

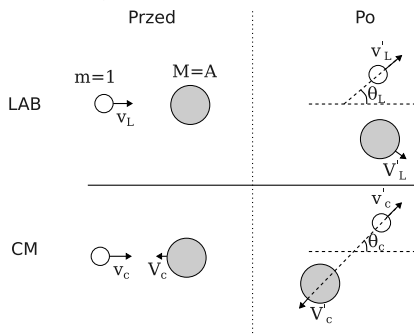
# Wykład 2

# Spowalnianie neutronów

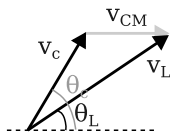
- Neutrony natychmiastowe z rozszczepienia mają energie rzędu 1 MeV. Ponieważ największy przekrój czynny jest dla neutronów termicznych ( $< 1$  eV), w większości reaktorów są one spowalniane.
- Spowalnianie neutronów odbywa się poprzez rozpraszanie elastyczne na atomach ośrodka. Neutrony można spowolnić tylko do energii odpowiadającej ruchom termicznym ośrodka.
- Dobry moderador powinien posiadać
  - 1 duży przekaz energii w pojedynczym akcie zderzenia (aby możliwie szybko je spowolnić i aby nie uciekły z reaktora),
  - 2 duży przekrój czynny na rozpraszanie (aby często do niego dochodziło),
  - 3 mały przekrój czynny na pochłanianie (aby neutrony nie ginęły).

# Kinematyka rozpraszania elastycznego

- Układ laboratoryjny i środka masy



- Prędkość w LAB, a CM



# Kinematyka rozpraszania elastycznego

- Stosunek energii po rozproszeniu do pierwotnej

$$\frac{E'_L}{E_L} = \frac{(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \cos \theta_c}{2}, \quad \alpha = \left( \frac{A - 1}{A + 1} \right)^2$$

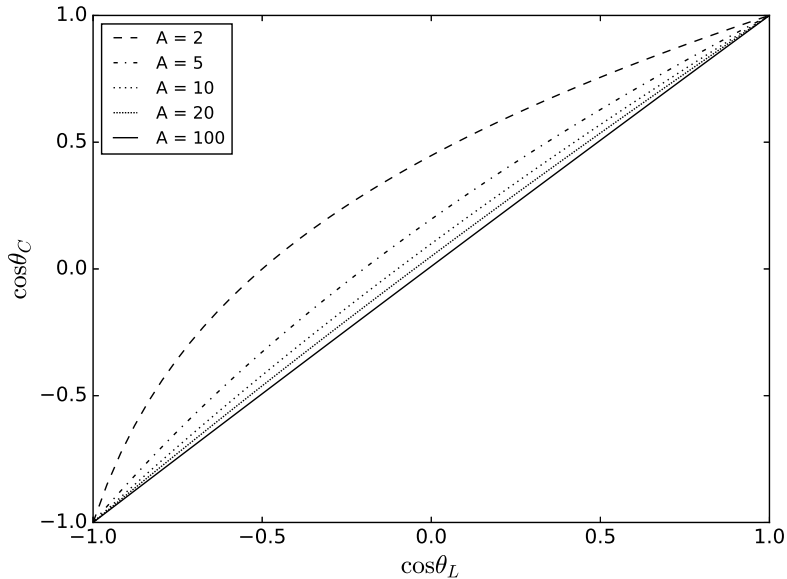
- Zależność kąta w układzie LAB od kąta w układzie CM

$$\tan \theta_L = \frac{\sin \theta_c}{1/A + \cos \theta_c}$$

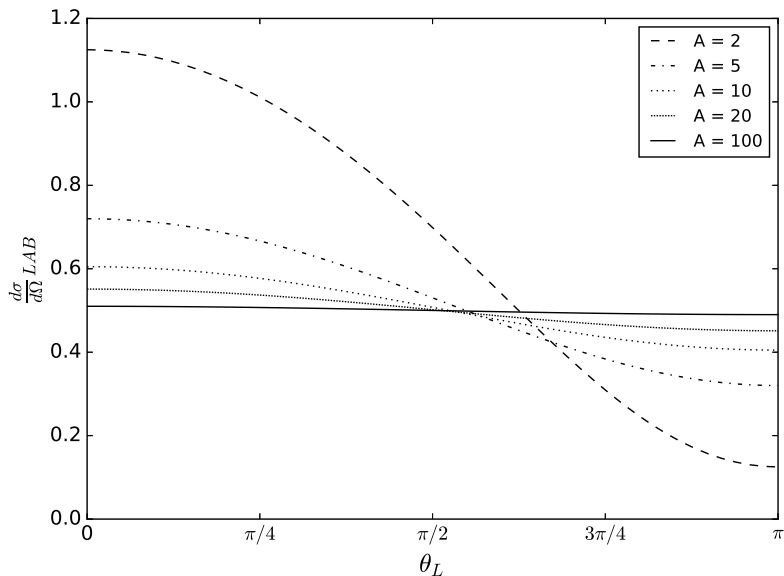
- Różniczkowy przekrój czynny LAB, a CM

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega_L} \right|_L = \frac{(1/A^2 + 1 + 2/A \cos \theta_c)^{3/2}}{1 + 1/A \cos \theta_c} \left. \frac{d\sigma}{d\Omega_L} \right|_c$$

# $\cos \theta_L$ i $\cos \theta_C$



# Anizotropowość rozpraszania w LAB



# Kinematyka rozpraszania elastycznego

- Rozpraszanie jest izotropowe w CM

$$p(\theta_c, \phi_c) = \frac{1}{2} \sin \theta_c \frac{1}{2\pi}$$

- Średni kąt rozpraszania w LAB

$$\cos \bar{\theta}_L = \frac{\int_0^{4\pi} \cos \theta_L d\Omega}{\int_0^{4\pi} d\Omega} = \left\{ d\Omega = 2\pi \sin \theta_c d\theta_c \right\} = \dots = \frac{2}{3A}$$

- Prawdopodobieństwo rozpraszania z  $E_L$  do  $E'_L \pm dE'_L$  zależy od prawdopodobieństwa rozpraszania w kąt bryłowy  $\theta_c \pm d\theta_c$ .

$$\sigma_s(E_L)P(E_L \rightarrow E'_L)dE'_L = -\sigma_{CM}(\theta_c)2\pi \sin \theta_c d\theta_c$$

stąd

$$P(E_L \rightarrow E'_L) = \begin{cases} \frac{4\pi \sigma_{CM}(\theta_c)}{(1-\alpha)E_L \sigma_s(E_L)} & \alpha E_L \leq E'_L \leq E_L \\ 0 & \text{dla pozostałych} \end{cases}$$

# Kinematyka rozpraszania elastycznego

- Dla rozpraszania izotropowego w CM

$$P(E_L \rightarrow E'_L) = \frac{1}{(1 - \alpha)E_L}$$

- Średnia energia po zderzeniu

$$\langle E'_L \rangle = \int_{\alpha E_L}^{E_L} dE'_L E'_L \frac{1}{(1 - \alpha)E_L} = \dots = \frac{E_L(1 + \alpha)}{2}$$

- Średnia logarytmiczna strata energii

$$\xi \equiv \int_{\alpha E_L}^{E_L} dE'_L \ln \left( \frac{E_L}{E'_L} \right) \frac{1}{(1 - \alpha)E_L} = \dots = 1 + \frac{(A - 1)^2}{2A} \ln \left( \frac{A - 1}{A + 1} \right)$$



# Średnia strata logarytmiczna

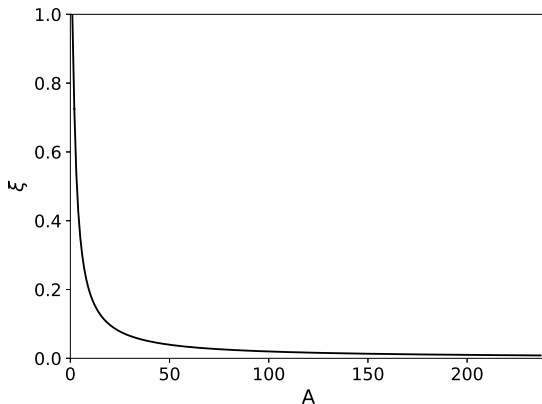
- Wygodnym parametrem do opisu liczby potrzebnych zderzeń neutronu w moderatorze jest *średnia logarytmiczna strata energii* w pojedynczym zderzeniu (początkowa energia  $E_i$ , końcowa  $E_f$ ).

$$\xi = \ln(E_i) - \ln(E_f) = \ln\left(\frac{E_i}{E_f}\right)$$

# Średnia strata logarytmiczna

- Wygodnym parametrem do opisu liczby potrzebnych zderzeń neutronu w moderatorze jest *średnia logarytmiczna strata energii* w pojedynczym zderzeniu (początkowa energia  $E_i$ , końcowa  $E_f$ ).

$$\xi = \ln(E_i) - \ln(E_f) = \ln\left(\frac{E_i}{E_f}\right)$$



- Ten parametr uwzględnia tylko cechę (1)

- Wprawdzie średnia logarytmiczna strata energii wygodnie opisuje własność materiału w pojedynczym zderzeniu, nie jest wystarczającą miarą tego czy materiał jest dobrym moderatorem, bo uwzględnia tylko straty energii neutronów.
- Kolejny parametr do opisu moderatora to makroskopowa zdolność spowalniająca, (MSDP - Macroscopic Slowing Down Power), która uwzględnia także przekrój czynny na rozpraszanie (cechy (1) i (2))

$$MSDP = \xi \Sigma_s$$

- Wreszcie parametr, który bierze pod uwagę także prawdopodobieństwo absorpcji to współczynnik spowalniania (MR - Moderating Ratio) (cechy (1), (2) i (3))

$$MR = \frac{MSDP}{\Sigma_a} = \frac{\xi \Sigma_s}{\Sigma_a}$$

- Im wyższy  $MR$  tym lepiej dany materiał sprawdza się jako moderator. Oczywiście wybór danej substancji nie zależy tylko od tego współczynnika, ale także od jej innych cech (np. kosztów, bezpieczeństwa, dostępności, możliwości zastosowania w danym projekcie itd.).

# Rozpowszechnienie i wzbogacenie

- Rozpowszechnienie izotopów w naturalnych próbkach jest podawane w procentach cząsteczkowych  $\gamma_i$ . Wtedy ilość atomów danego izotopu w  $\text{cm}^3$  to

$$N_i = \gamma_i \frac{\rho_0 N_A}{M_0}$$

gdzie  $\rho_0, M_0$  - gęstość i masa molowa naturalnego składu materiału

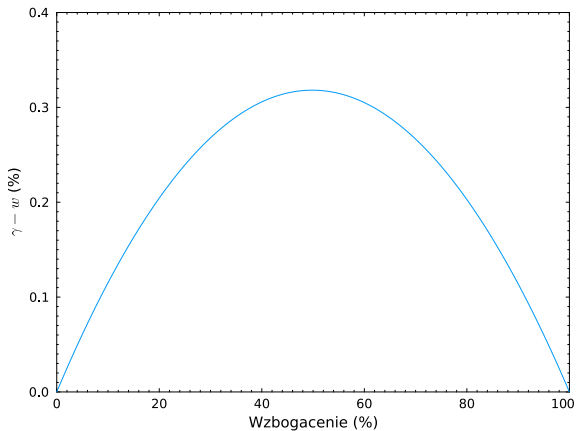
- Wzbogacenie paliwa jądrowego jest podawane w procentach wagowych  $w_i$ . Przeliczenie na procenty cząsteczkowe to

$$\gamma_i = \frac{\frac{w_i}{M_i}}{\sum_j \frac{w_j}{M_j}}$$

stąd ilość atomów danego izotopu

$$N_i = \gamma_i N = \frac{\frac{w_i}{M_i}}{\sum_j \frac{w_j}{M_j}} \frac{\rho_0 N_A}{M_0}$$

# Rozpowszechnienie i wzbogacenie



Różnica między rozpowszechnieniem i wzbogaceniem dla uranu metalicznego w zależności od wzbogacenia masowego.

# Termalizacja neutronów

Materiał	$\xi$	$\bar{n}$	MSDP	MR
H <sub>2</sub> O	0.925	19	1.39	71
D <sub>2</sub> O	0.508	35	0.18	4487
<sup>9</sup> Be	0.207	70	0.167	135
<sup>12</sup> C	0.158	92	0.086	247
<sup>23</sup> Na	0.085	172	0.006	0.543
<sup>56</sup> Fe	0.035	411	0.037	0.175
<sup>238</sup> U	0.008	1731	0.004	0.031

gdzie

- $\xi = \ln(E_i/E_f)$  średnia logarytmiczna strata energii
- $\bar{n}$  średnia liczba zderzeń potrzebna do termalizacji
- MSDP =  $\sum_{el} \xi$  makroskopowa zdolność spowalniająca
- MR =  $\xi \sum_{el} / \sum_a$  współczynnik spowalniania

## Zadanie 4

Wyznaczyć średnią stratę logarytmiczną  $\xi$  oraz liczbę zderzeń potrzebną do spowolnienia neutronu od 2 MeV do 1 eV dla:  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{D}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

## Zadanie 5

Wyznaczyć całkowity makroskopowy przekrój czynny oraz średnią drogę swobodną na wychwyty dla wody i ciężkiej wody dla neutronów termicznych, rezonansowych i prędkich.

## Zadanie 6

Wyznaczyć całkowity makroskopowy przekrój czynny oraz średnią drogę swobodną dla węgla i boru dla neutronów termicznych.

## Zadanie 7

Wyznaczyć makroskopowy przekrój czynny oraz średnią drogę swobodną na rozszczepienie i wychwyty dla ditlenku uranu o wzbogaceniu 4%, dla neutronów termicznych oraz prędkich.