

Reakcje jądrowe

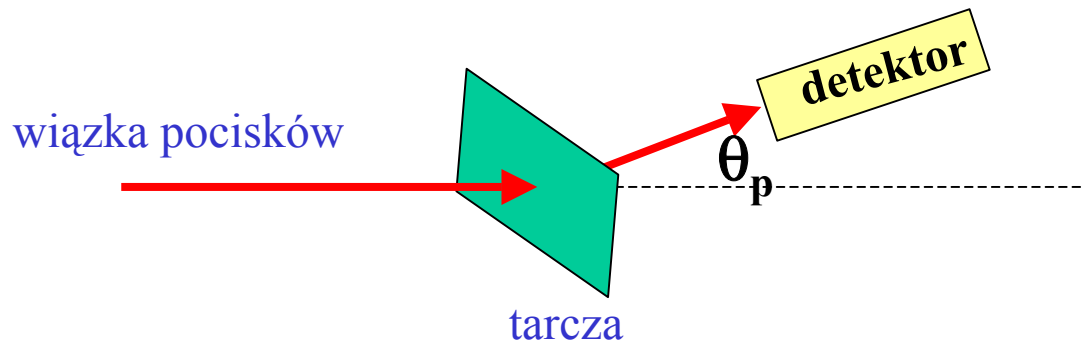


kanał wejściowy

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 - 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

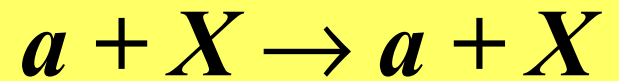
b) reakcja przez jądro złożone

3. Typowe reakcje wprost

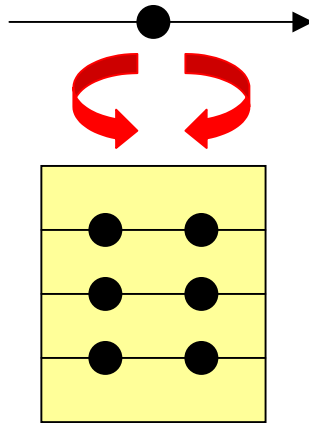
a) reakcja zderzenia i reakcja wychwytu

4. Typowe reakcje przez jądro złożone

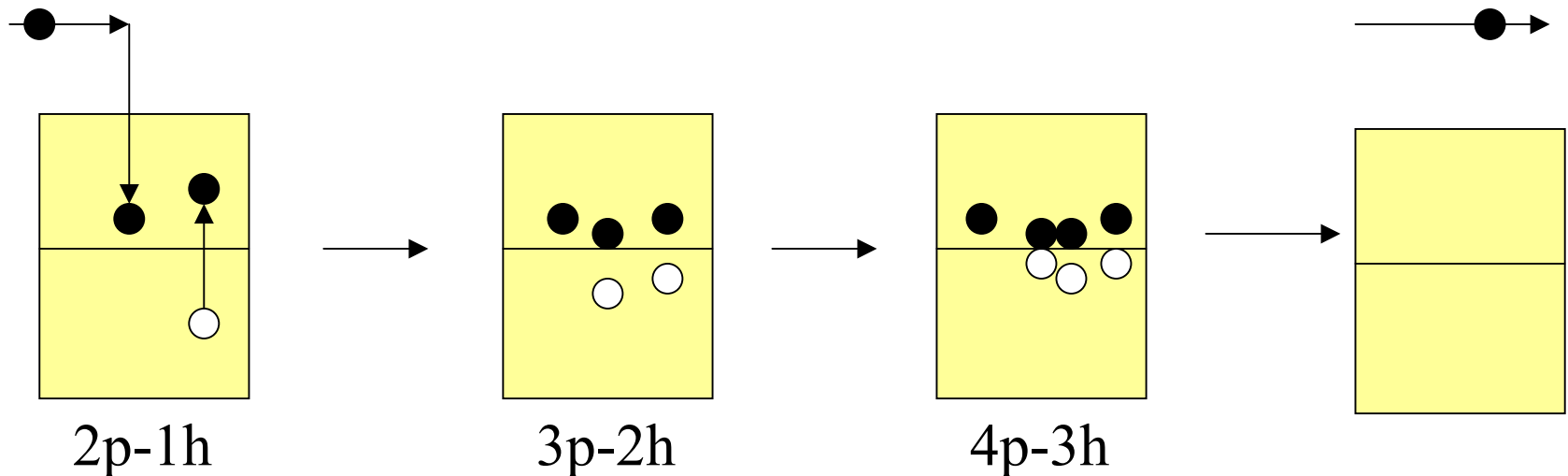
Rozpraszanie elastyczne



a) reakcja wprost

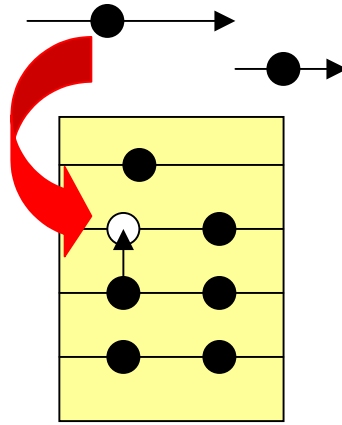


b) reakcja przez jądro złożone



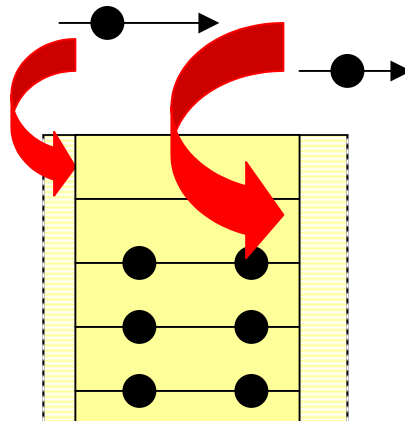
Rozpraszanie nieelastyczne $a + X \rightarrow a' + X^*$

reakcja wprost - wzbudzenie jednocząstkowe



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

reakcja wprost - wzbudzenie kolektywne



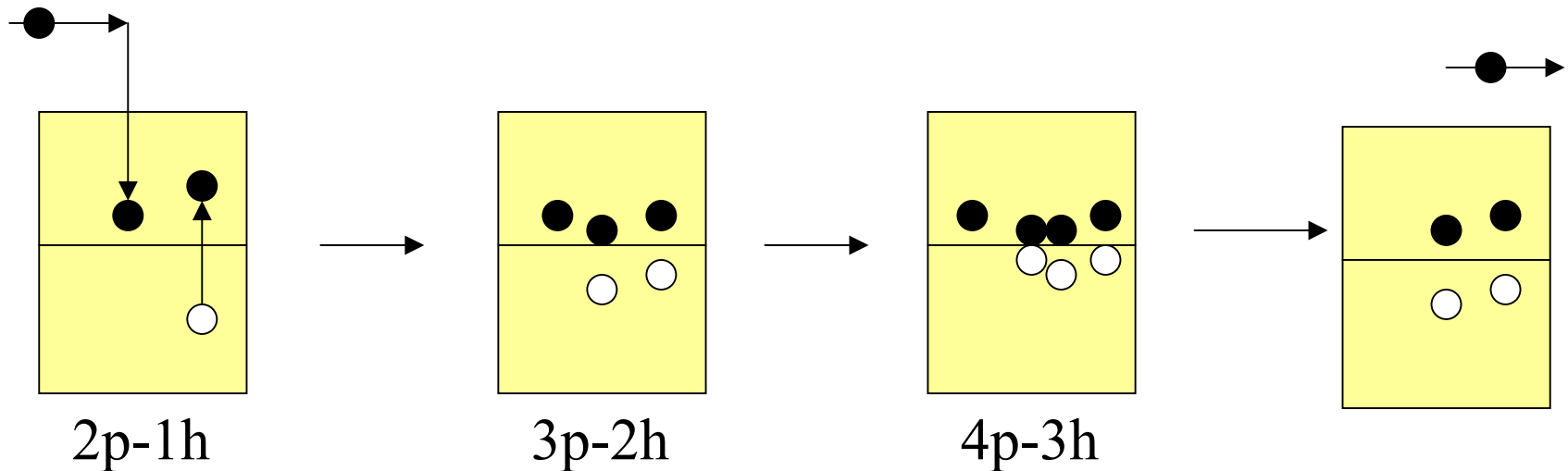
oscylacje,
rotacje,
rezonanse
gigantyczne

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

reakcja przez jądro złożone

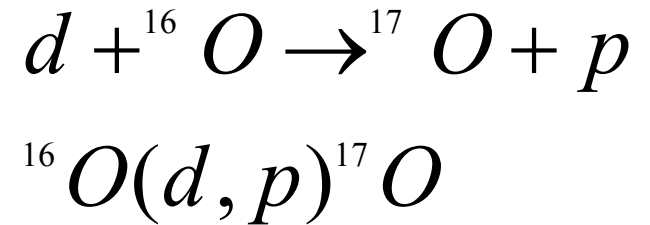
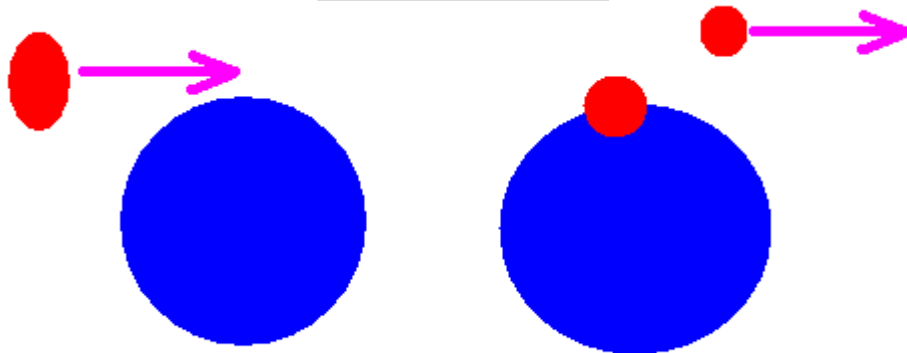


$$\tau \approx 10^{-16} \text{ s}$$



Typowe reakcje *wprost*

stripping



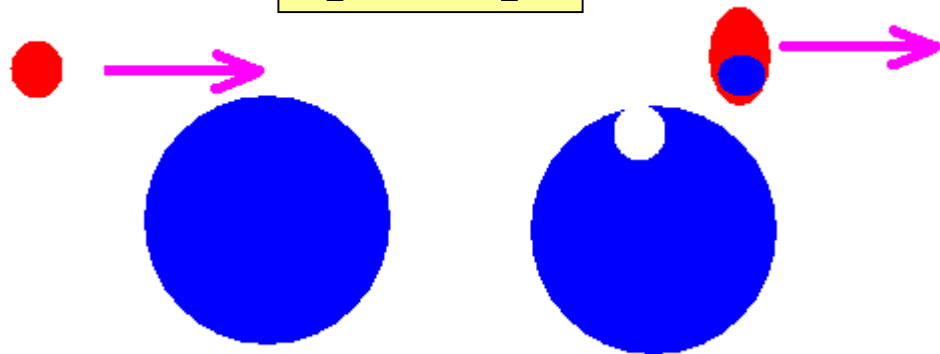
(p, d)

(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

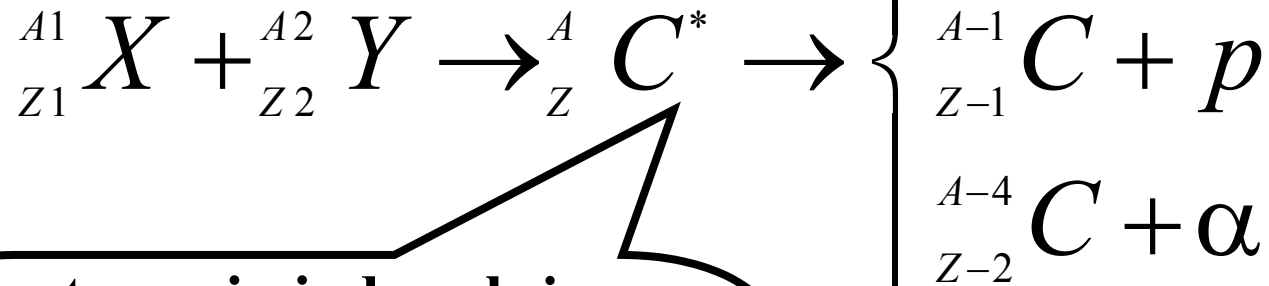
Reakcje wprost jako źródło informacji o strukturze jąder

- 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

$$A1 + A2 = A$$

$$Z1 + Z2 = Z$$



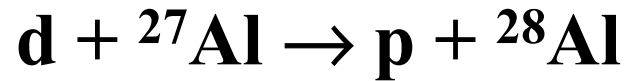
Czas trwania jądra złożonego ($\sim 10^{-16}$ s) na tyle długi, że zapomina ono jak zostało wytworzone i rozpada się zgodnie z dostępną energią i momentem pędu

Cechy charakterystyczne reakcji przez jądro złożone

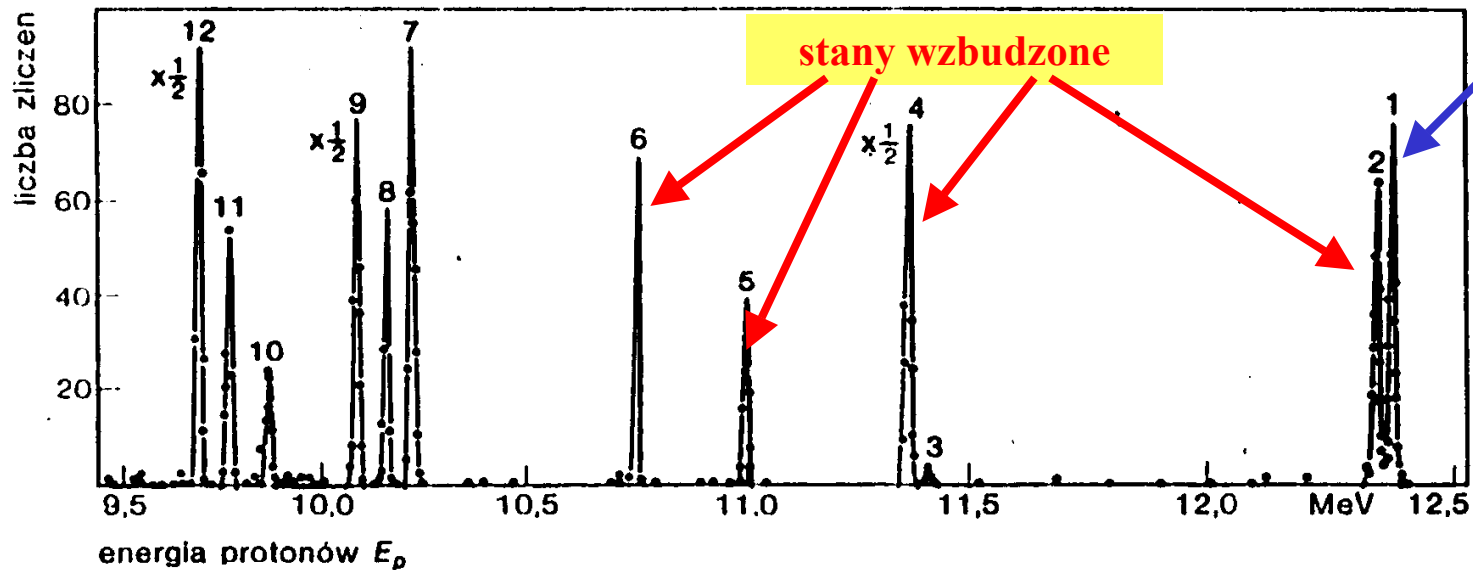
- Emitowane cząstki mają niskie energie
- Cząstki są emitowane równomiernie dla wszystkich kątów względem kierunku wiązki (*rozkład kątowy izotropowy, symetryczny względem 90°*)
- Rezonansowa zależność przekroju czynnego od energii wiązki

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

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

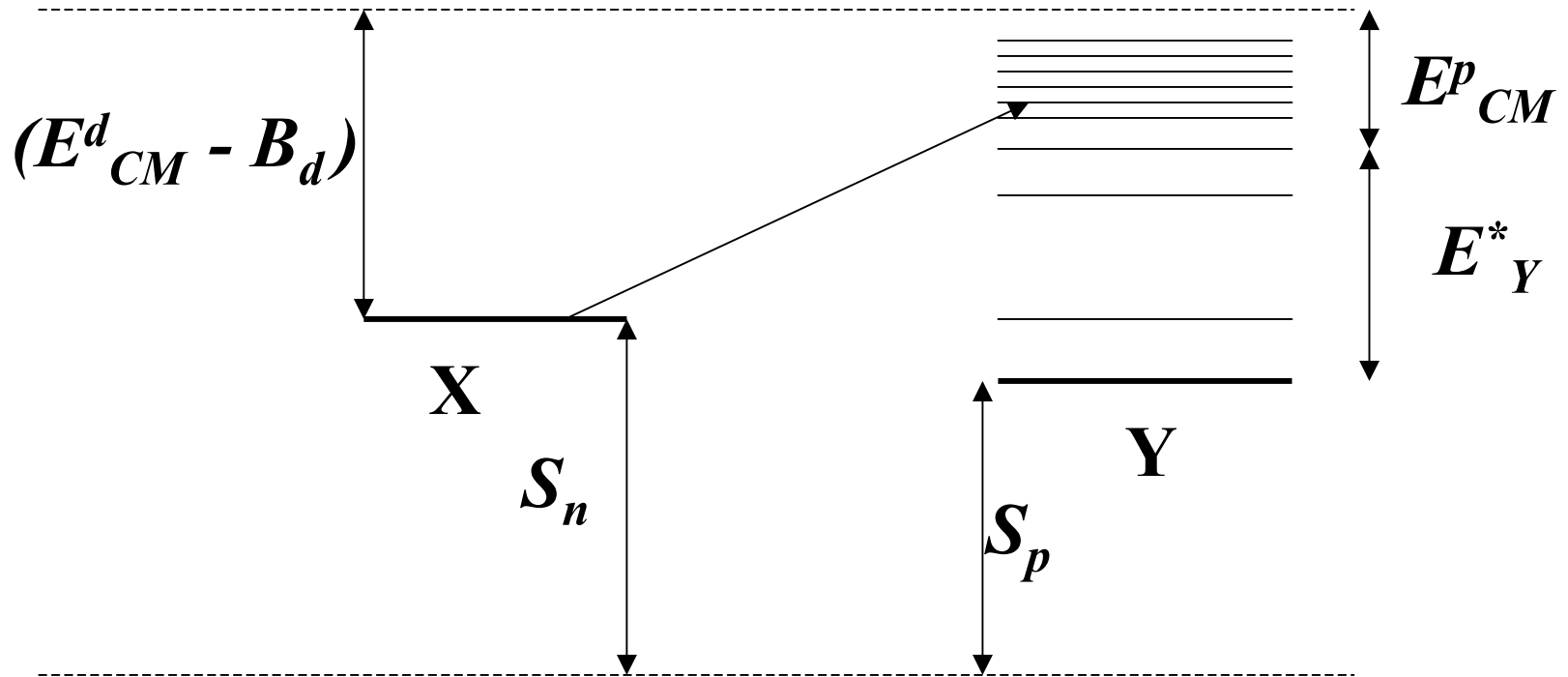


stan podstawowy jądra
końcowego



reakcja wprost

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

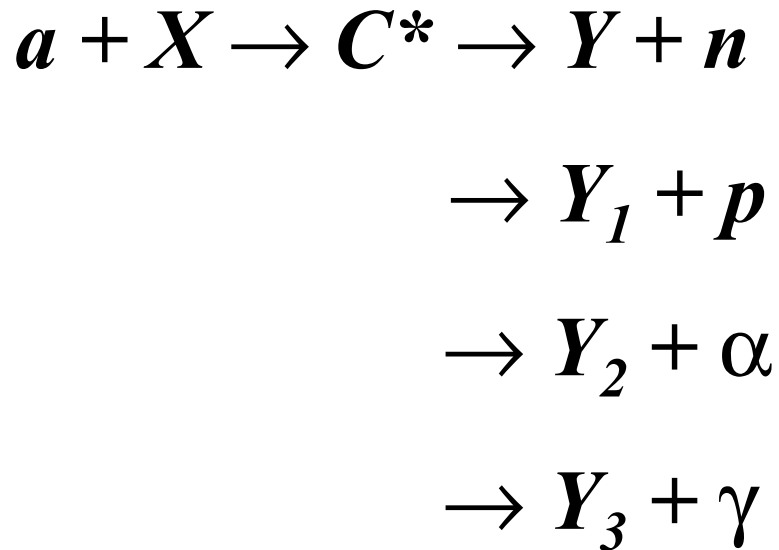


Maksymalna energia cząstki p: $E_{CM}^{p \max} = E_{CM}^d + S_n(Y) - B_d$

Energia cząstki p: $E_{CM}^p = E_{CM}^{p \max} - E_Y^*$

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

Rozpad jądra złożonego

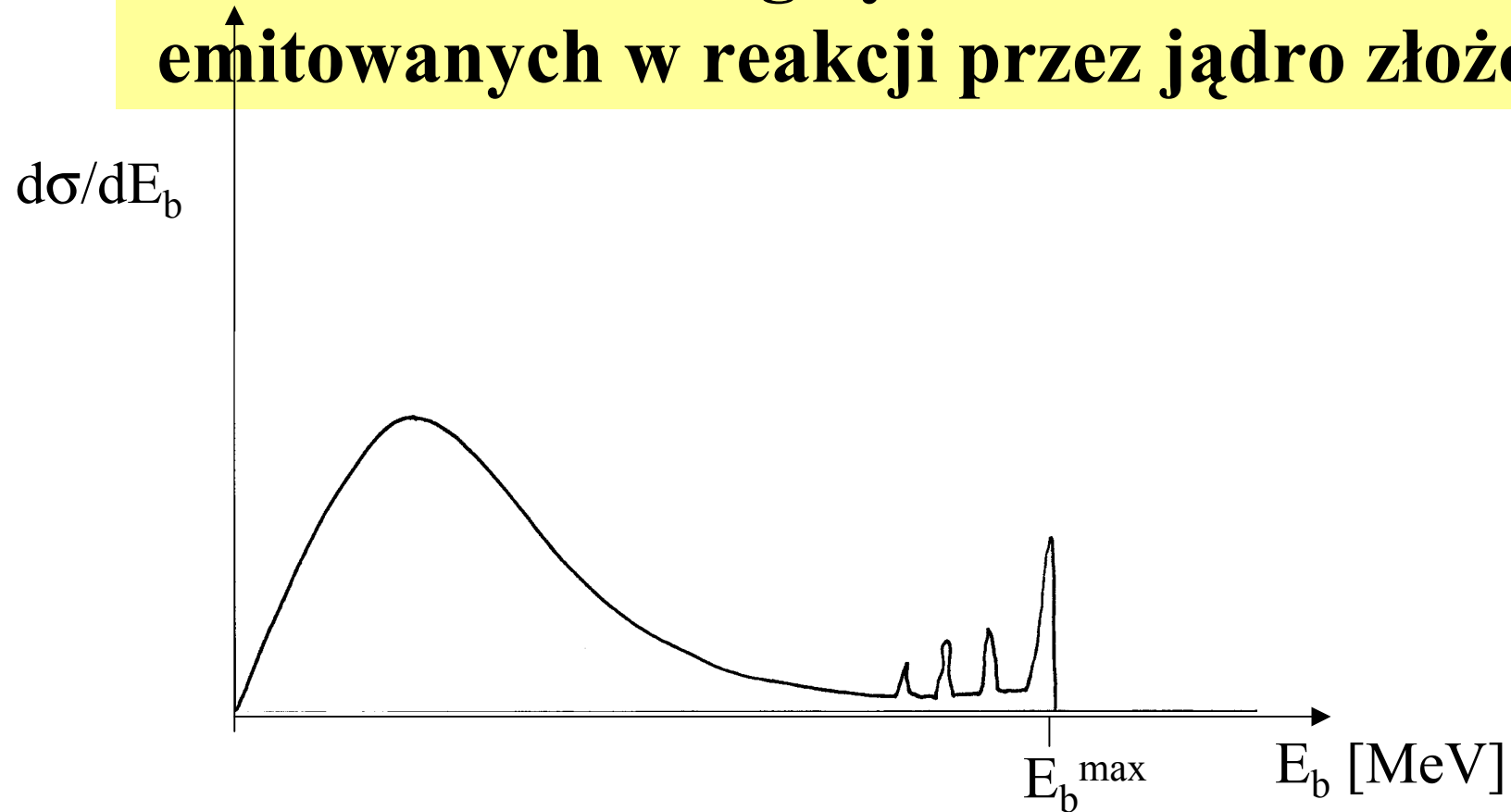


Czas trwania jądra złożonego ($\sim 10^{-16}$ s) na tyle długi, że zapomina ono jak zostało wytworzone i rozpada się zgodnie z dostępną energią i momentem pędu

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

Rozpad z emisją kwantu γ jest 1000 razy mniej prawdopodobny !

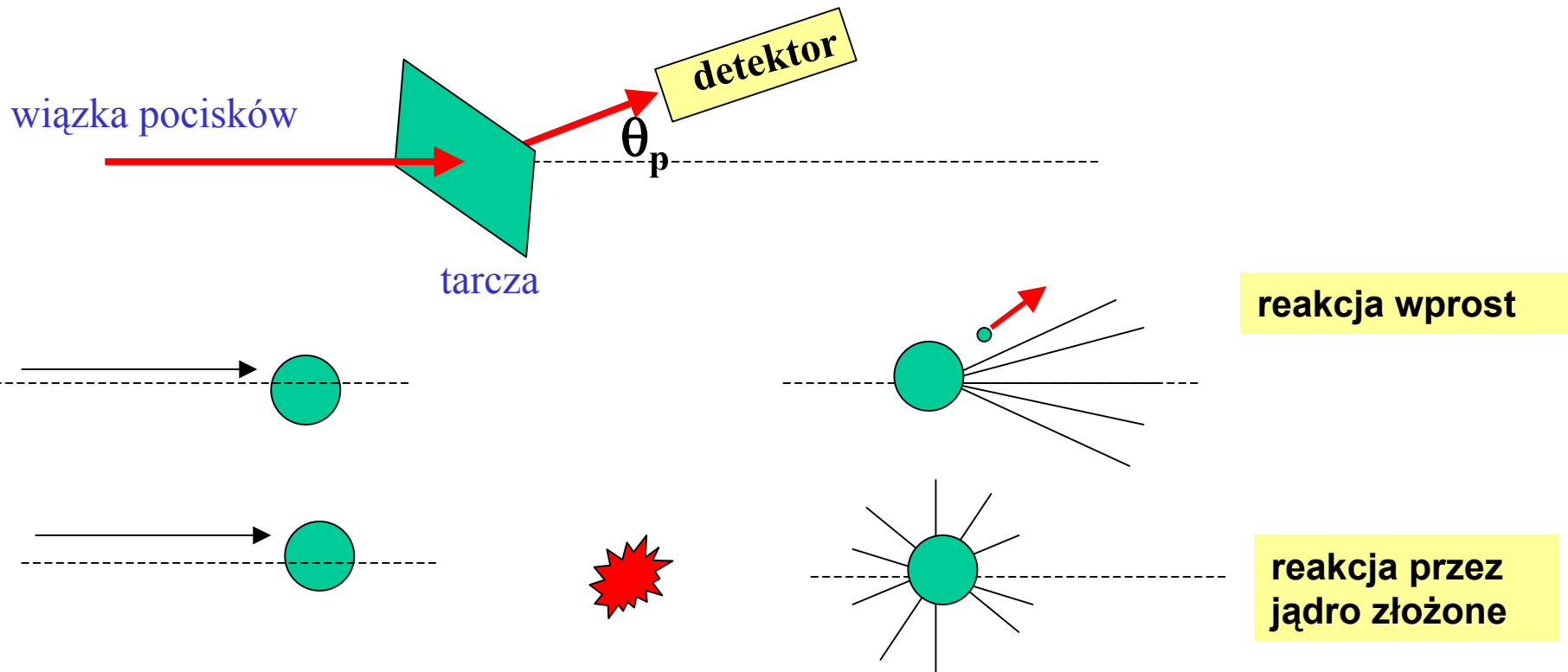
Widmo energetyczne neutronów emitowanych w reakcji przez jądro złożone



- 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

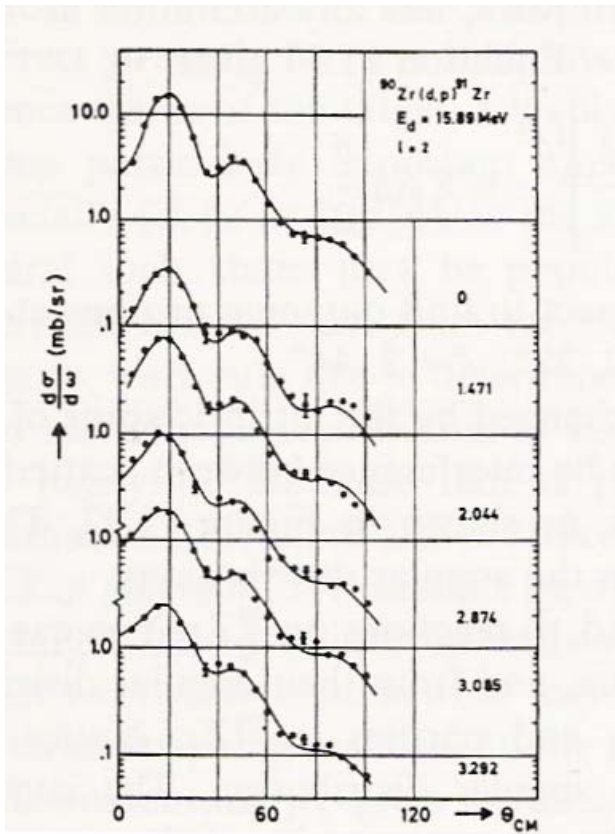
Kierunki emisji wychodzących cząstek
- rozkład kątowy $N_p = N_p(\theta_p)$



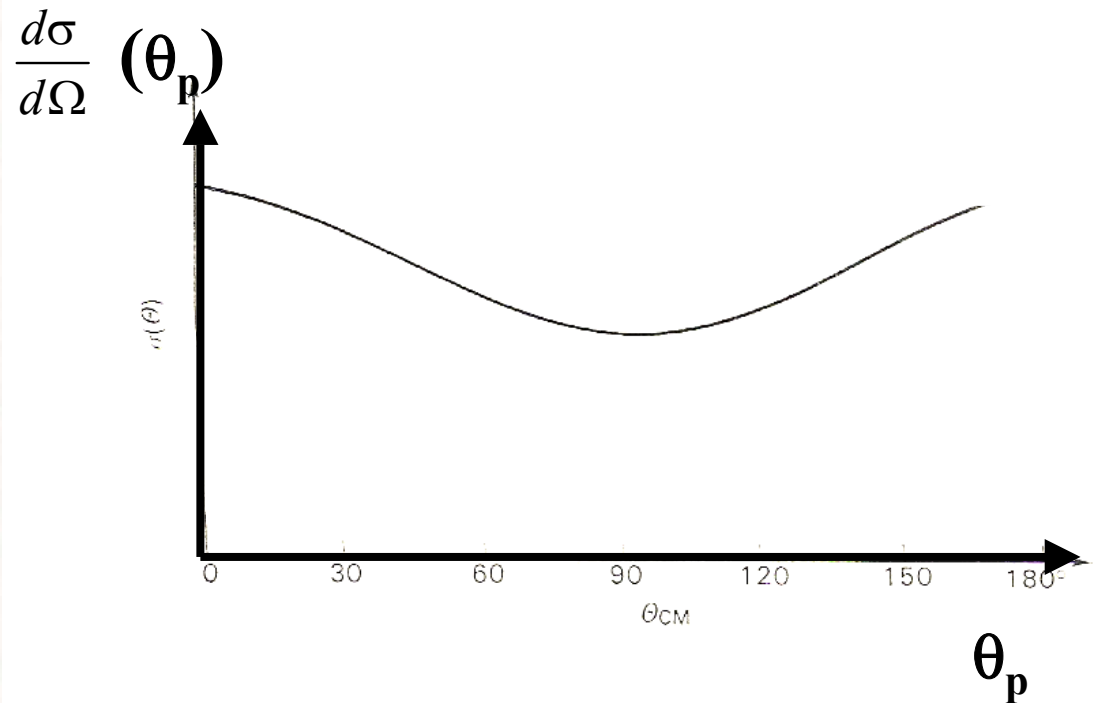
Różny kształt dla różnych mechanizmów reakcji

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Rozkład kątowy produktów reakcji



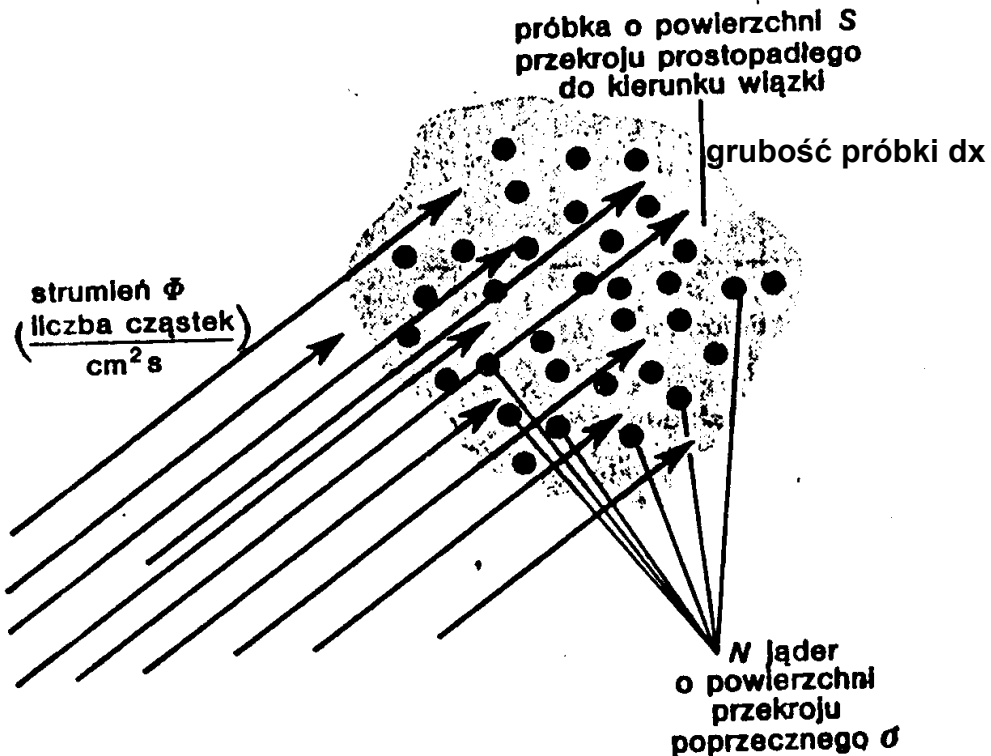
reakcja wprost



reakcja przez jądro złożone

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

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



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

$d\Phi$ cząstek zderza się z jądrami

Prawdopodobieństwo oddziaływania

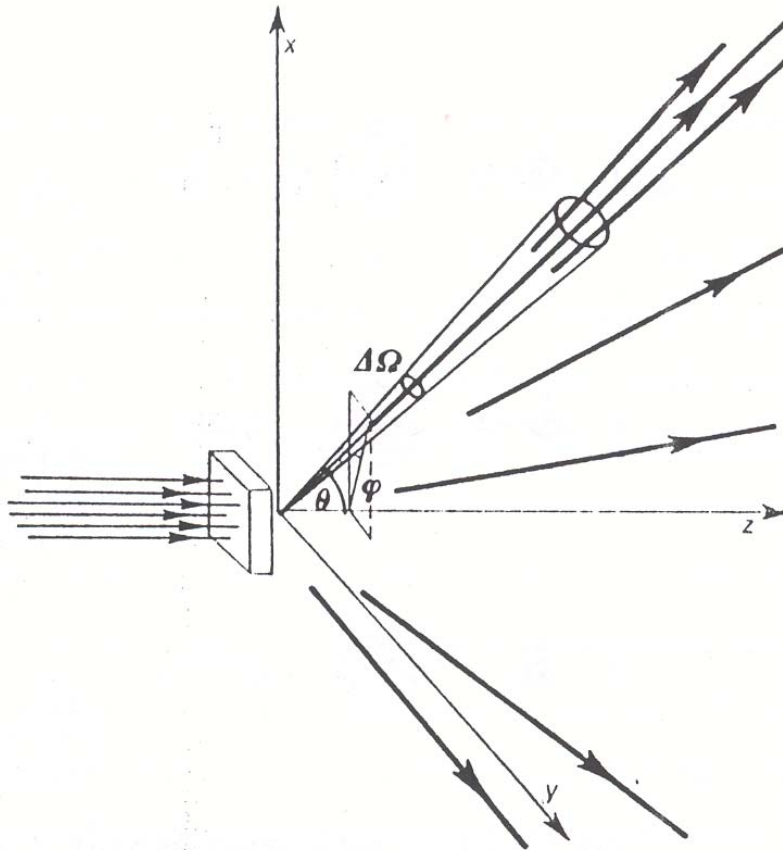
$$d\Phi / \Phi = - \sigma N S dx / S$$

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

Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

Różniczkowy przekrój czynny
(rozkład kątowy danego produktu reakcji)

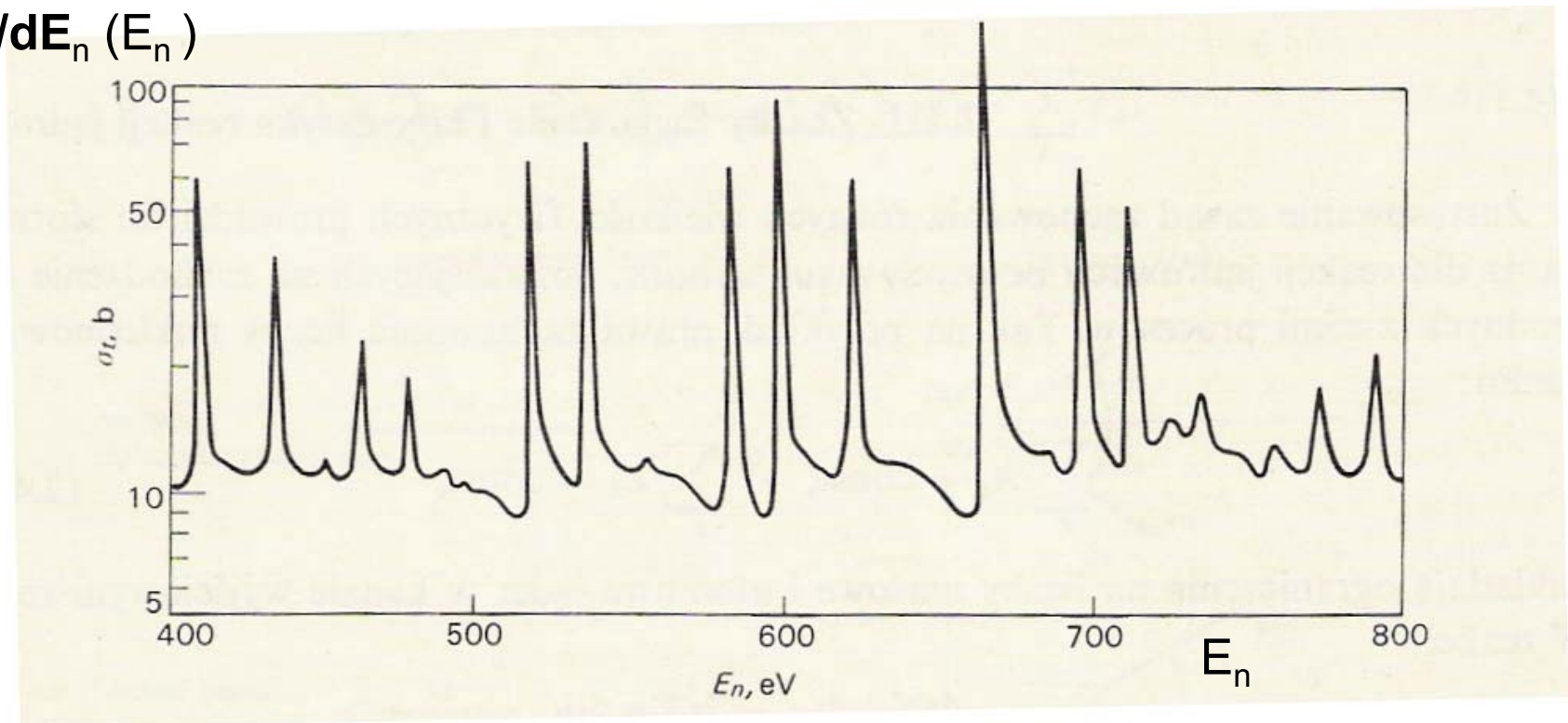
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}$$



Wielkości mierzone dla reakcji jądrowej

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

$d\sigma/dE_n (E_n)$



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)

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

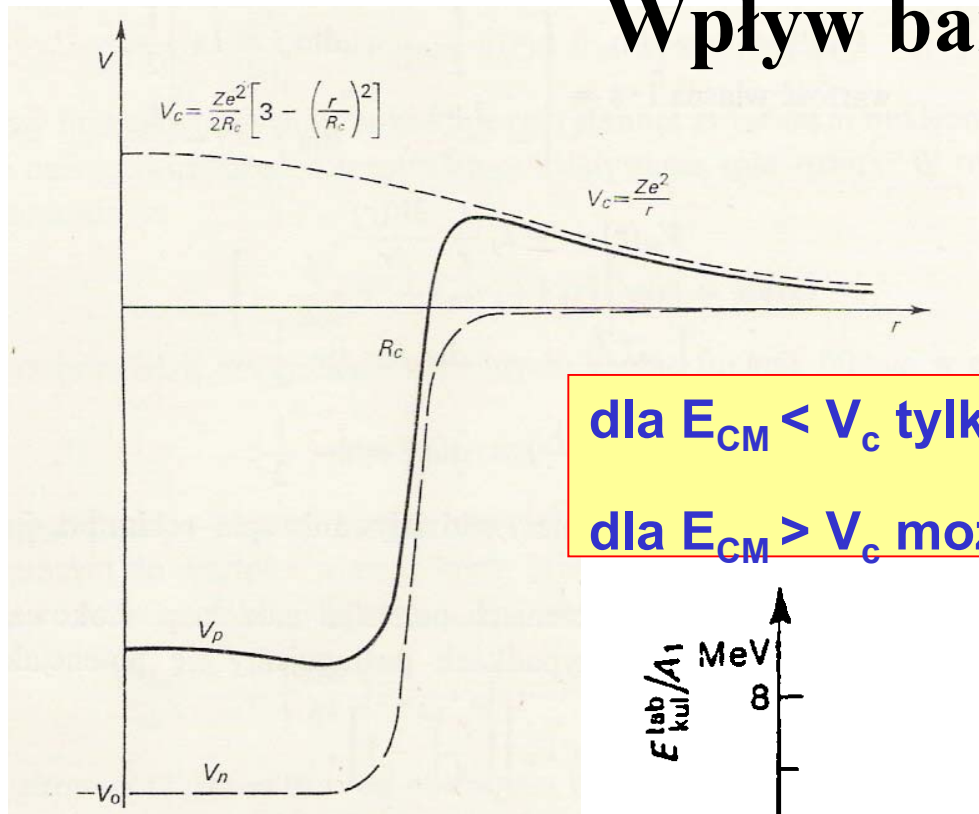
Reakcje wywołane przez ciężkie jony

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

Zakresy energii pocisków:

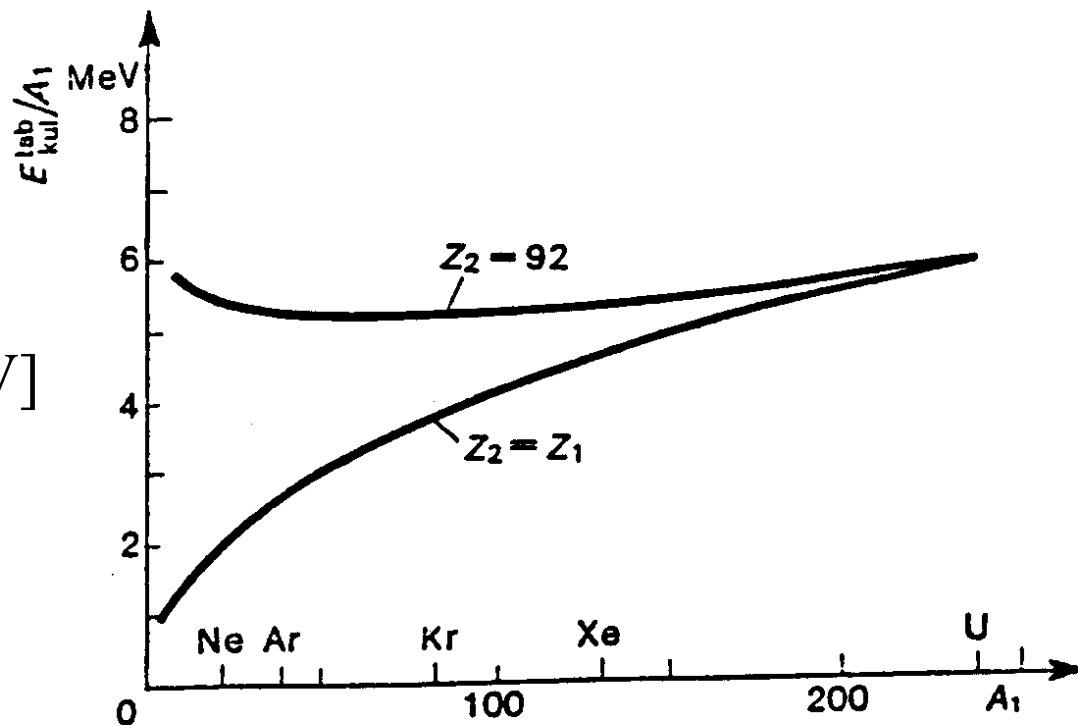
1. energie niskie: do ok. 10 MeV/u
2. energie pośrednie
3. energie wysokie: kilkaset do kilku tysięcy MeV/u

Wpływ bariery kulombowskiej



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

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

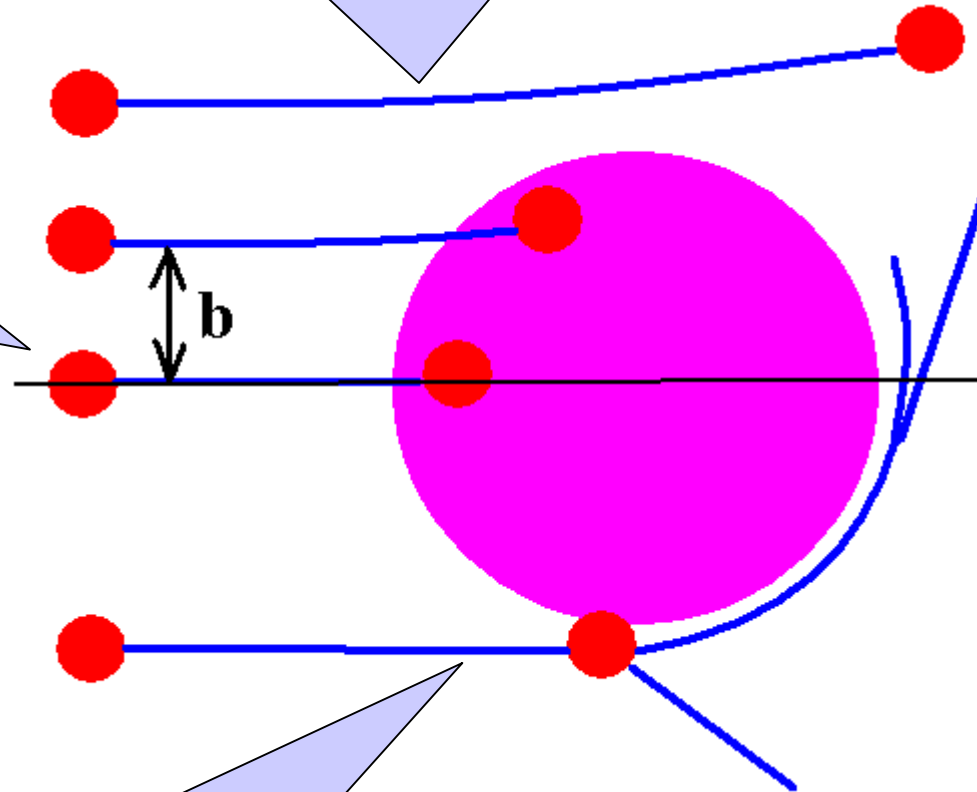


Kinematyka: wpływ parametru zderzenia

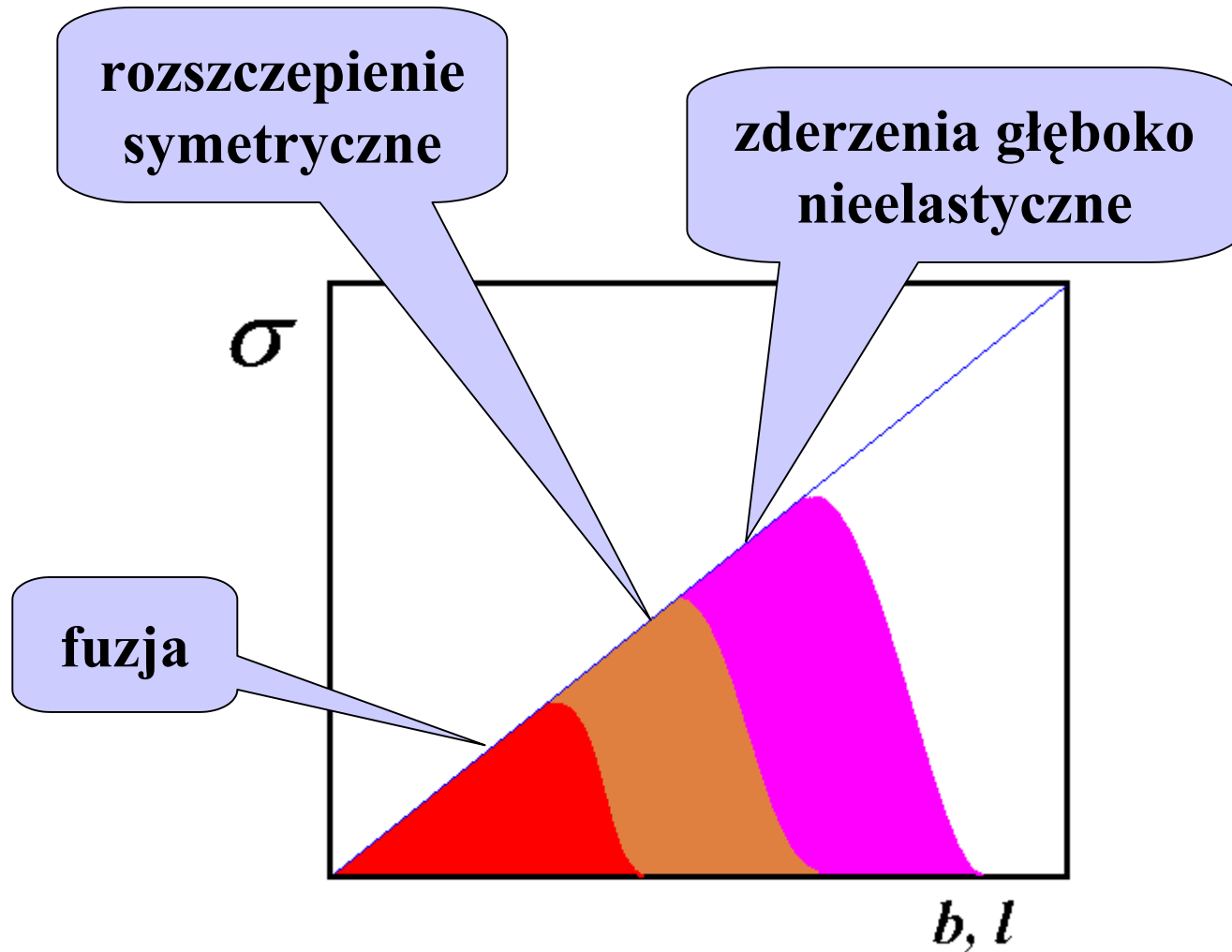
rozproszenie kulombowskie

zderzenie centralne

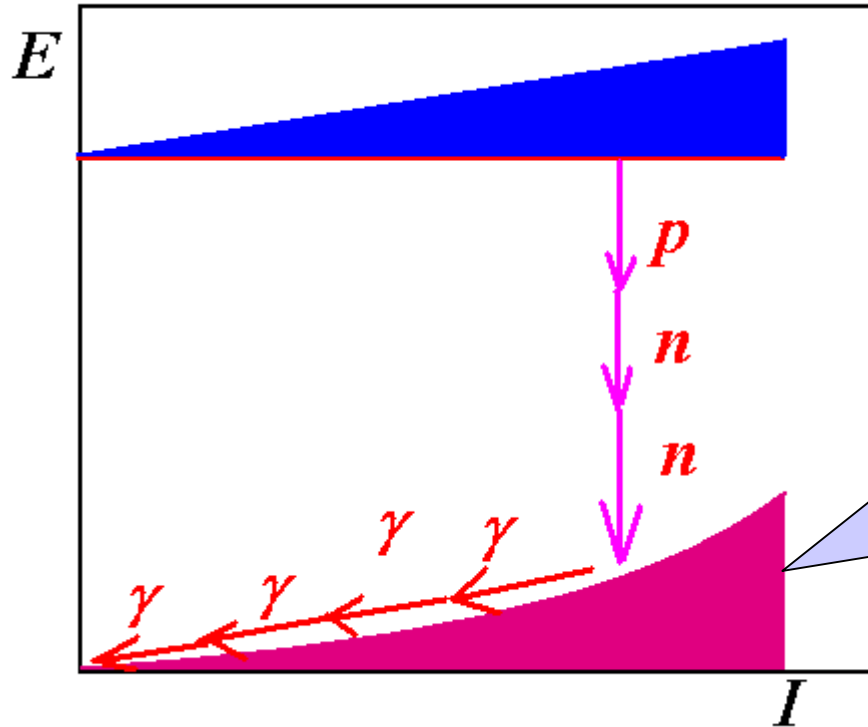
zderzenie peryferyjne



Podział przekroju czynnego - wpływ przekazanego momentu pędu

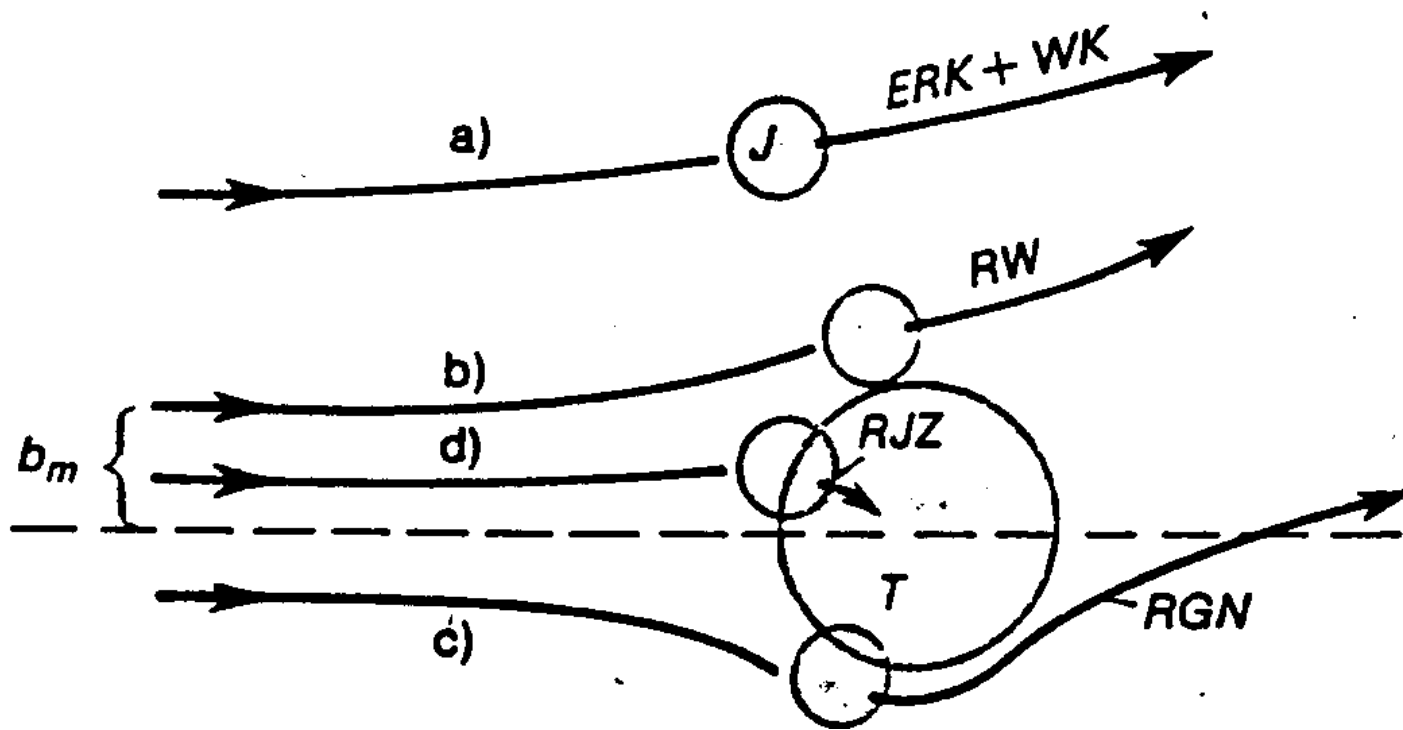


Rozpad jądra wzbudzonego



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

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