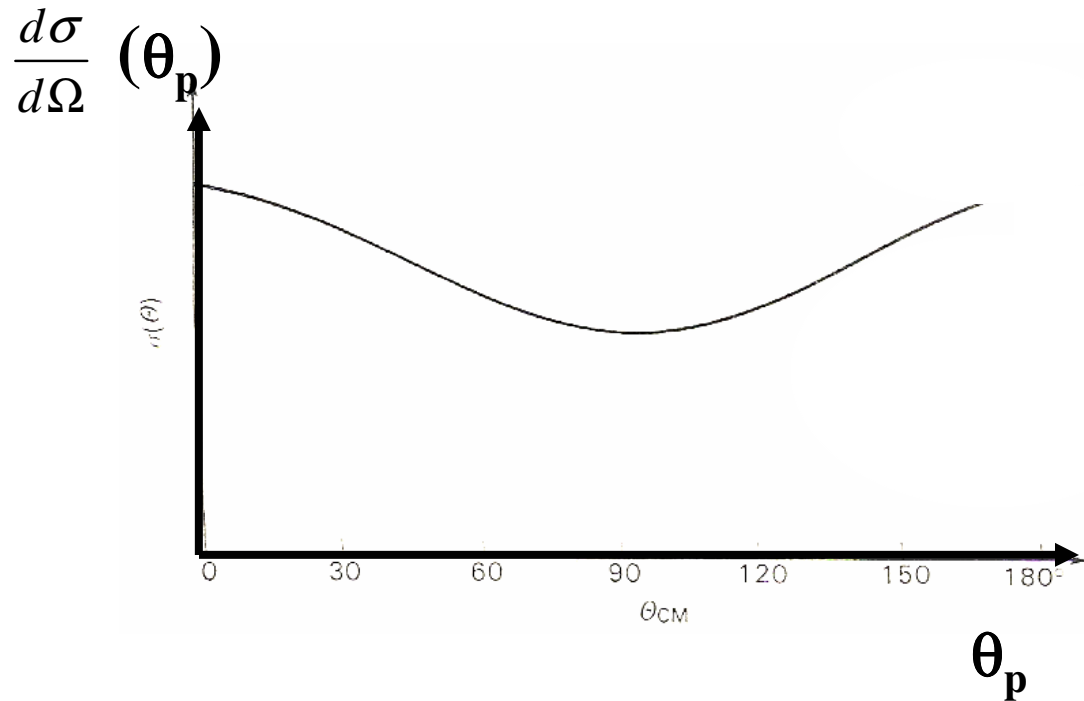
Różny kształt dla różnych mechanizmów reakcji

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Rozkład kątowy produktów reakcji



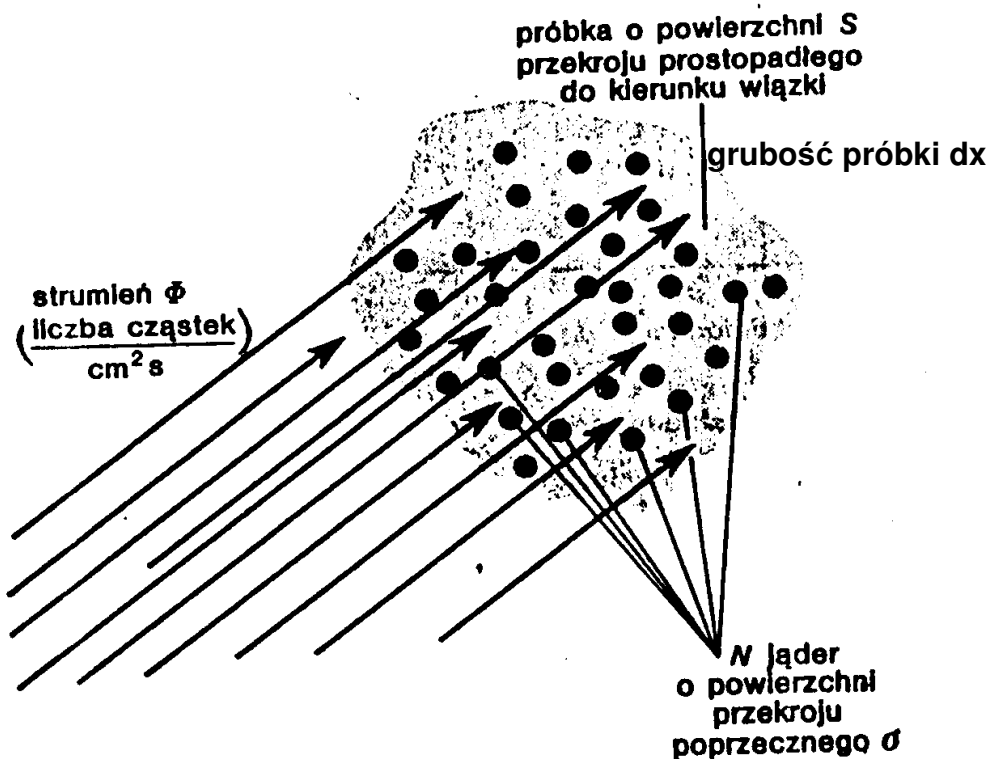
reakcja wprost



reakcja przez jądro złożone

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Przekrój czynny σ reakcji i jego zależność od energii pocisku $\sigma(E)$ (*funkcja wzbudzenia*)



N jąder w jednostce objętości

Pola zasłonięte przez wszystkie jądra = $\sigma N S dx$

$d\Phi$ cząstek zderza się z jądrami

Prawdopodobieństwo oddziaływania

$$d\Phi / \Phi = - \sigma N S dx / S$$

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\sigma N x}$$

Przekrój czynny σ reakcji

Jeśli osłabienie wiązki po przejściu przez tarczę nie jest duże, tzn. $\Phi(x) \approx \Phi_0$ ($N \sigma x \ll 1$) to

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-N \sigma x) \approx \Phi_0 (1 - N \sigma x + \dots) \approx \Phi_0 (1 - N \sigma x)$$

Stąd dla „cienkiej” tarczy

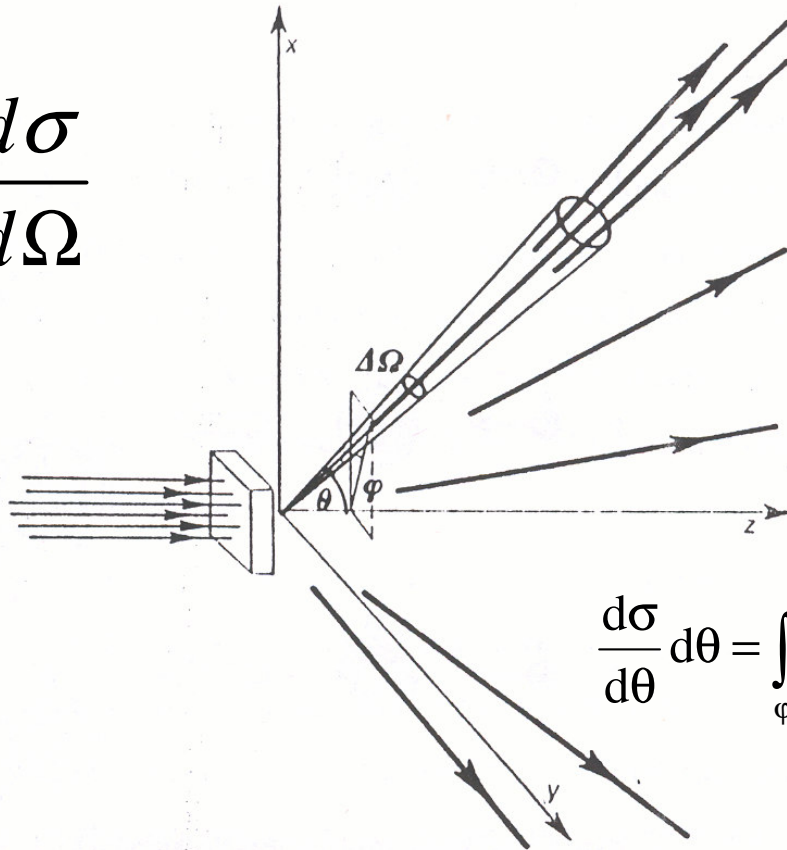
$$\sigma \approx (\Phi_0 - \Phi(x)) / \Phi_0 N x$$

Przekrój czynny σ na oddziaływanie wiązki cząstek padających o natężeniu Φ_0 z tarczą o znanym Nx można wyznaczyć mierząc $\Phi(x)$.

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Różniczkowy przekrój czynny (rozkład kątowy danego produktu reakcji)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}$$



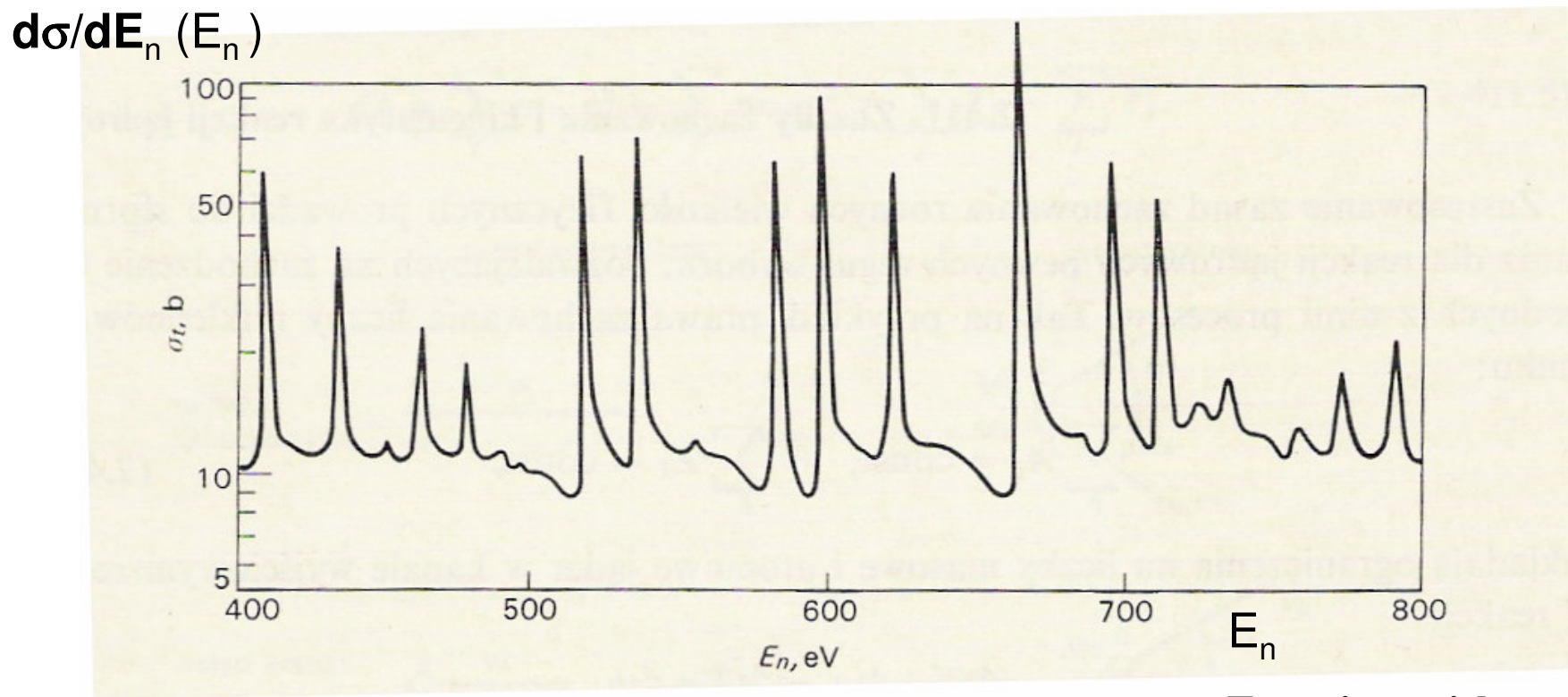
Element kąta bryłowego we współrzędnych sferycznych
 $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$

Na ogół oddziaływania charakteryzują się symetrią osiową wzgl kierunku padania wiązki cząstek, wtedy

$$\frac{d\sigma}{d\theta} d\theta = \int_{\varphi} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{d\sigma}{d\Omega} = 2\pi \sin\theta d\theta \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Zależność różniczkowego przekroju czynnego od energii pocisku - krzywa (funkcja) wzbudzenia



Energia pocisku

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Skład produkowanych cząstek
Ilość cząstek danego typu (krotność)
Korelacje pomiędzy cząstkami

Wielkości mierzone lub odtwarzane

- Ładunek, masa, spin, parzystość
- Kierunek emisji (kąt rozproszenia)
- Pęd lub energia kinetyczna
- Pęd poprzeczny
- Pęd podłużny
- Pospieszność (*rapidity*)

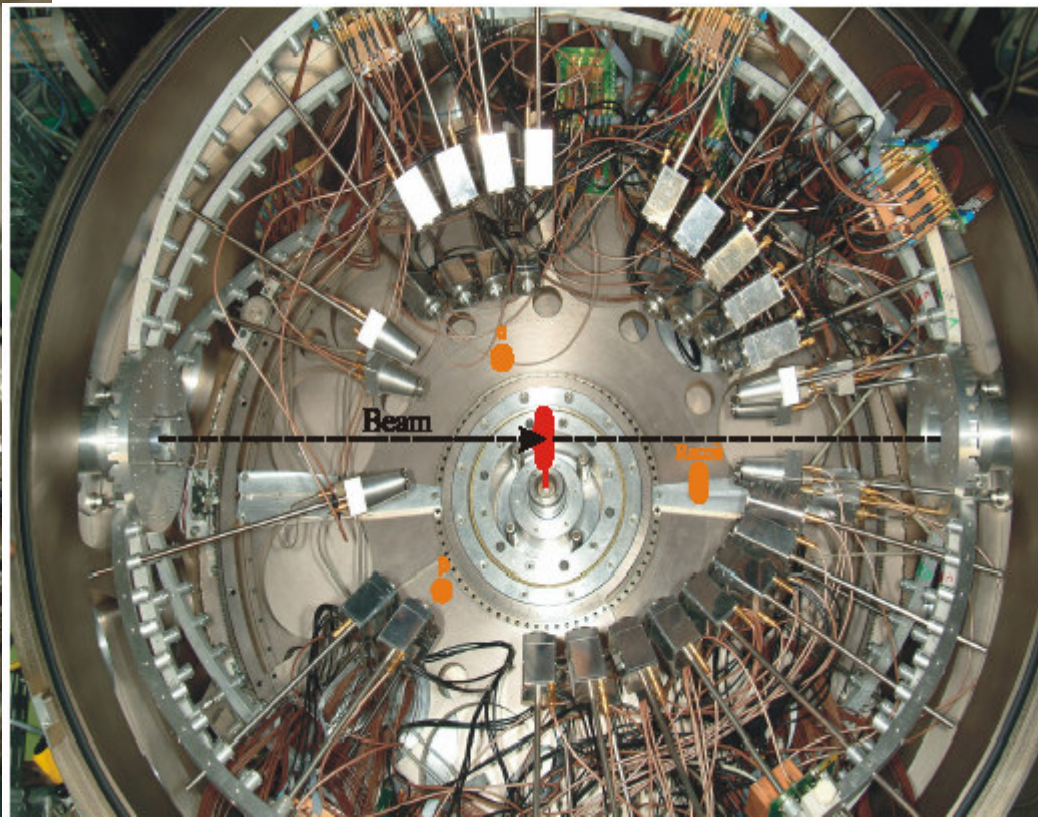
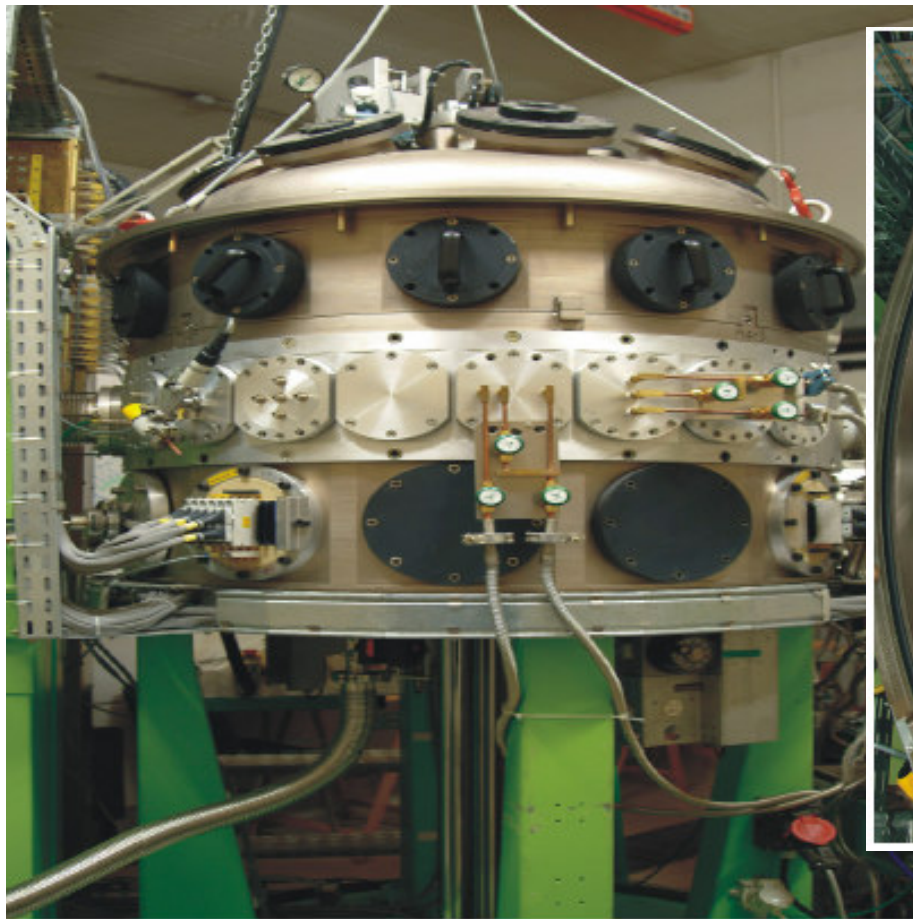
Energia całkowita

relatywistyczny
odpowiednik
prędkości
(addytywność)

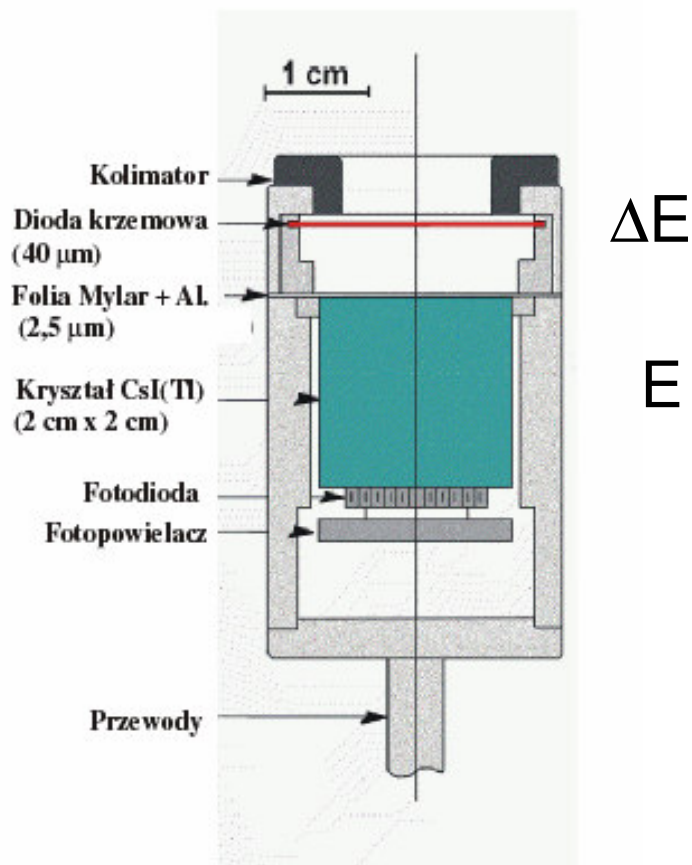
$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_{\parallel} c}{E - p_{\parallel} c} \right)$$

Wydzielenie kanału (grupy kanałów) reakcji – detekcja lekkich cząstek naładowanych: p i α

Komora układu ICARE widok z boku i z góry
(od 2007 w Warszawskim Cyklotronie)



Wydzielenie kanału (grupy kanałów) reakcji – detekcja lekkich cząstek naładowanych: p i α



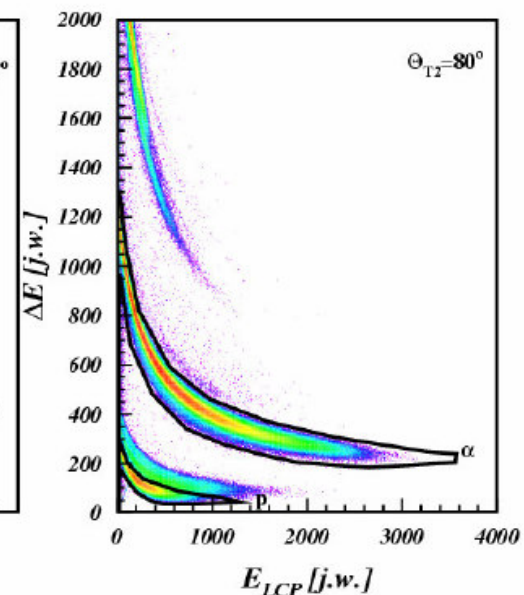
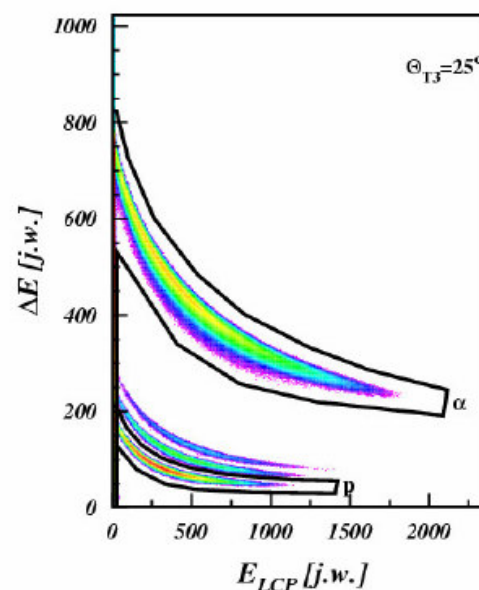
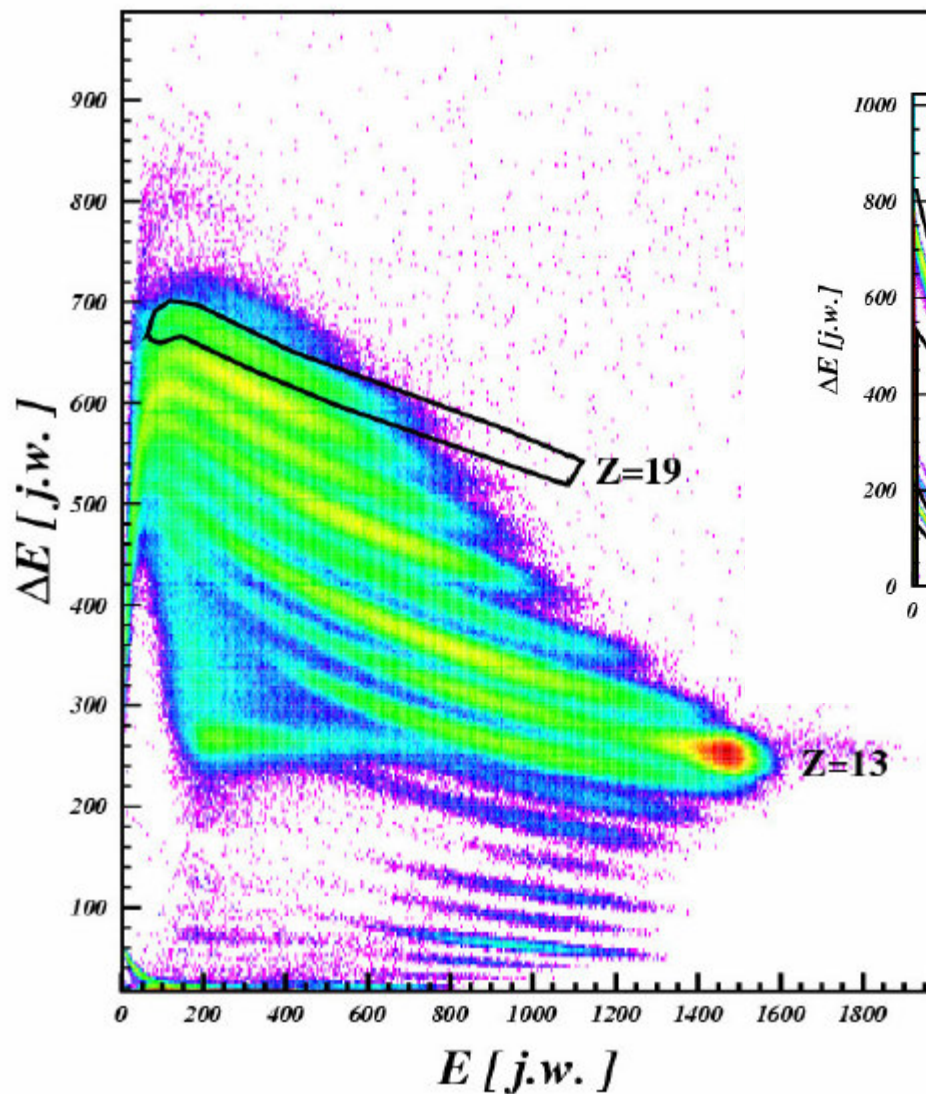
Detektory
teleskopowe

$$E \Delta E \sim Z^2 M$$

$144 \text{ MeV } ^{27}\text{Al} + ^{19}\text{F} \Rightarrow ^{46}\text{Ti}^*$

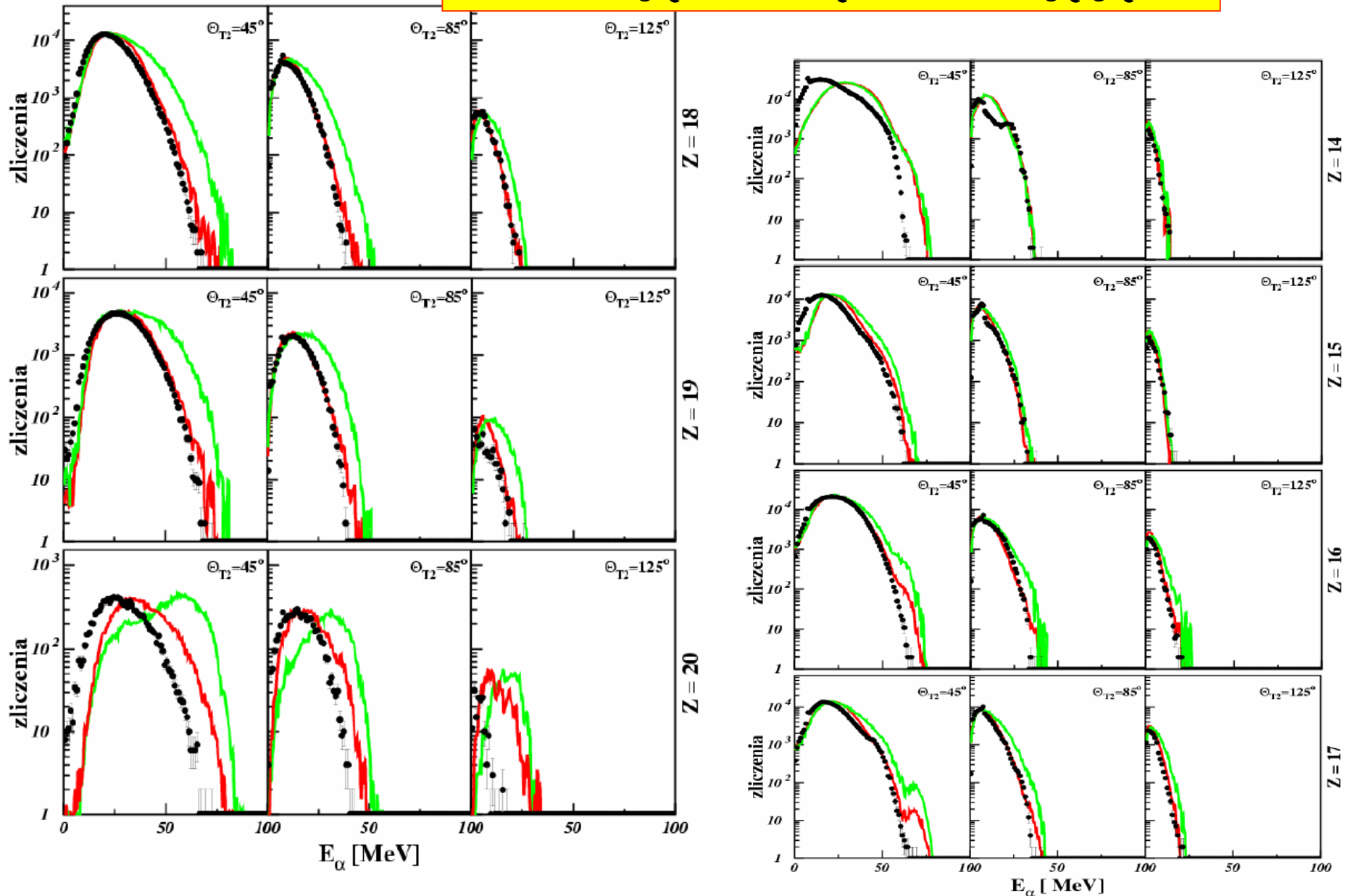
$I_{\text{max}} \approx 35 \hbar, E^* = 85 \text{ MeV}$

Bramkowanie



Widma cząstek alfa

– wskazują na dużą deformację jądra



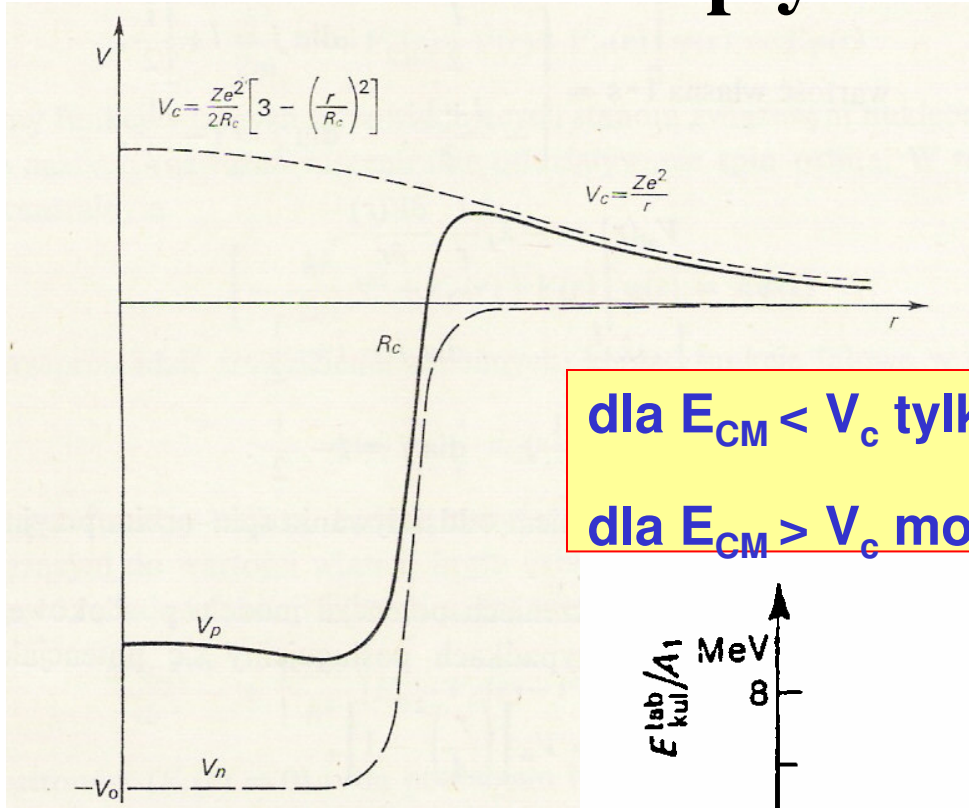
Reakcje wywołane przez ciężkie jony

1. Duży ładunek jądra jonu
2. Duża masa jonu
3. Duży pęd jonu
4. Duży moment pędu jonu

Zakresy energii pocisków:

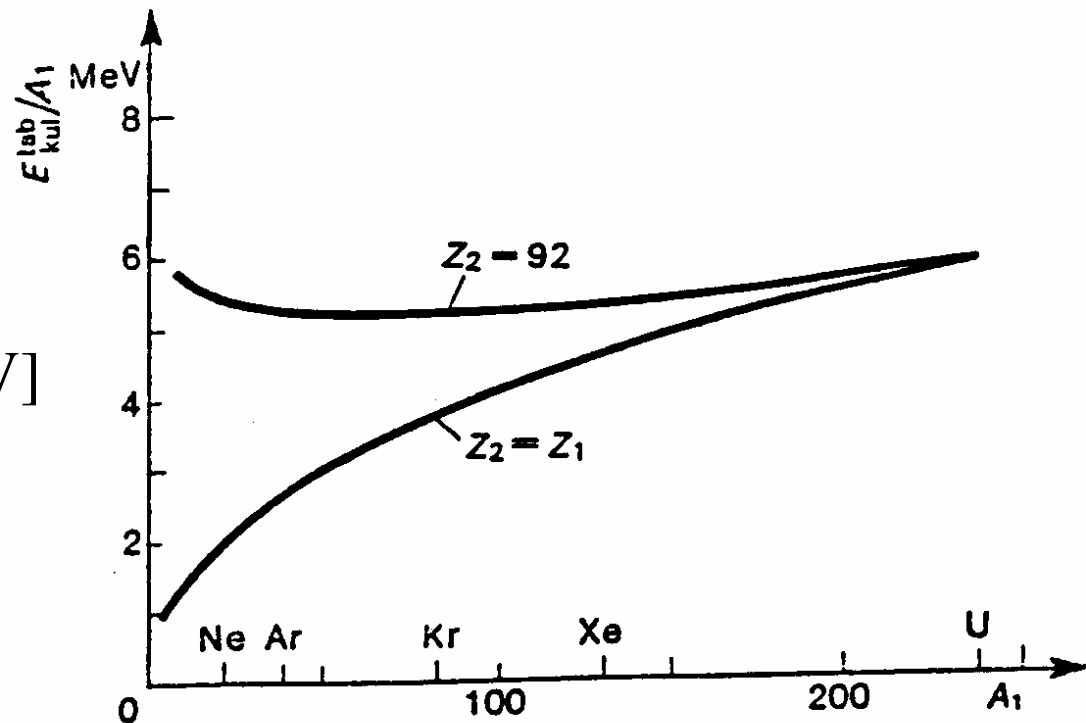
1. energie niskie: do ok. 10 MeV/u
2. energie pośrednie
3. energie wysokie: kilkaset do kilku tysięcy MeV/u

Wpływ bariery kulombowskiej

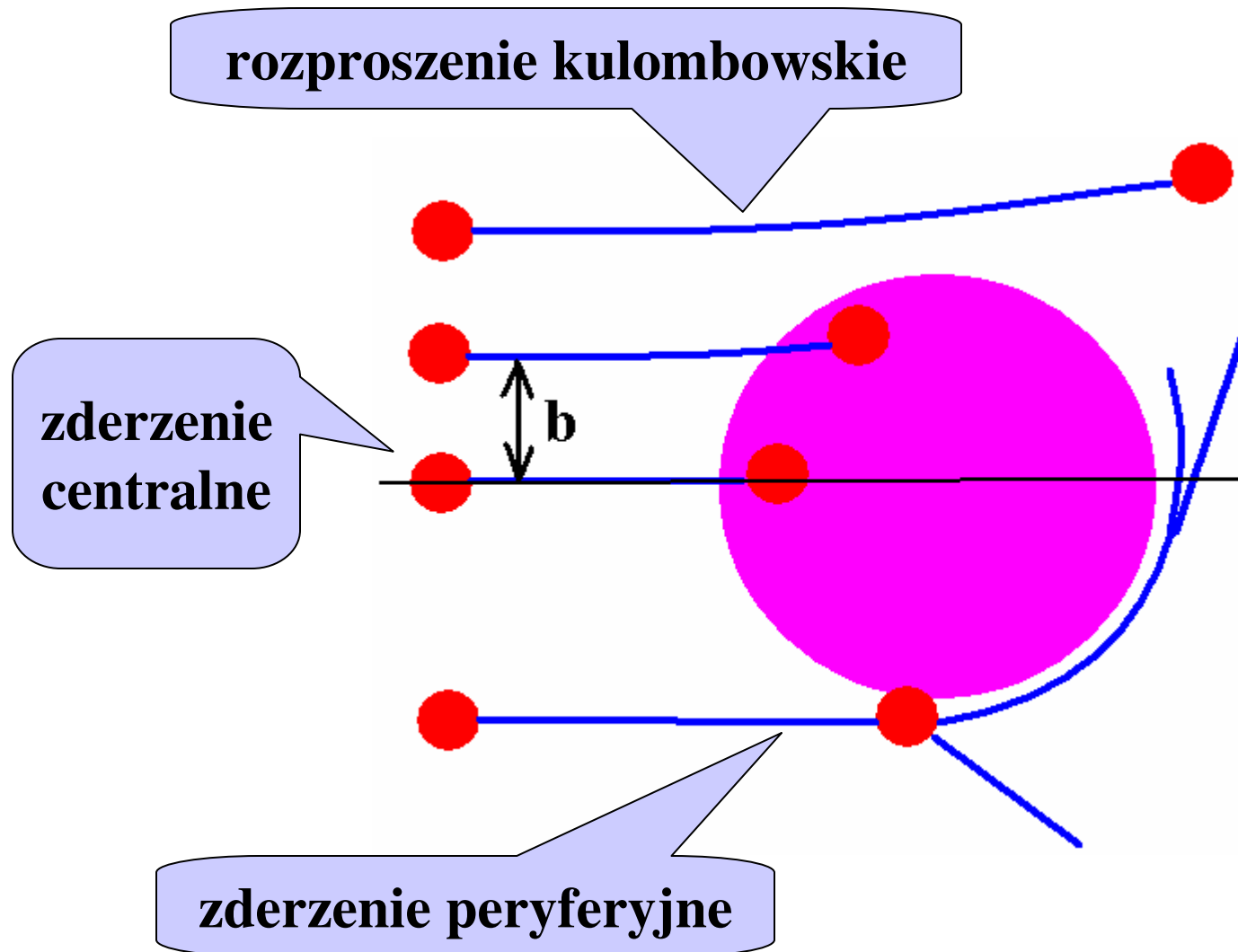


dla $E_{CM} < V_c$ tylko oddziaływanie kulombowskie
 dla $E_{CM} > V_c$ może zajść reakcja jądrowa

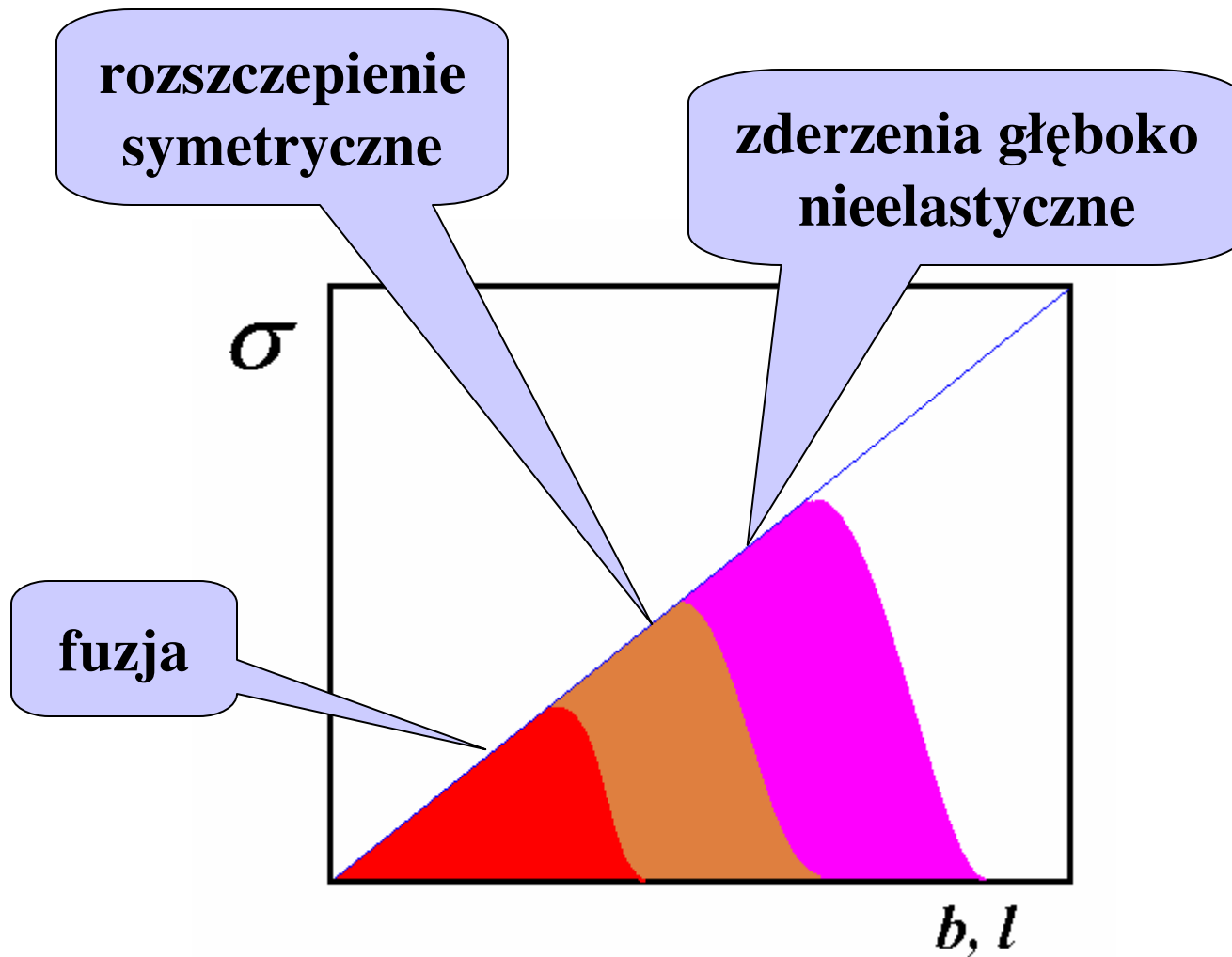
$$V_c = 1.44 Z_1 Z_2 / R \text{ [MeV]}$$



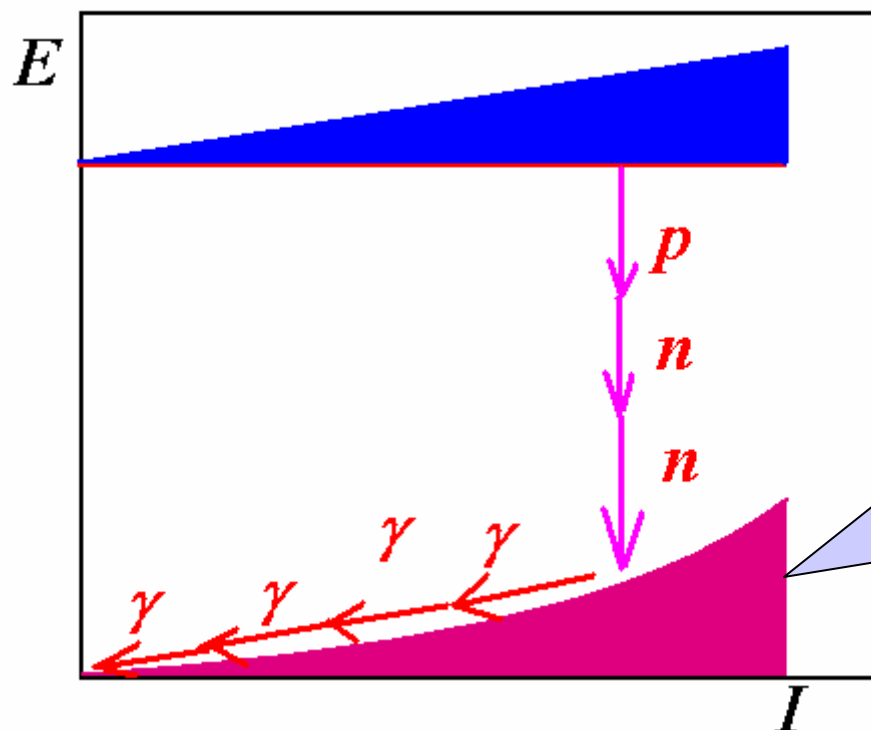
Kinematyka: wpływ parametru zderzenia



Podział przekroju czynnego - wpływ przekazanego momentu pędu

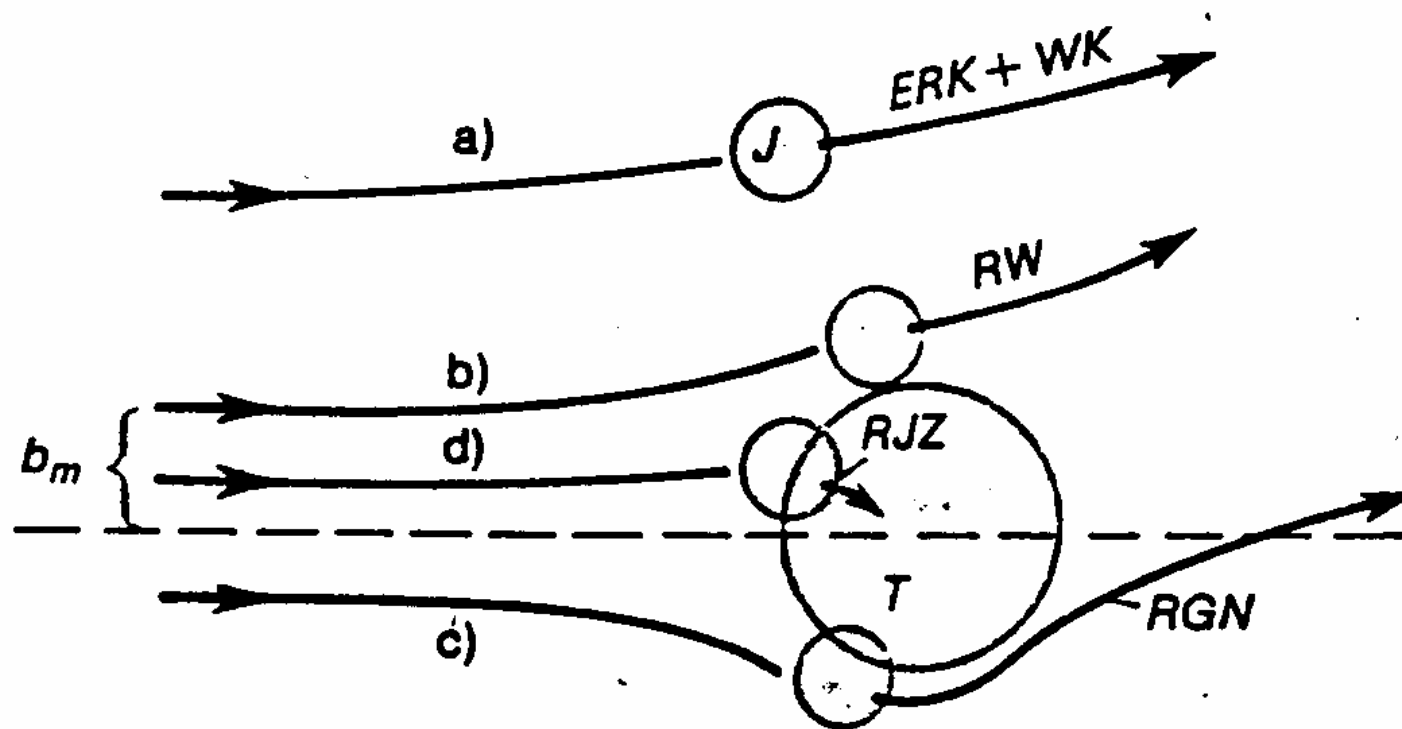


Rozpad jądra wzbudzonego



Linia γ rast:
linia
najmniejszej
energii stanów
jądrowych dla
danego spinu

Mechanizm reakcji przy niskich energiach



Mechanizm reakcji przy niskich energiach

a) duże parametry zderzenia

- rozproszenie elastyczne (wzór Rutherforda)

- rozproszenie nieelastyczne tzw. wzbudzenie kulombowskie

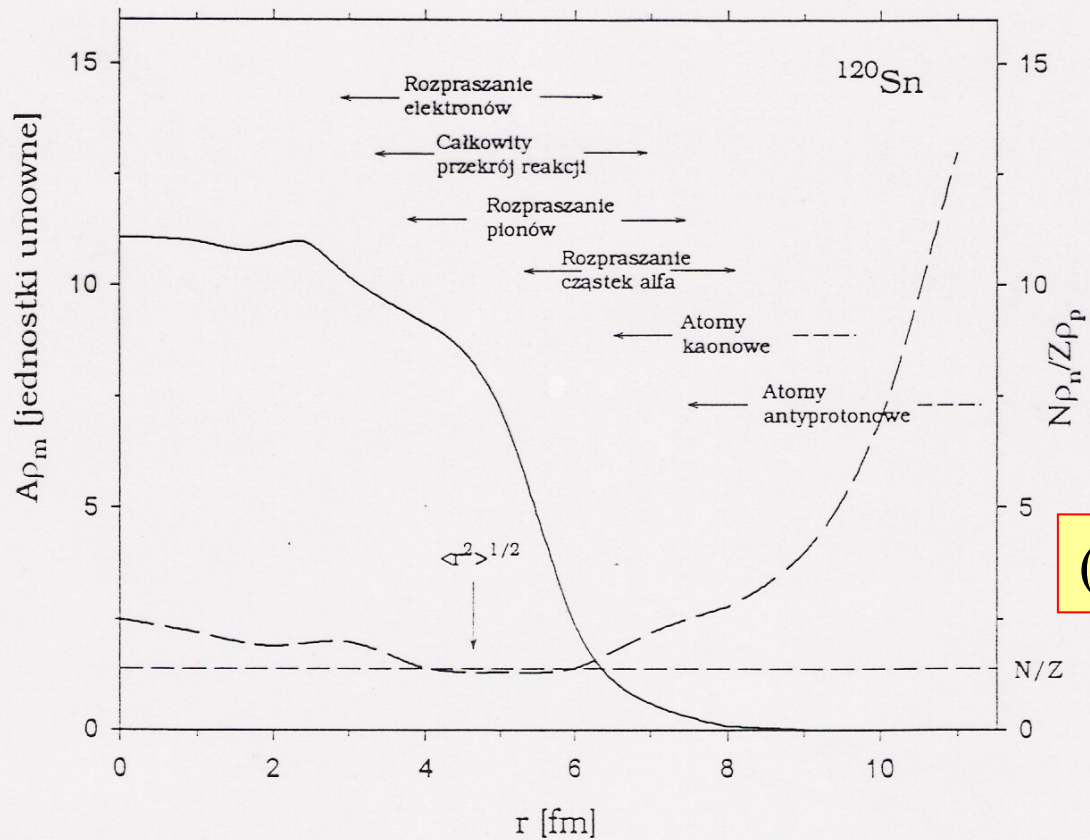
działanie bardzo silnego pola elektrycznego - deformacja

jądra i jego obrót - wzbudzenia kolektywne

Wzbudzenie kulombowskie jądra

1. Prawdopodobieństwo wzbudzenia kulombowskiego jądra rośnie ze wzrostem energii padającej cząstki i wzrostem jej masy
2. Minimalna odległość zbliżenia jąder tarczy i pocisku ($d_{\min} = R_1 + R_2 + 5 \text{ fm}$) - bezpieczna energia pocisku
3. Obserwacja wzbudzenia w jednym z jąder, drugie powinno być magiczne lub sferyczne
4. Mała długość fali de Broglie'a - opis klasyczny zderzenia
5. Mały przekaz energii
6. Silne wzbudzenie stanów kolektywnych

Badanie rozkładu materii w jądrze



$$(d_{\min} = R_1 + R_2 + 5\text{fm})$$

Rys. 3.3. Rozkład całkowitej, ρ_m , (linia ciągła) i względnej, (ρ_n/ρ_p) , (linia przerywana) gęstości materii w jądrze ^{120}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.

Mechanizm reakcji przy niskich energiach

b) parametr zderzenia - odpowiadający “muśnięciu”

- reakcje wprost

oddziaływanie tylko między kilkoma nukleonami na powierzchni jąder:

reakcja wybicia - knock out $X(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O} n) Y$

reakcja zdarcia - stripping $X(^{16}\text{O}, ^{15}\text{O}) Y$

reakcja wychwytu - pick up $X(^{16}\text{O}, ^{18}\text{F}) Y$

reakcja wymiany - exchange $X(^{16}\text{O}, ^{16}\text{N}) Y$

Mechanizm reakcji przy niskich energiach

c) mały parametr zderzenia

- zderzenie głęboko nieelastyczne

przekazanie znacznej ilości energii i momentu pędu od ruchu względnego do wewnętrznych stopni swobody obu jąder

wymiana pewnej liczby nukleonów

Mechanizm reakcji przy niskich energiach

d) bardzo mały parametr zderzenia

- reakcja syntezy (fuzji)

pełne przekazanie energii i momentu pędu

energia rozłożona między wszystkie nukleony - powstaje
jądro złożone