

METODY DETEKCJI PROMIENIOWANIA JĄDROWEGO 1

ŹRÓDŁA CZĄSTEK PROMIENIOWANIA JĄDROWEGO

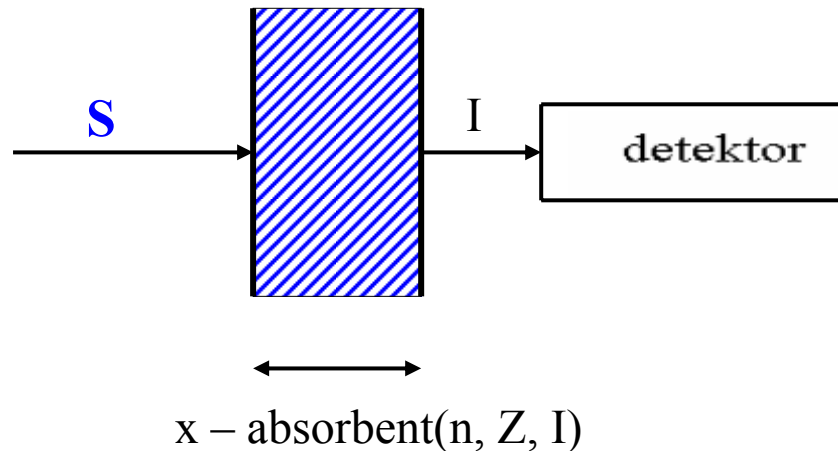
- przemiany promieniotwórcze jąder (naturalne)
- inne reakcje jądrowe
- (cząstki o wysokiej energii) akceleratorzy, promieniowanie kosmiczne

ODDZIAŁYWANIE PROMIENIOWANIA JĄDROWEGO Z MATERIAŁ

- oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych, $m > m_e$ ($m_e = 0.511 \text{ MeV}$):
p, d, α , mezony, fragmenty jąder ($a > 4$, $z > 4$), $\pi^\pm$, π^0 , k, λ , σ
- oddziaływanie promieniowania β (e^+ , e^-)
- oddziaływanie promieniowania γ
- oddziaływanie cząstek neutralnych ($z=0$): n, ν

ODDZIAŁYWANIE Z MATERIAŁ CIĘŻKICH CZĄSTEK NAŁADOWANYCH

- Jonizacja atomów ośrodka (nieelastyczne zderzenia z elektronami atomów)
 - straty energii na wytworzenie pary jonów $[(Ze)^+, e^-]$
w powietrzu: **35 eV** (stała w przybliżeniu dla wszystkich cząstek), słabo zależy od rodzaju gazu
 - absorpcja na skutek jonizacji $\Leftrightarrow$ absorpcja zasięgowa



- Krzywa absorpcji

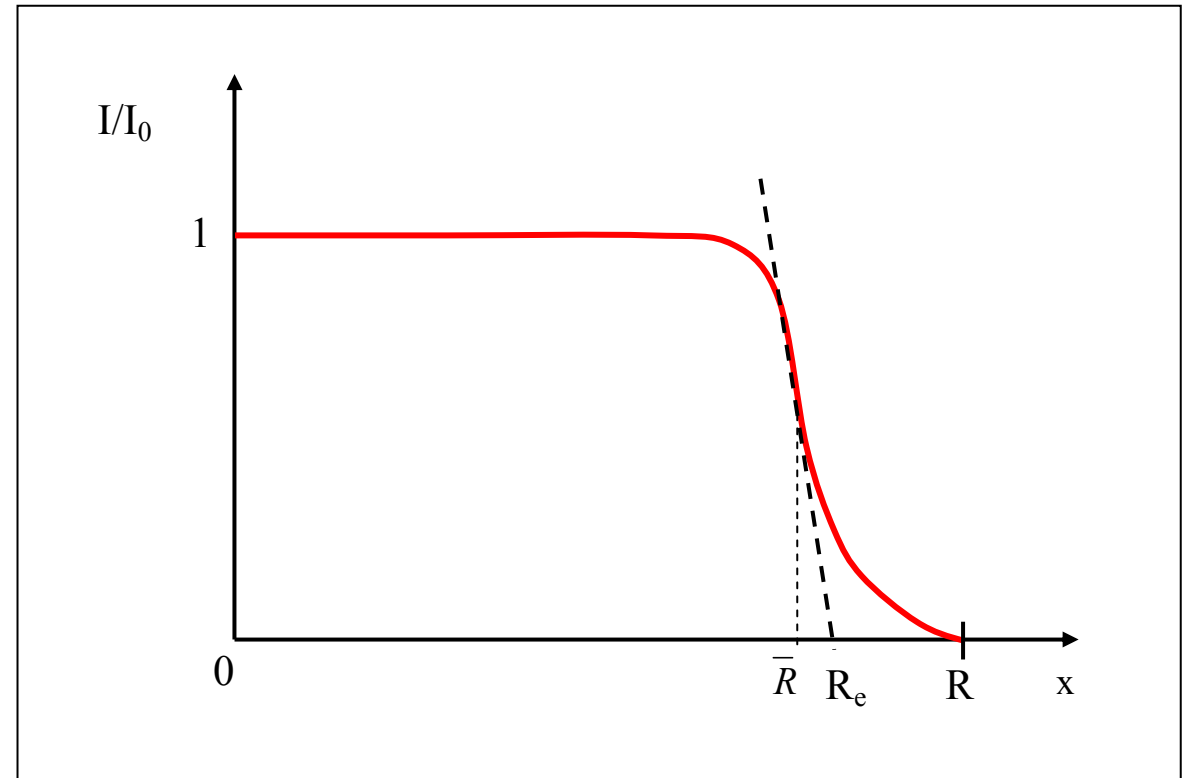
R = zasięg

$\bar{R}$ = zasięg średni

R_e = zasięg ekstrapolowany

$[R] = \text{cm}$ zasięg liniowy
lub

$[R] = [x \cdot \rho] = \text{g/cm}^2$ zasięg masowy



$R = R(E) \Rightarrow$ wyznaczanie energii z pomiaru R

TEORIA ODDZIAŁYWAŃ

Straty energii cząstki na jednostkę drogi

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 n}{m_e v^2} Z \ln \frac{2m_e v^2}{I} \quad \text{dla} \quad E \ll \frac{mc^2}{2m_e} \left(= \frac{(mc^2)^2}{2m_e c^2} \right)$$

I – Średni potencjał jonizacji i wzbudzenia atomów absorbenta, np.

H	15.6 eV
powietrze	80.5 eV
Al	150 eV
Pb	705 eV

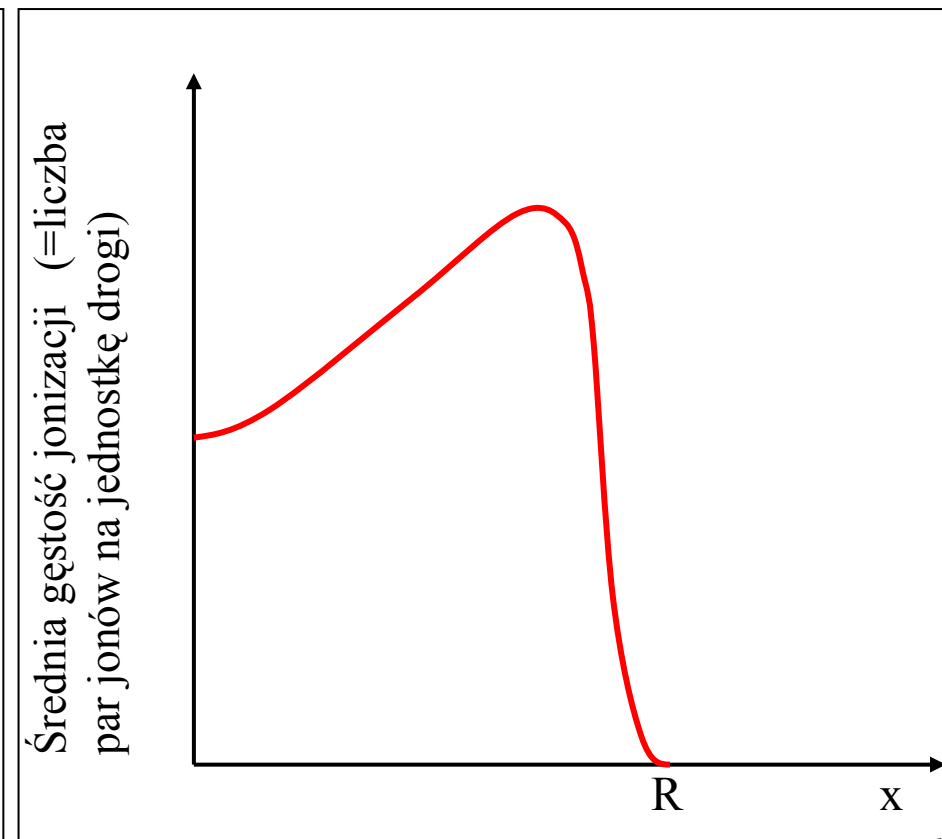
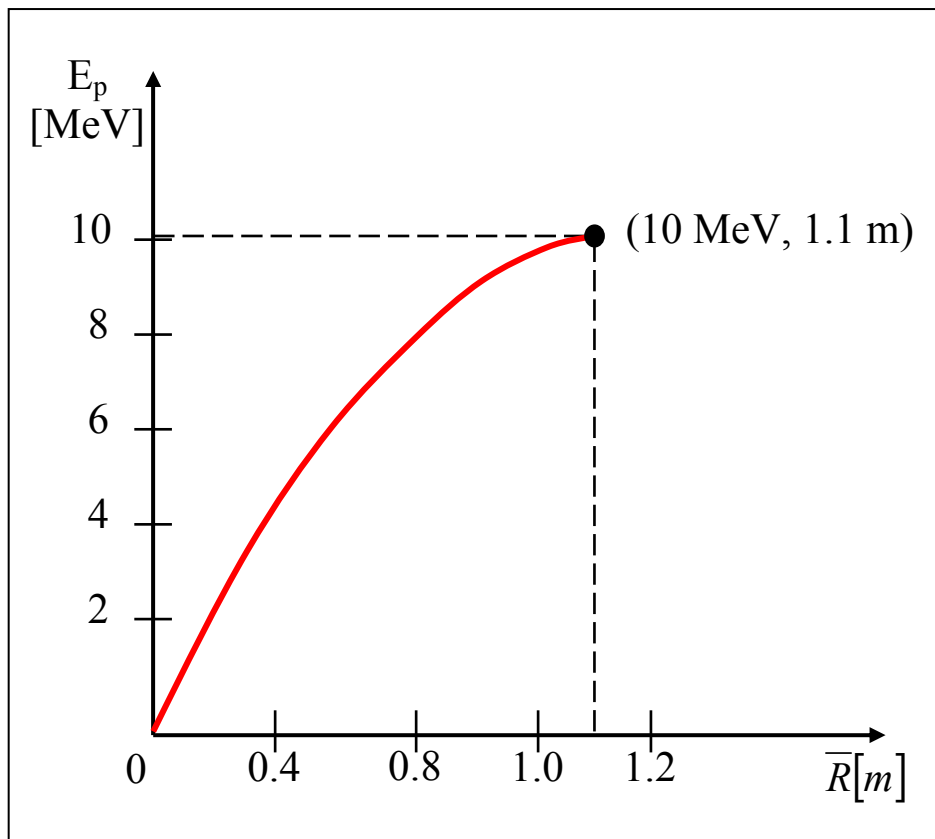
DLA CZĄSTEK RELATYWISTYCZNYCH

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 n}{m_e v^2} Z \left[\left(\ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\phi^2)} \right) - \beta^2 \right], \quad \beta \equiv \frac{v}{c}$$

$$-\frac{dE}{dx} \uparrow \quad \text{gdy} \quad E \downarrow$$

$$-\frac{dE}{dx} \uparrow \quad \text{gdy} \quad z \uparrow$$

$$-\frac{dE}{dx} \uparrow \quad \text{gdy} \quad m \uparrow$$



Wzór Bragga-Kleemanna (dokładność ~15%) (empiryczny)

$$\frac{\overline{R}\rho}{\sqrt{A}} = \text{const}$$

Absorbent = związek lub mieszanina:

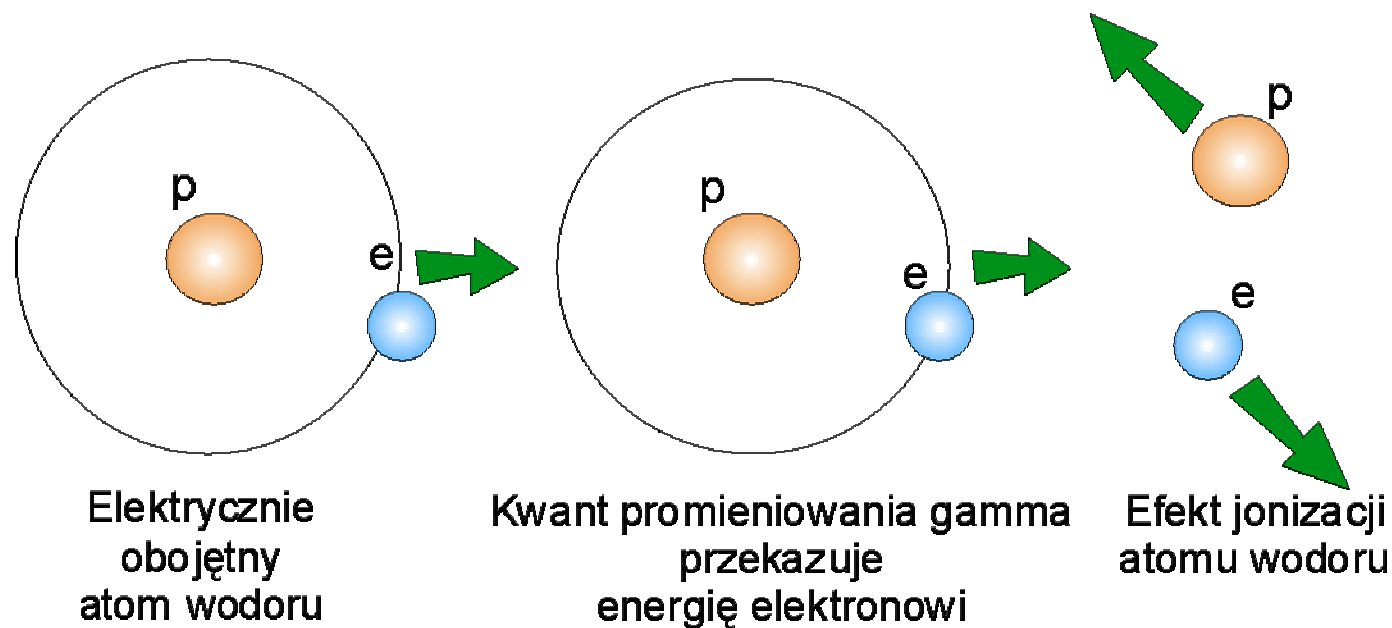
$$\sqrt{A} = \delta_1 \sqrt{A_1} + \delta_2 \sqrt{A_2} + \dots$$

np. powietrze: $\sqrt{A} = 3.81$; $\rho_p = 1.26 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

$$\overrightarrow{R_A} = 3.2 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{A}}{\rho_A} \cdot \overrightarrow{R_{pow}}$$

ODDZIAŁYWANIE PROMIENIOWANIA β Z MATERIAŁ

- jonizacja
- zderzenia elastyczne z jądrami i elektronami
- zderzenia nieelastyczne z jądrami i elektronami (promieniowanie hamowania)
- anihilacja dla pozytonów



Przekrój czynny na dany proces (= prawdopodobieństwo zajścia procesu)

N = gęstość centrów oddziaływań (np. 1. atom./j. obj.)

$$dn = -\sigma \cdot n \cdot N \cdot dx \quad \sigma = -\frac{1}{n \cdot N} \cdot \frac{dn}{dx}$$

σ -przekrój czynny na oddziaływanie

$[\sigma] = 1 \text{ b (1 barn)}$

$$1b = 4\pi \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 \approx 10^{-24} \text{ cm}^2$$

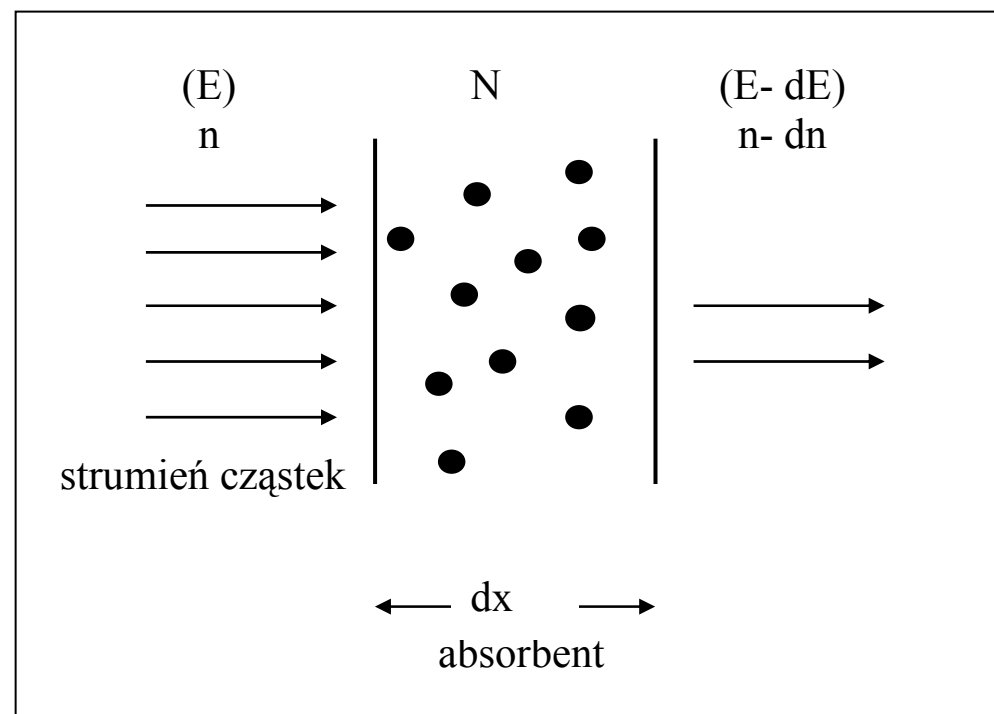
$\frac{e^2}{m_e c^2}$ = klasyczny promień elektronu

lub inaczej

$dE = -\sigma \cdot E \cdot N \cdot dx$ (absorbent usuwa część energii dE z padającej energii prom. E)

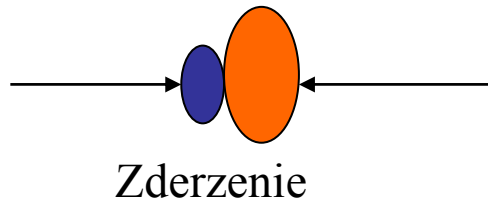
$\sigma = \frac{1}{E \cdot N} \cdot \left(-\frac{dE}{dx} \right)$ gdy możliwe jest wiele niezależnych procesów

$\sigma_{TOT} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots$ (tot= total)

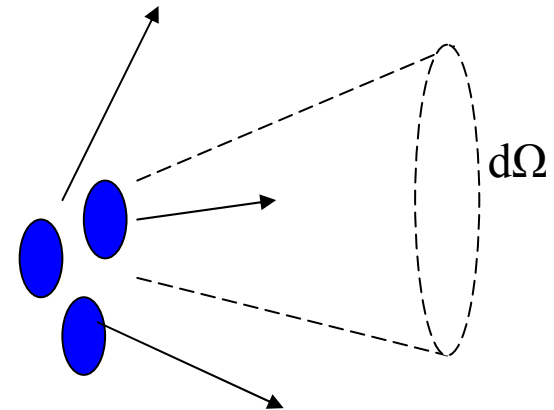


RÓŻNICZKOWE PRZEKROJE CZYNNE

- rozkład kątowy $\frac{d\sigma}{d\Omega}$; $(d\Omega, (\theta, \varphi))$



Produkcja nowych
cząstek



- rozkład energetyczny $\frac{d\sigma}{dE}$; $(E, E + dE)$

ABSORPCJA ELEKTRONÓW

$E \leq 0.1 \text{ MeV}$ elektrony nierelatywistyczne

– jonizacja

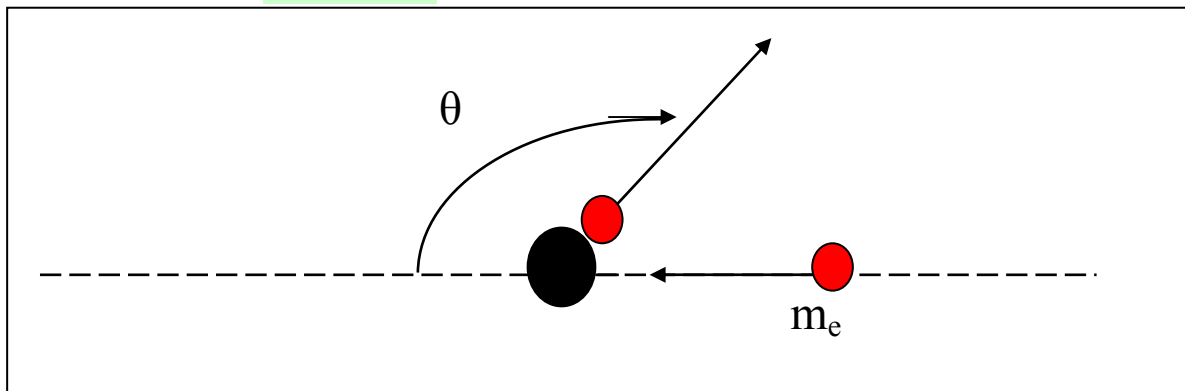
$$\sigma_j = \frac{1}{NE} \left(\frac{dE}{dx} \right)$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\sigma_j \approx 2 \frac{Z}{\beta^4} \ln \frac{\sqrt{2}E}{I} \quad \text{b/atom}$$

– rozpraszanie elastyczne na jądrach, $m_e \ll m_j$, rozpraszanie wsteczne

$$\theta \geq 90^\circ \quad \sigma_m \approx \frac{1}{4} \frac{Z^2}{\beta^4} \text{ b/atom}$$



– rozpraszanie sprężyste na elektronach

$$(0 < \theta < 90^\circ) \quad 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad \sigma_{re} \approx \frac{2Z}{\beta^4} \text{ b/atom}$$

– rozpraszanie nieelastyczne, emisja promieniowania hamowania (prom. X)

$$\sigma_p \approx \frac{8}{3\pi} \frac{1}{137} \frac{Z^2}{\beta^2} \text{ b/atom}$$

Przykład, $e_e \approx 0.1 \text{ MeV}$

Material	σ_j [b/atom]	σ_{rn} [b/atom]	σ_{re} [b/atom]	σ_p [b/atom]
Powietrze	1700	150	230	1.3
Pb	13700	20000	2600	170

– straty energii na jednostkę drogi

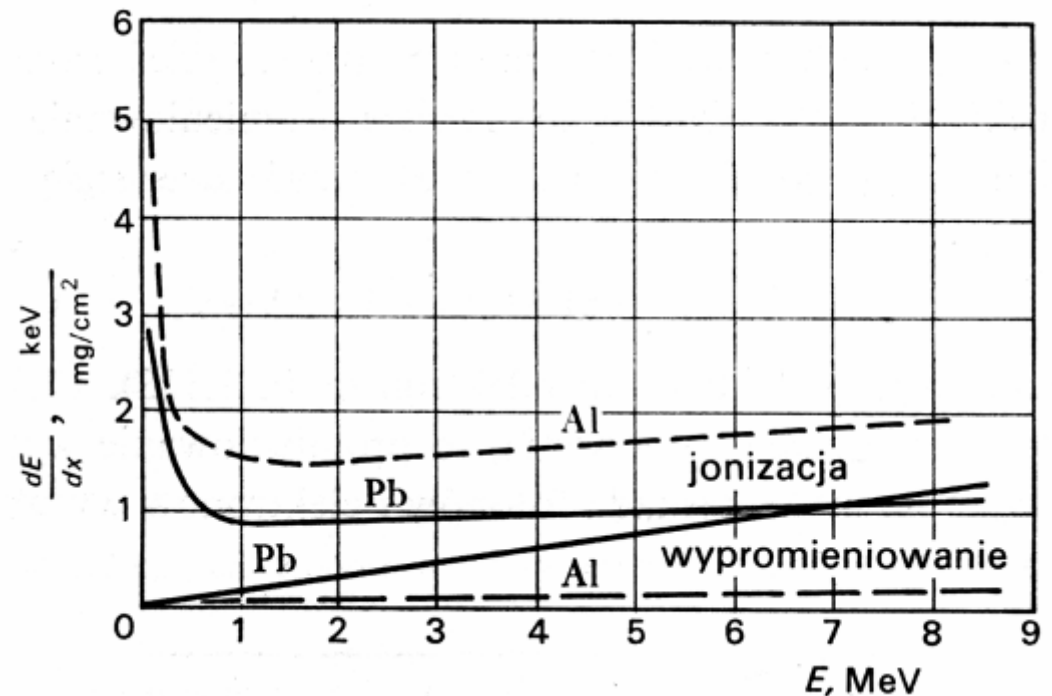
$$\frac{dE}{dx} = f(E_e, Z)$$

E_c = energia krytyczna:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_j = \left(\frac{dE}{dx}\right)_p$$

$E_c \approx 7\text{MeV}$ dla Pb

$E_c = 340\text{ MeV}$ dla H



dla dużych energii elektronu $E_e \gg m_0 c^2$

(L – długość radiacyjna dla danego absorbenta)

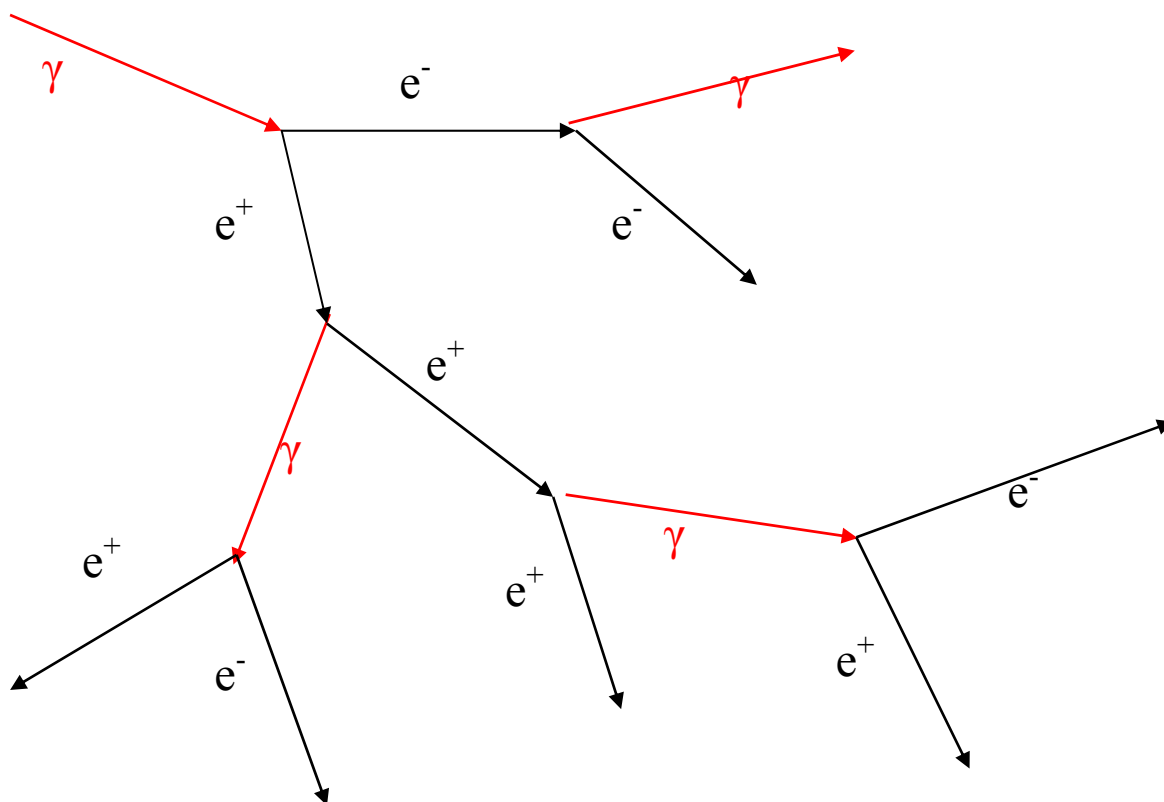
$$\frac{dE}{dx} \sim E \quad \Rightarrow \quad \frac{dE}{dx} = -\frac{1}{L} E \quad \Rightarrow \quad E = E_0 e^{-x/L}$$

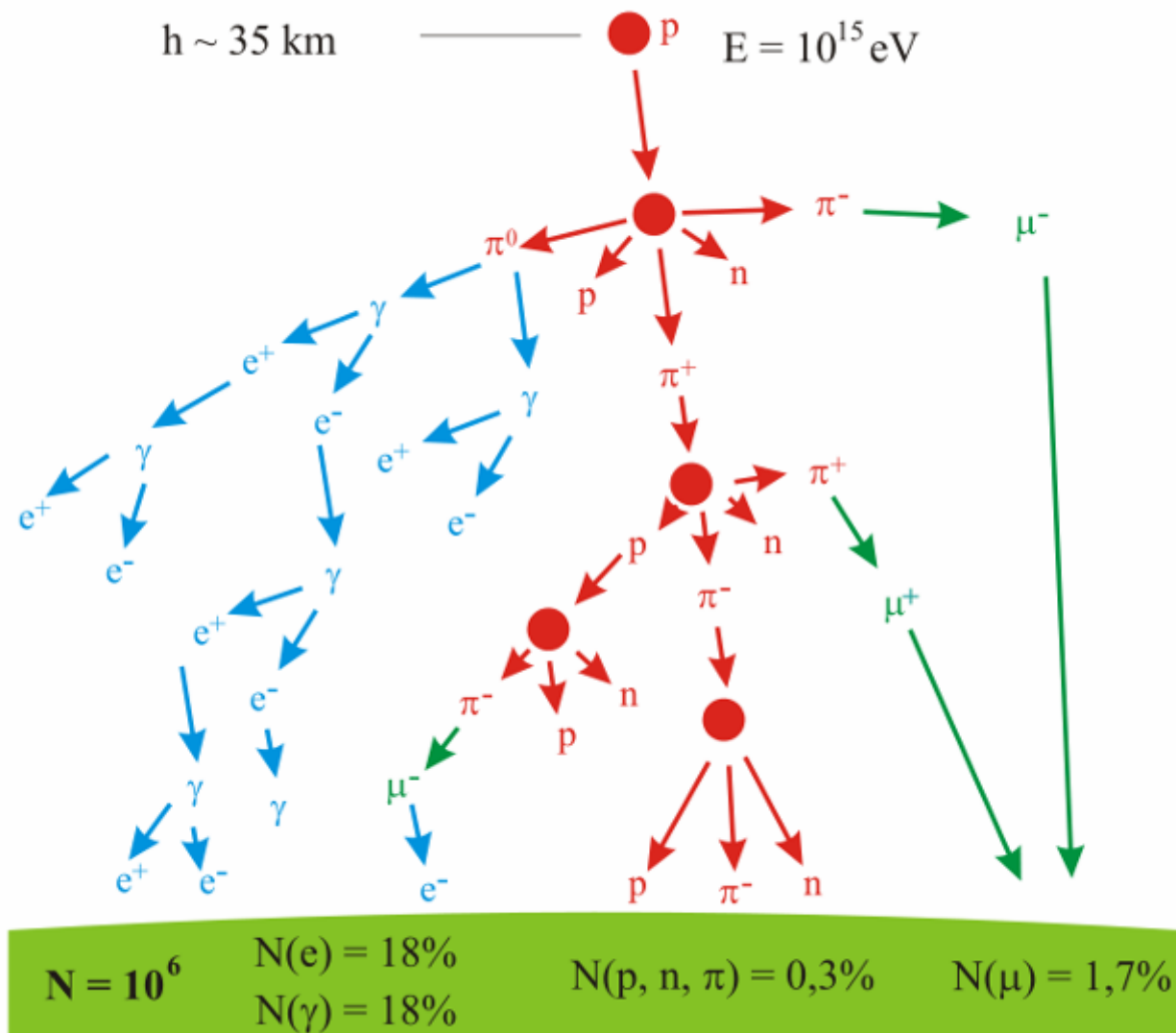
TWORZENIE PĘKÓW ELEKTRONOWO-FOTONOWYCH

$$E_\gamma > 2m_0c^2 = 2 \cdot 0.511 \text{ MeV} = 1.02 \text{ MeV} \text{ (prom. hamow.)}$$

$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ kreacja par (e^+ , e^-)

(anihilacja par e^+ , e^-)

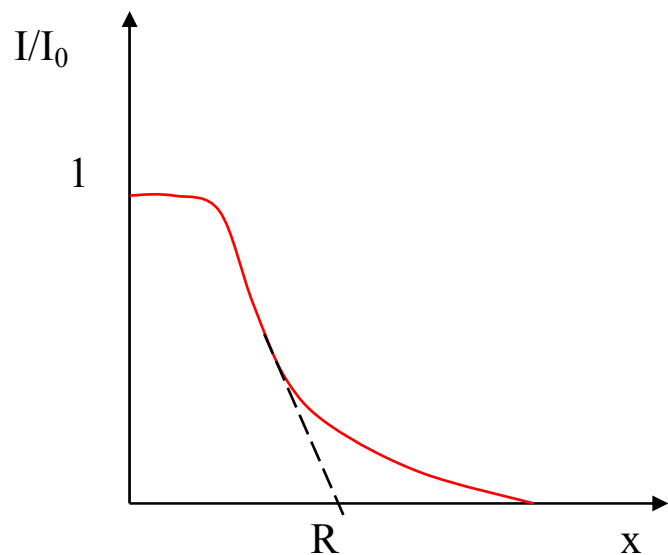




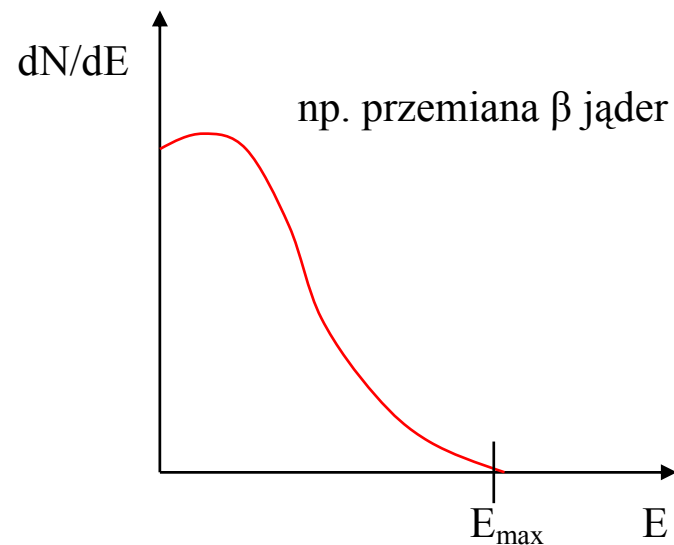
Wielki pęk atmosferyczny

KRZYWE ABSORPCJI

- elektrony monoenergetyczne

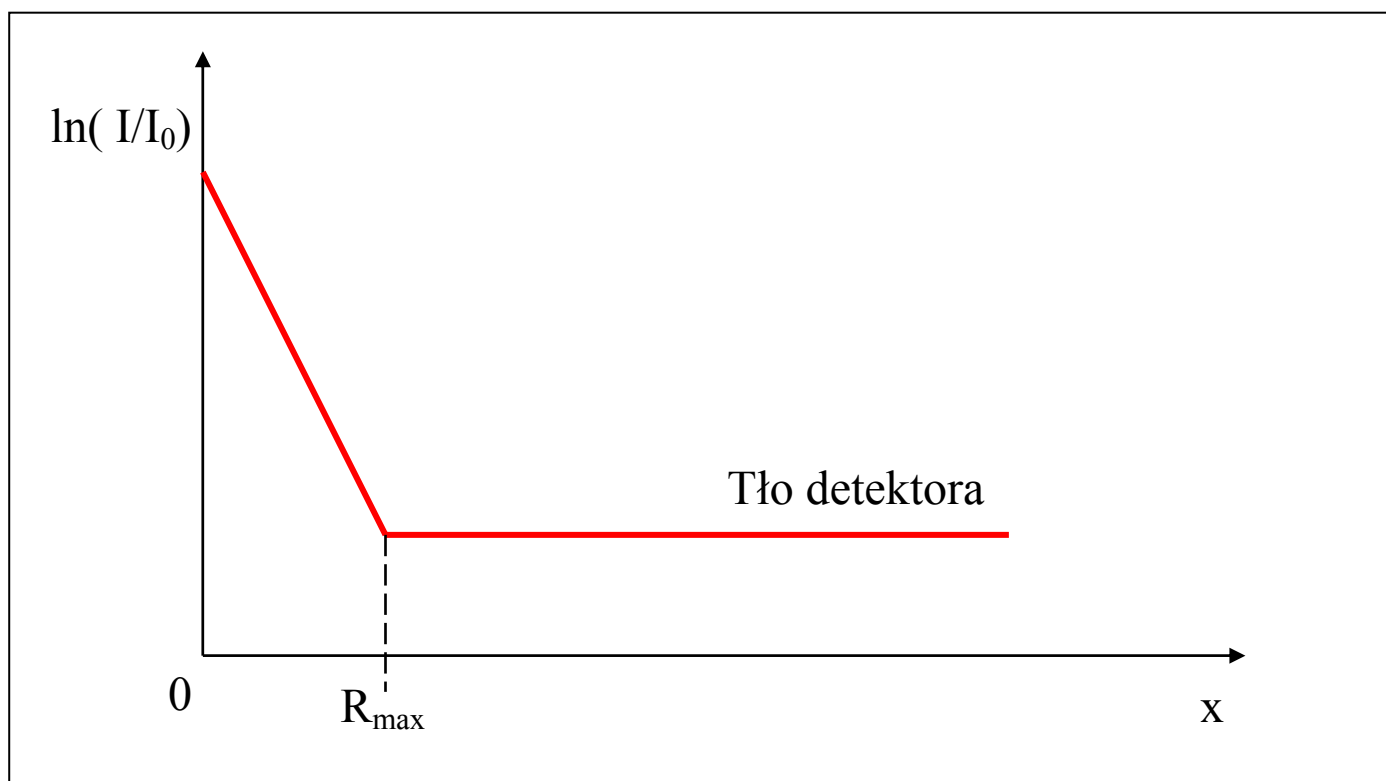


- elektrony o widmie ciągłym



$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

μ - liniowy współczynnik absorpcji
 μ/ρ - masowy współczynnik absorpcji
 $\mu/\rho \approx \text{const}$ (nie zależy od ρ i Z)

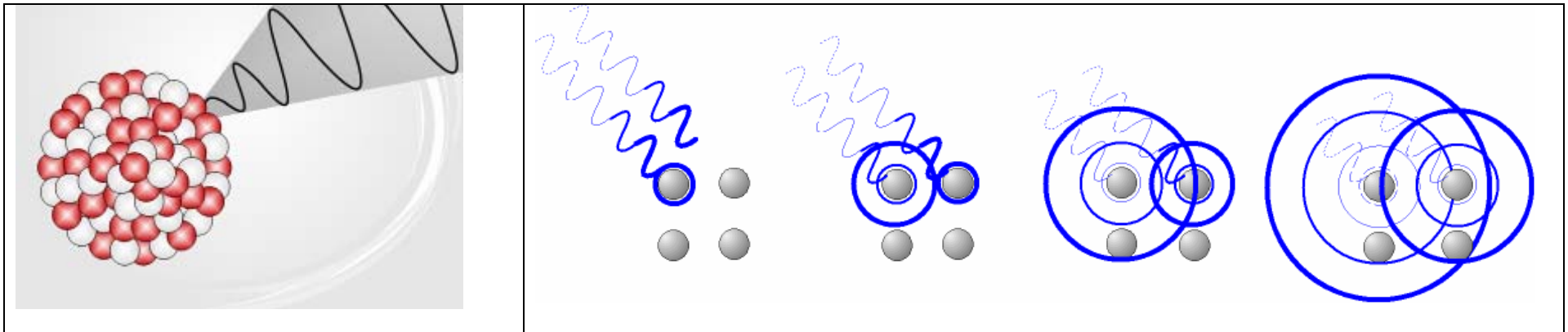


$\mu/\rho \rightarrow$ z zależności $I(x) \rightarrow E_{\max}$ w widmie prom. β

ODDZIAŁYWANIE PROMIENIOWANIA γ Z MATERIAŁ

(oddziaływanie z elektronami i jądrami atomów)

- absorpcja
- rozpraszanie sprężyste
- rozpraszanie niesprężyste



ABSORPCJA

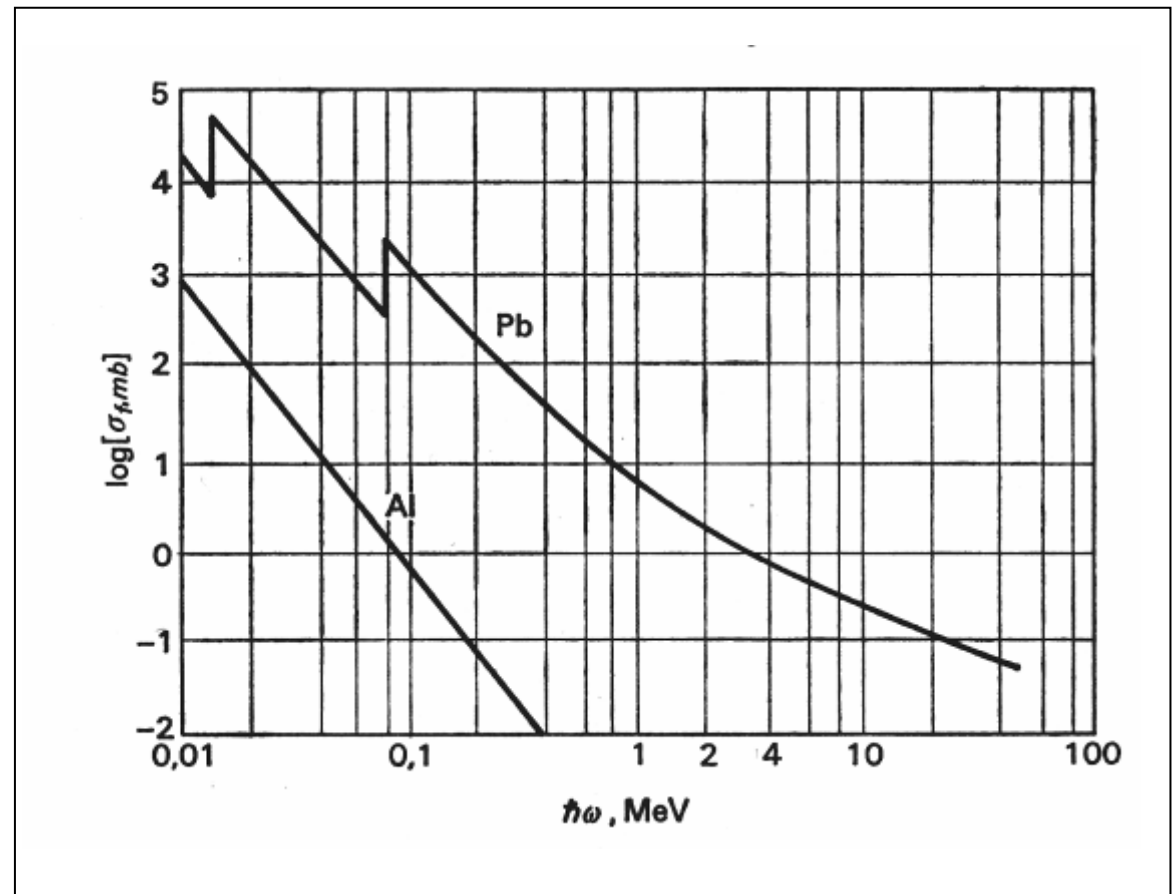
- Zjawisko fotoelektryczne (głównie z powłoki K atomu)

$$E_f = \hbar\omega = E_e + E_B \quad E_B - \text{energia wiązania } e^- \text{ na powłoce}$$

$$\sigma_f \approx c \frac{Z^a}{(\hbar\omega)^b} \quad a, b, c - \text{stałe}$$

$$\left. \begin{array}{l} a = 4 \\ b = 3.5 \end{array} \right\} \Rightarrow \hbar\omega \ll 0.5 \text{ MeV} = m_0 c^2$$

$$\left. \begin{array}{l} a = 4.5 \\ b = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \hbar\omega \gg 0.5 \text{ MeV}$$



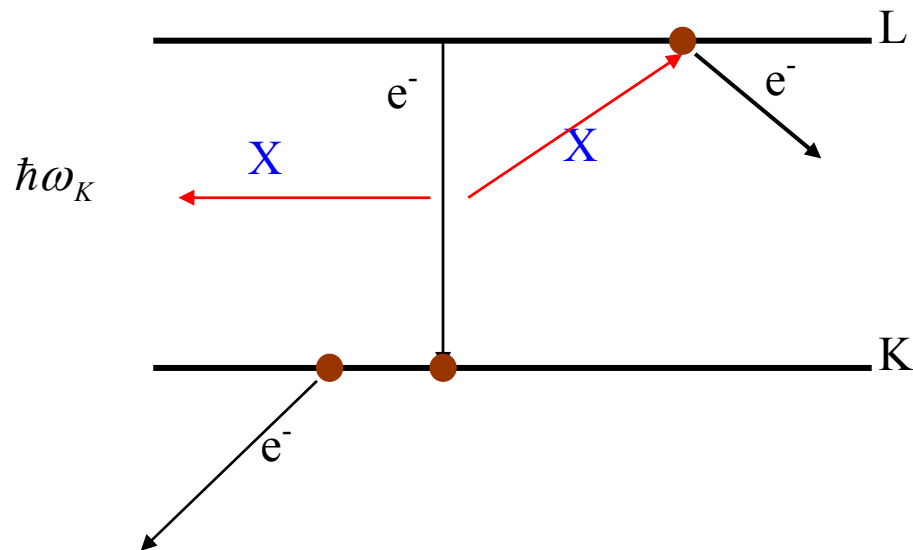
- Elektrony Augera

$$\hbar\omega_K = E_K - E_L$$

$$\hbar\omega_K - E_L = E_K - 2E_L$$

E_K, E_L - energie wiązania elektronu na powłoce K, L, i.t.d.

Energia elektronu Augera z powłoki L



- Rozpraszanie Comptona

$E_f \gg E_B$ elektrony w atomach = elektrony swobodne

$$\vec{p}_f = \frac{\hbar \omega}{c}$$

$$E_f = \hbar \omega$$

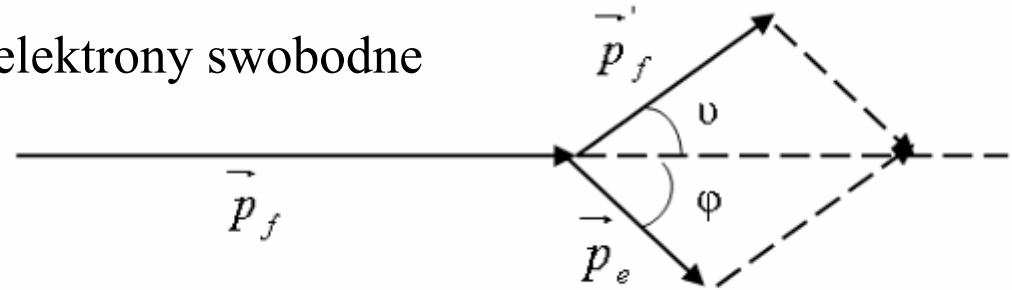
$$\vec{p}_f = \vec{p}_f' + \vec{p}_e$$

$$E_f = E_f' + E_e$$

$$E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

$$E_f' = \frac{E_f}{1 + \frac{E_f}{m_0 c^2 (1 - \cos \vartheta)}}$$

$$E_e = E_f - E_f'$$



Def.: $\alpha = \hbar \omega / m_0 c^2$

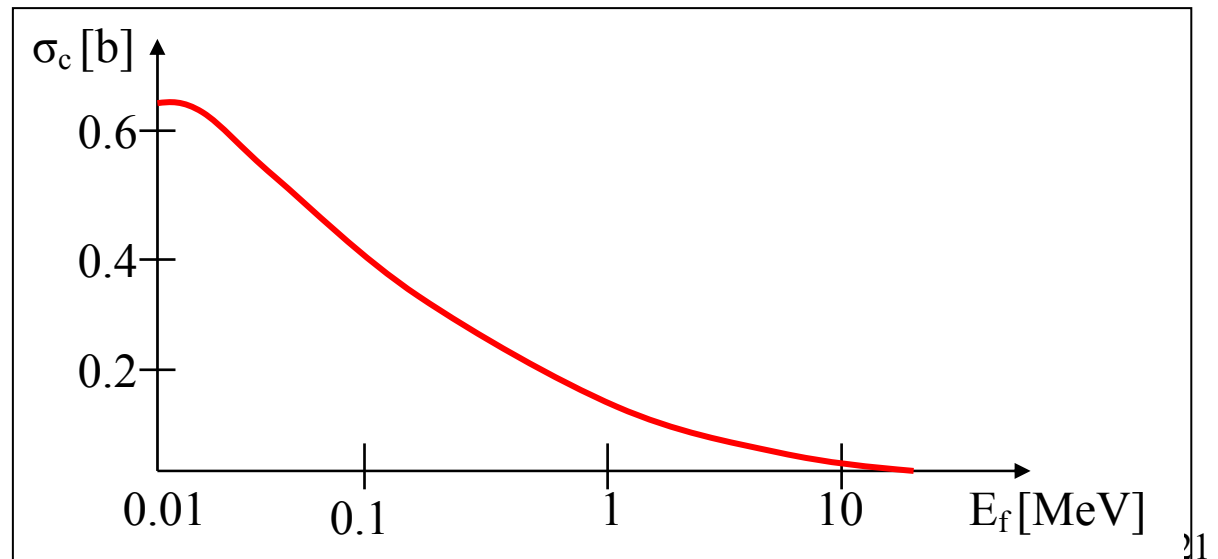
$\sigma_c = \sigma_c(\alpha)$ wzór **Kleina- Nishiny**

$$\alpha \ll 1$$

$$\sigma_c \approx \frac{2}{3}(1 - 2\alpha) \text{ b/atom}$$

$$\alpha \gg 1$$

$$\sigma_c \approx \frac{1}{4\alpha}(\ln 2\alpha + \frac{1}{2}) \text{ b/atom}$$



- Zjawisko tworzenia par (w obecności jąder)

$$E_f > 2m_0c^2 = 1.02 \text{ MeV}$$

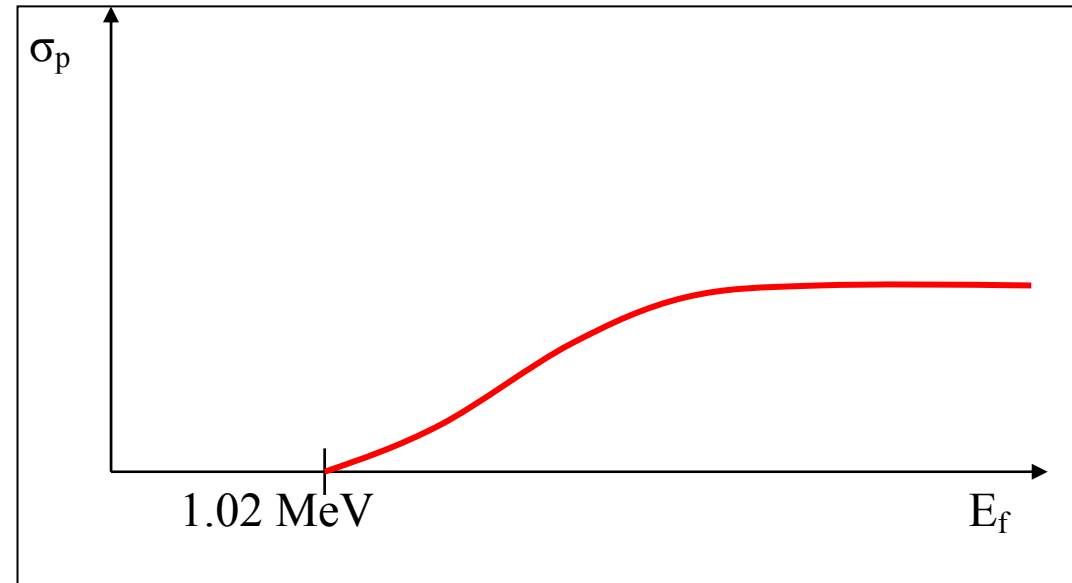
$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

$$E_{e^+e^-} = \hbar\omega - 2m_0c^2$$

$$\sigma_p = \frac{1}{137} \left(\frac{e^2}{m_0c^2} \right) Z^2 f(E_f)$$

$$f(E_f) \sim \ln E_f$$

$$f(E_f) = \text{const. dla b. dużych energii}$$



Całkowity przekrój czynny

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_f + Z\sigma_{\text{tot}} + \sigma_p \quad [\text{b/atom}]$$

$$dI = -\mu I dx \quad \text{nie jest to absorpcja zasięgowa}$$

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu = n \sigma_{\text{tot}} \quad n - \text{liczba atomów absorbenta w jednostce objętości}$$

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p \quad \text{liniowy współczynnik absorpcji}$$

$$\mu/\rho \quad \text{współczynnik masowy absorpcji}$$

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N} \cdot \frac{N}{A} \cdot \rho = n \sigma \right)$$

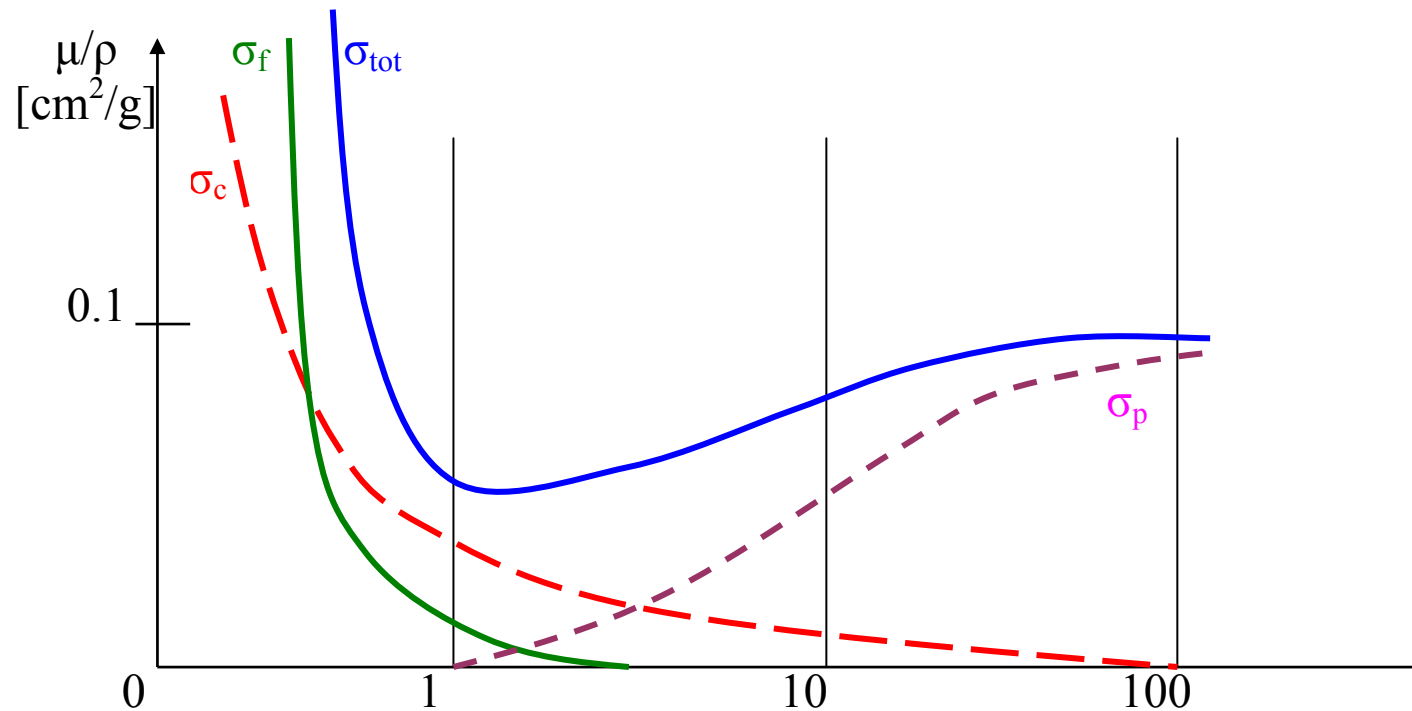
$$\sigma = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N}$$

$$\frac{\mu}{\rho} = n \cdot \frac{\sigma}{\rho} = \sigma \cdot \frac{N_A}{A}$$

$$\frac{\mu_A}{\rho} = \sigma_A \cdot N_A \cdot \frac{Z}{A}$$

nie zależy od rodzaju pierwiastka,
ponieważ $(Z/A) \approx \text{const} \approx 0.45$ dla
wszystkich pierwiastków

np. **OŁÓW** absorbentem



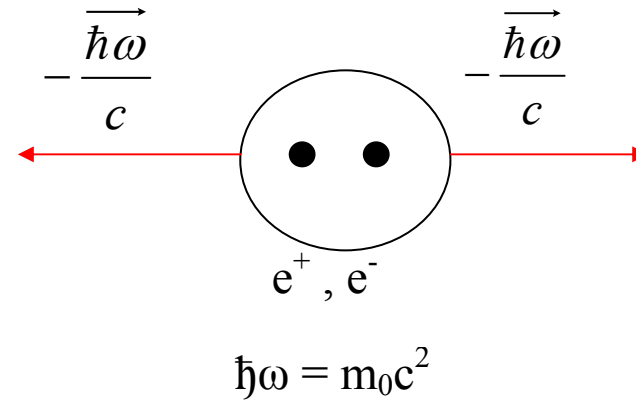
- Anihilacja pozytonów i elektronów**

$e^+ + e^-$ (swobodny) $\rightarrow 2\gamma$ anihilacja 2 – fotonowa dla małych energii e^+ i e^-

$$\vec{p}_e = \vec{p}_p = 0 \Rightarrow e^+, e^- - w_spoczynku$$

$$\frac{\hbar\omega}{c} + \frac{\hbar\omega'}{c} = 0$$

$$\hbar\omega + \hbar\omega' = 2m_0c^2$$



$$\bar{\tau} = 1.3 \cdot (1/n) \cdot 10^{20} \text{ s} \approx 10^{-7} \div 10^{-8} \text{ s}$$

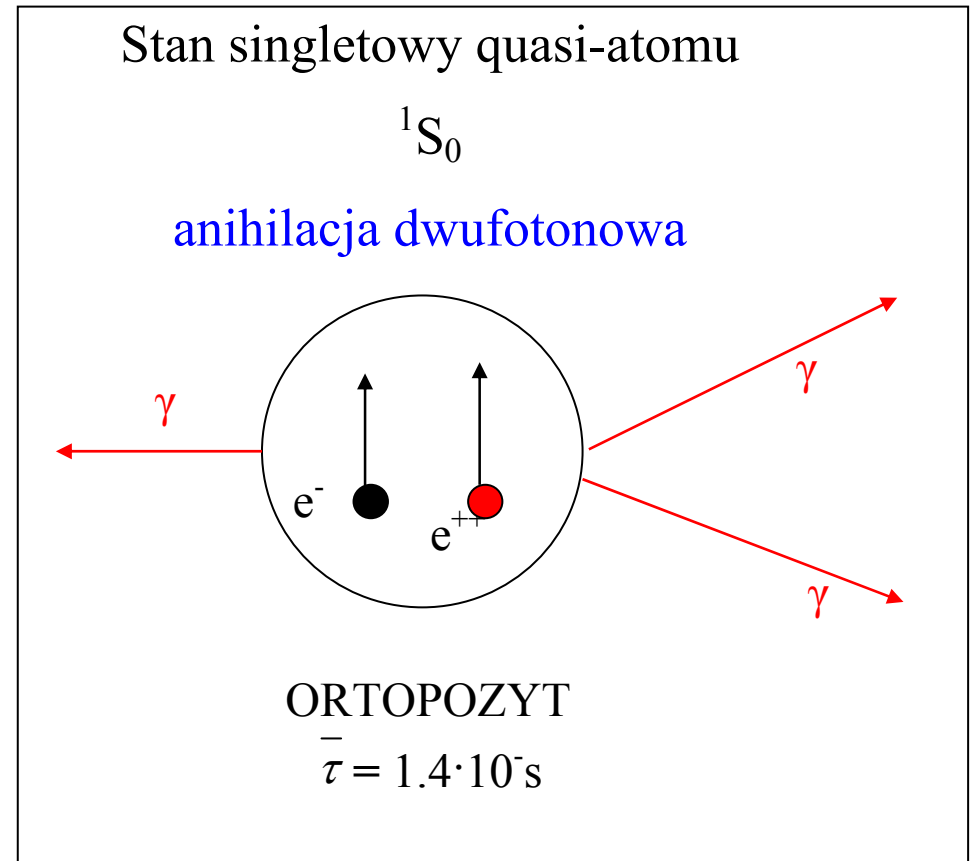
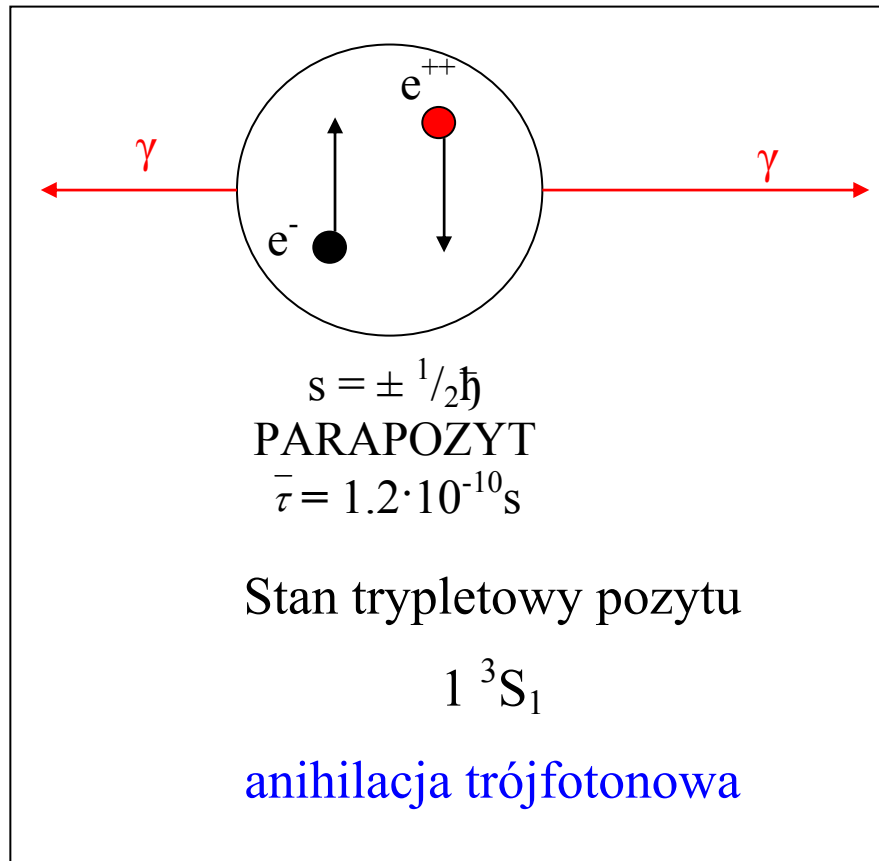
średni czas życia pozytonu ze względu na anihilację dwufotonową

n – gęstość elektronów ośrodka

- Mechanizm anihilacji**

POZYT = (e^+e^-) = nietrwały quasi – atom

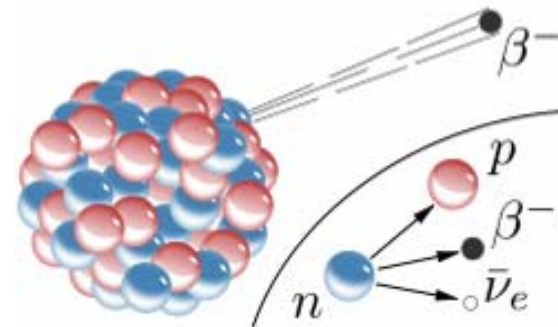
$E(e^+) \sim \text{eV}$ (po spowolnieniu e^+)



(zachowane: pęd, spin, parzystość)

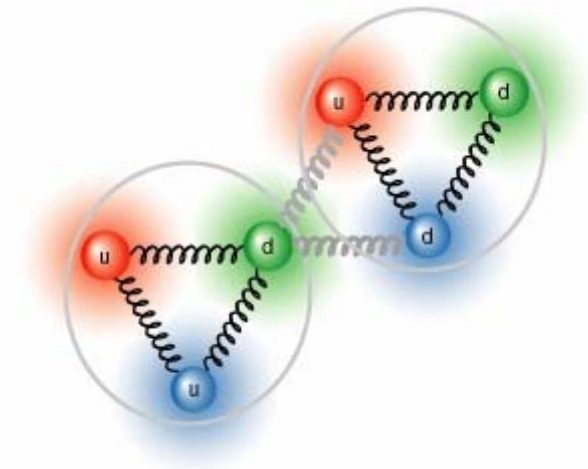
ODDZIAŁYWANIE NEUTRONÓW Z MATERIA

- Oddziaływanie za pomocą sił jądrowych
- Detekcja n ← wykorzystanie zjawisk, w których wytwarzane jest promieniowanie jonizujące w zależności od E_n :
 - rozpraszanie elastyczne neutronów na protonach
 - reakcje jądrowe z emisją cząstek naładowanych
 - wzbudzona promieniotwórczość jąder (rozpad β)



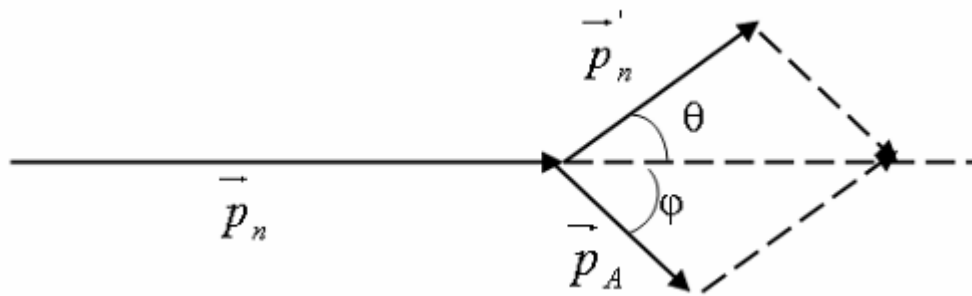
PODZIAŁ NEUTRONÓW

powolne	$0 < E < 1 \text{ keV}$
- zimne	$E \sim 10^{-3} \text{ eV}$ ($t = 11 \text{ k}$)
- termiczne	$E \sim 0.025 \text{ eV}$ ($t = 300 \text{ k}$)
- rezonansowe	$1 \text{ eV} < E < 1 \text{ keV}$
pośrednich energii	$1 < E < 500 \text{ keV}$
prędkie	$0.5 < E < 50 \text{ MeV}$
wysokich energii	$E > 50 \text{ MeV}$



ROZPRASZANIE SPRĘŻYSTE

układ laboratoryjny



A – jądro o masie M_A i liczbie masowej A

$$p_n'^2 = p_n^2 + p_A^2 - 2p_n p_A \cos \varphi$$

$$E_n' = E_n - E_A$$

$$E_n = \frac{p_n^2}{2M_n}, E_n' = \dots, E_A = \dots$$

energia jądra odrzutu: $E_A = \alpha E_n \cos^2 \varphi$, $\alpha = \frac{4M_n M_A}{(M_n + M_A)^2} \approx \frac{4A}{(1+A)^2} \quad \left(\frac{M_n}{M_A} \approx \frac{1}{A} \right)$

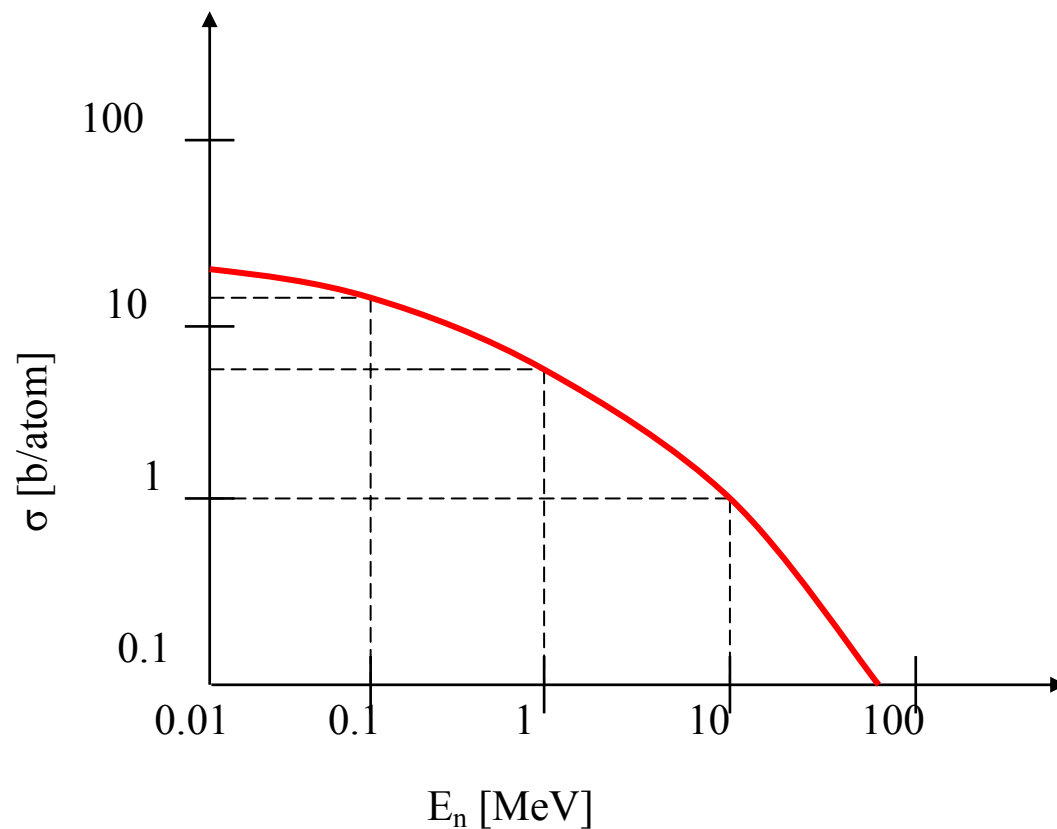
energia rozproszonego neutronu: $E_n' = \frac{M_n E_n}{(M_n + M_A)^2} \left[\cos \theta + \sqrt{\left(\frac{M_A}{M_n} \right)^2 - \sin^2 \theta} \right]^2$,

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{\alpha M_A / M_n}{1 - \alpha \cos^2 \varphi}} \cos \varphi \sin \varphi$$

Jądro wodoru (protonu): $A = 1$

$$E_p = E_n \cos^2 \varphi$$

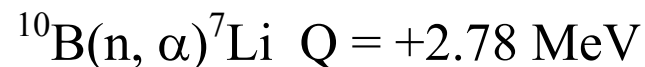
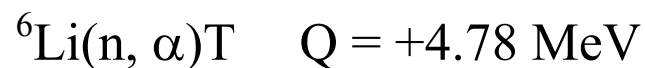
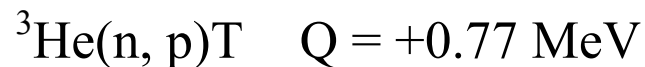
dla $E_n > 100$ eV rozpraszanie sprężyste jest praktycznie jedynym procesem oddziaływań neutronów z protonami



REAKCJE JĄDROWE

- Reakcje typu: $[(n, p), (n, \alpha)], [(n, \gamma), (n, 2n)]$ metody aktywacyjne

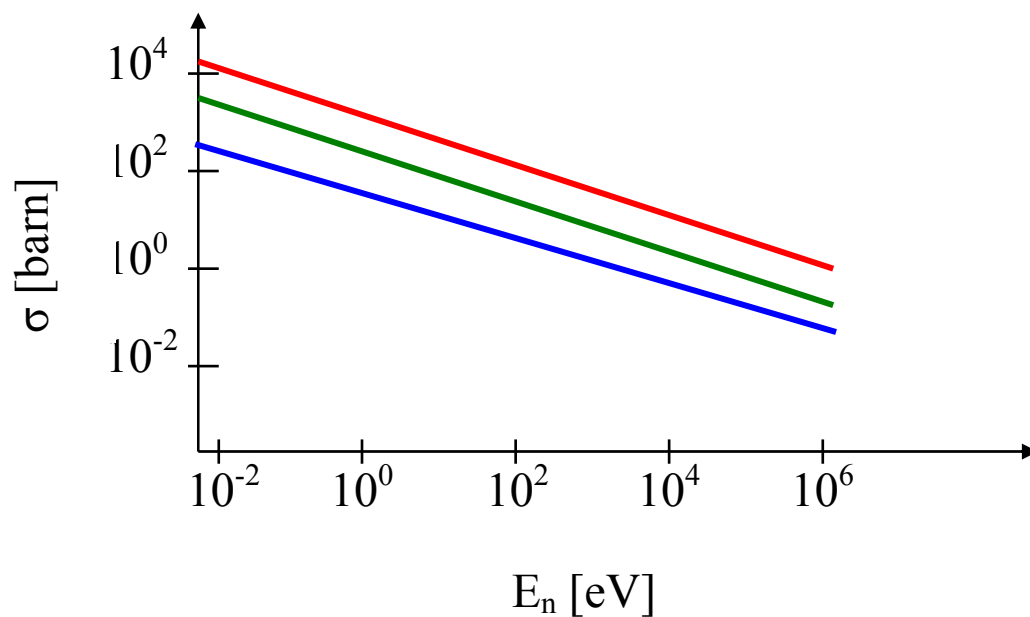
np. $Q > 0$



reakcje egzotermiczne

↓↓

zachodzą dla najpowolniejszych neutronów

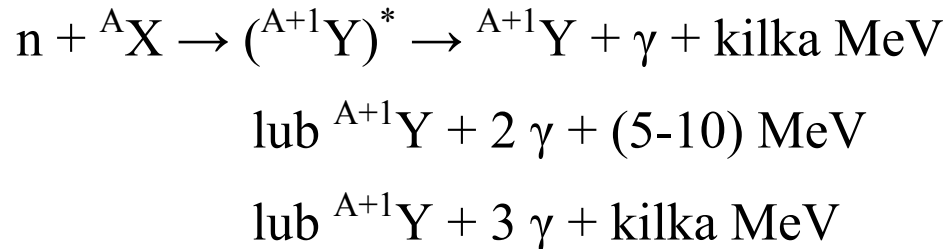


${}^3\text{He} + n$
 ${}^{10}\text{B} + n$
 ${}^6\text{Li} + n$

Są to reakcje z dużym przekrojem czynnym.

- $[(n, \gamma), (n, 2n)]$ aktywacja neutronowa (reakcje aktywacji neutronowej)

(n, γ) – wychwyt radiacyjny neutronu (reakcja egzotermiczna)



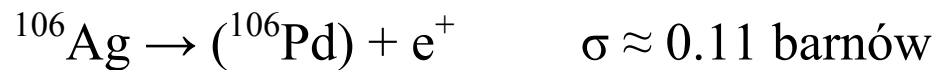
np.

$n + {}^{135}\text{Xe}$	$\sigma \approx 10^6$ barnów	duża zmienność σ
$n + d$ (deuteron)	$\sigma \approx 10^{-4}$ barnów	duże σ dla neutronów termicznych rezonansowych



- **[(n, 2n)]** (reakcja endotermiczna) reakcja progowa

$$E_{\text{pr}} = Q (1 + 1/A) \quad \text{zwykle } E_{\text{pr}} > (8-10) \text{ MeV}$$

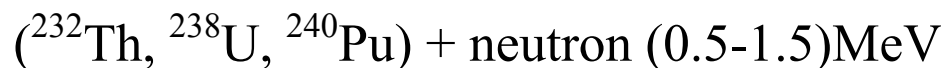
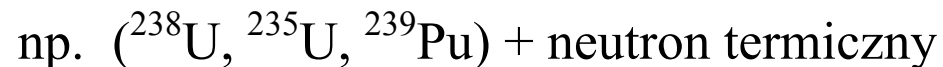


małe przekroje czynne $\sigma \sim (0.2-1.0) \text{ barna}$,

największe w pobliżu E_{pr}

- **[(n, f)]** reakcje rozszczepienia jąder (jądra niestabilne ze względu na rozpad α)

f – fragment rozszczepionego jądra



Jeden akt rozszczepienia:

~ 3 neutrony

~ 5-7 γ ($E_\gamma \sim 1$ MeV)

neutrony opóźnione

α z rozpadu fragmentów

β z rozpadu fragmentów

To podlega rejestracji

