

BIOFIZYKA RADIACYJNA

wykład #3

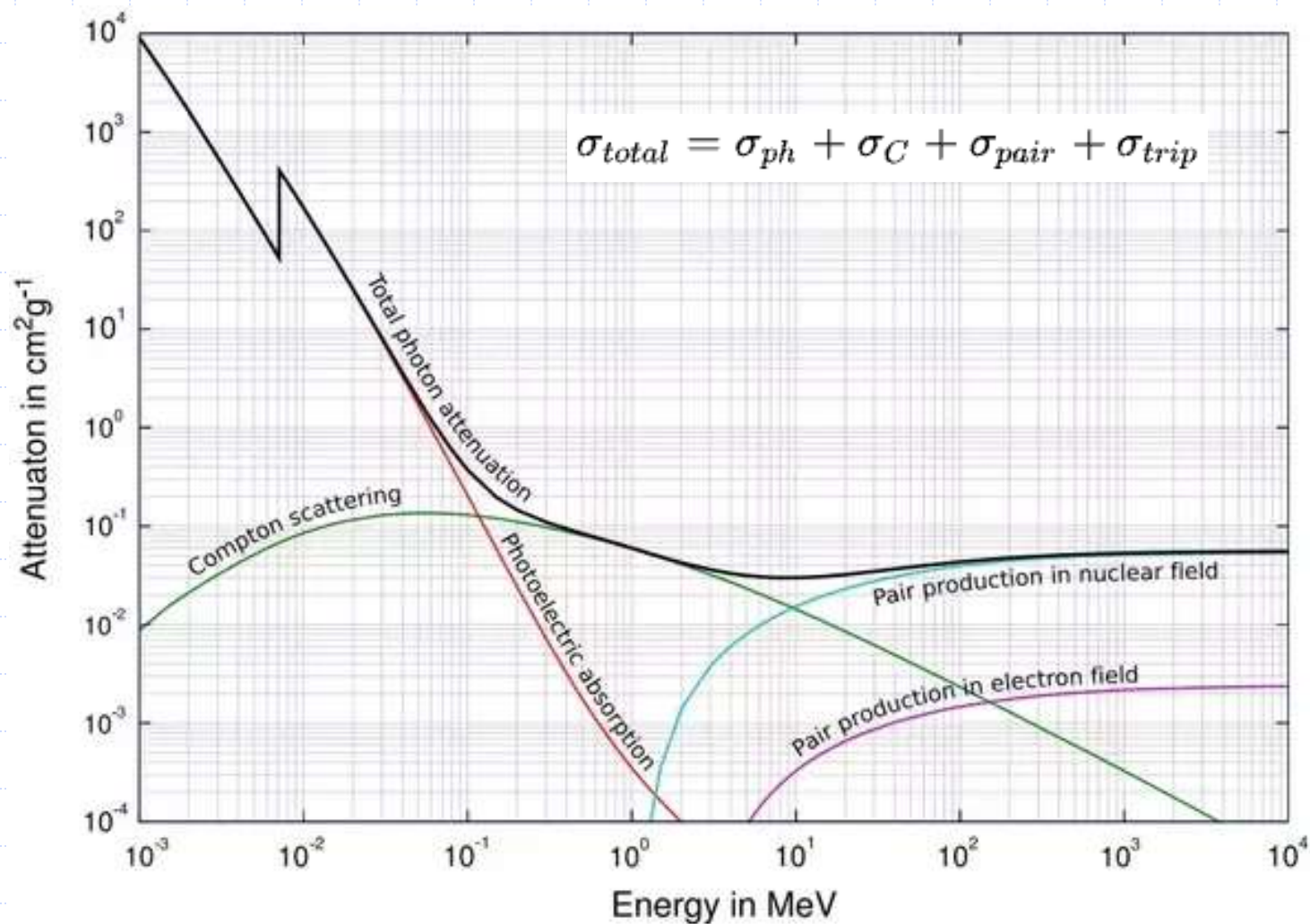
Krzysztof Wojciech Fornalski

Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

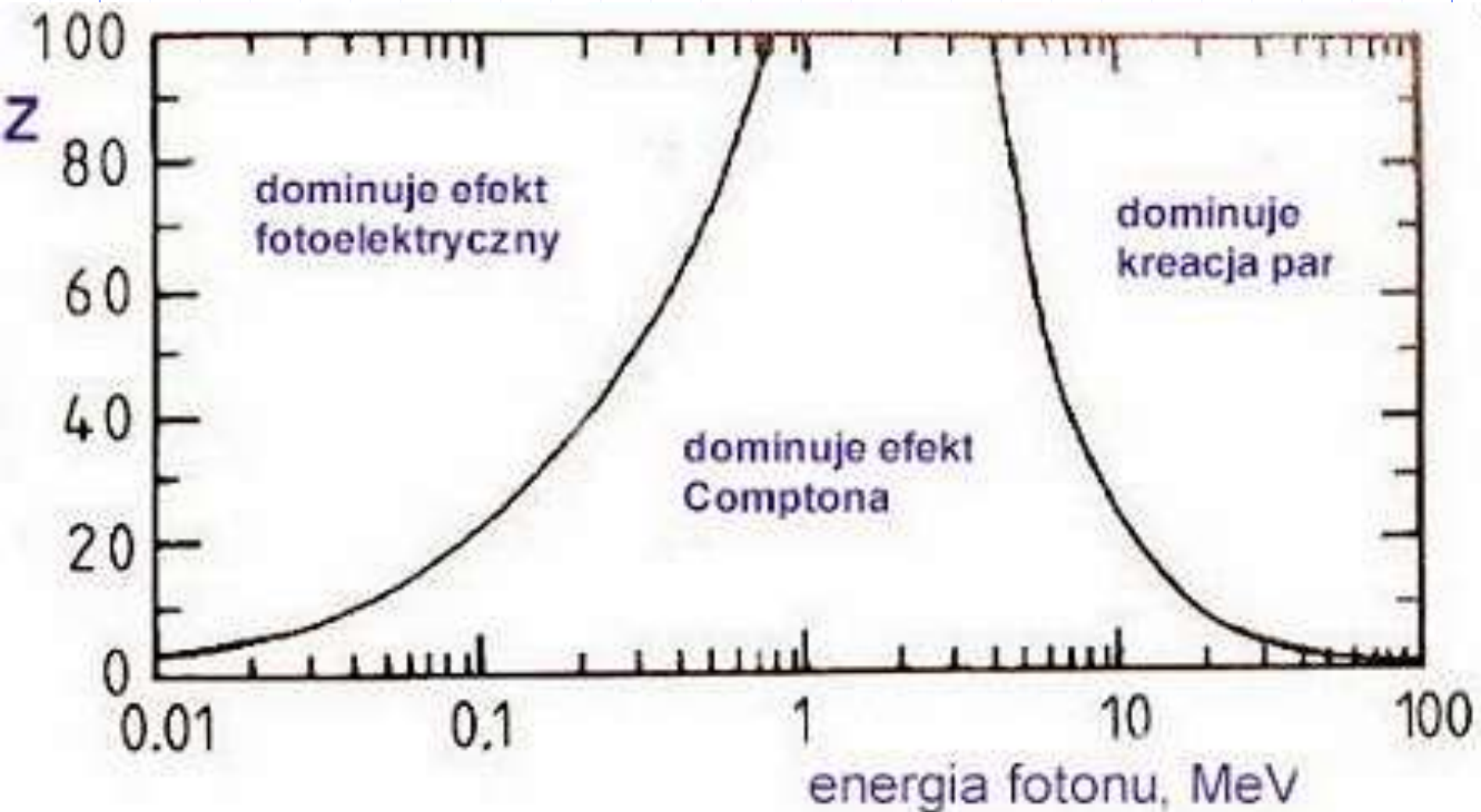
ODDZIAŁYWANIE FOTONÓW Z MATERIAŁ

- PRZYPOMNIENIE

Całkowity przekrój czynny



Dominacja danego efektu w zależności od energii



Współczynnik pochłaniania promieniowania

◆ Z przekroju czynnego można łatwo obliczyć współczynniki pochłaniania promieniowania:

■ liniowy, μ

$$\mu = \sigma_{total} N \quad (\text{czasem oznaczany jako } \mu_x)$$

■ masowy, μ_d

$$\mu_d = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{total}}{uA}$$

gdzie: N – liczba centrów oddziaływania (gęstość atomowa absorbentu), ρ – gęstość masowa, u – jednostka masy atomowej, A – liczba masowa

$$\sigma_{total} = \sigma_{ph} + \sigma_C + \sigma_{pair} + \sigma_{trip}$$

Pochłanianie promieniowania

- ◆ Na podstawie całkowitego przekroju czynnego obliczyliśmy współczynnik pochłaniania promieniowania (masowy lub liniowy) – i co dalej?
- ◆ Z prawa Beer'a-Lambert'a-Bouguer'a obliczamy frakcję promieniowania, które przeszło przez absorbent o grubości x :

$$\frac{N(x)}{N_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_d \rho x}$$

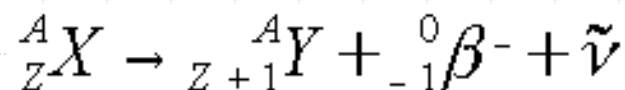
- ◆ Wrócimy do tego tematu przy okazji omawiania osłoności



ODDZIAŁYWANIE PROMIENIOWANIA BETA Z MATERIAŁ

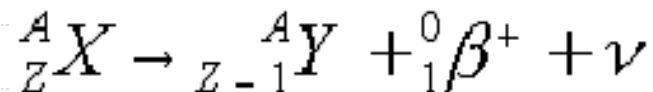
Promieniowanie beta - przypomnienie

- ◆ Strumień elektronów lub pozytonów
- ◆ Przemiana (rozpad) beta minus:



rozpad β^-

- ◆ Przemiana (rozpad) beta plus:

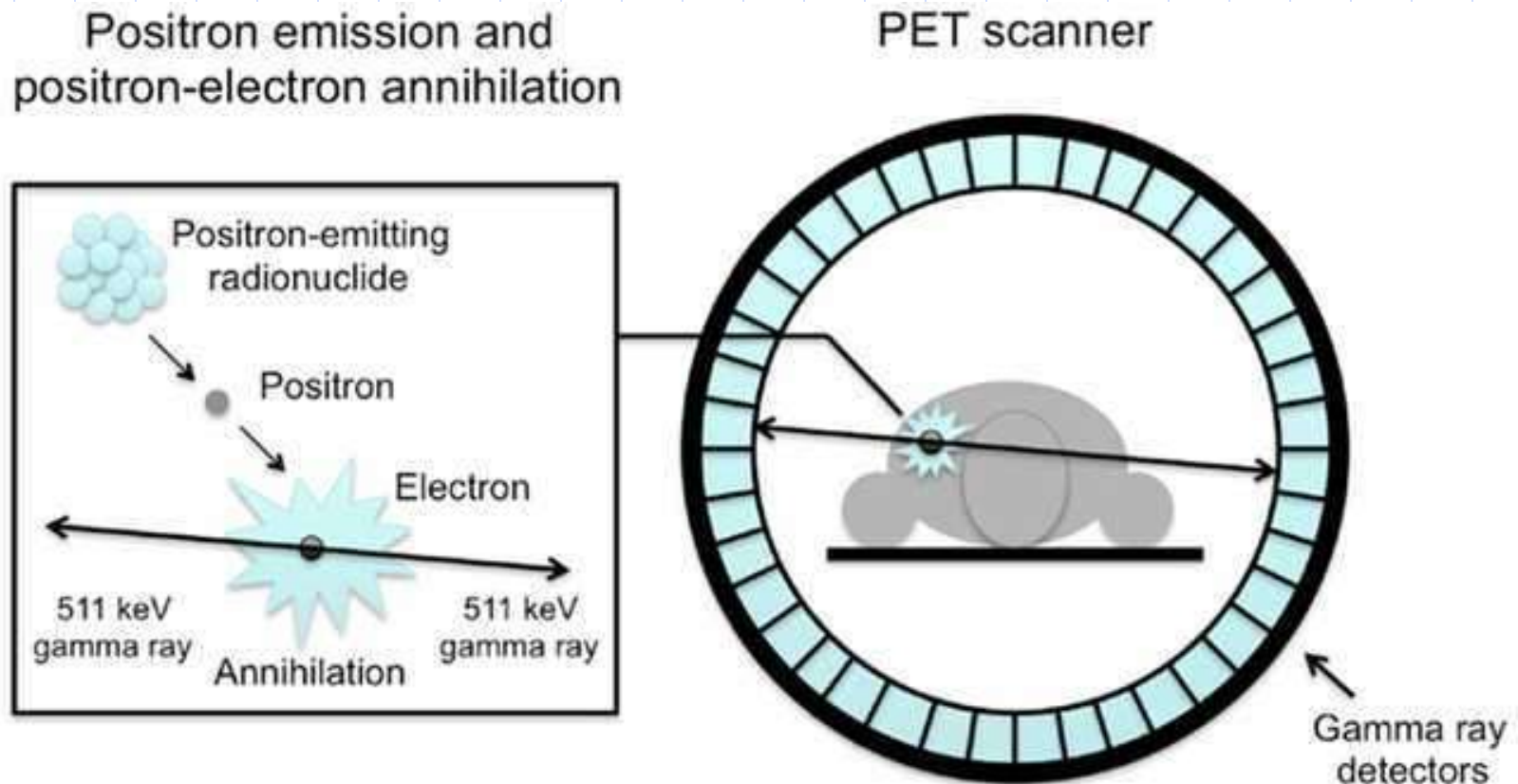


rozpad β^+

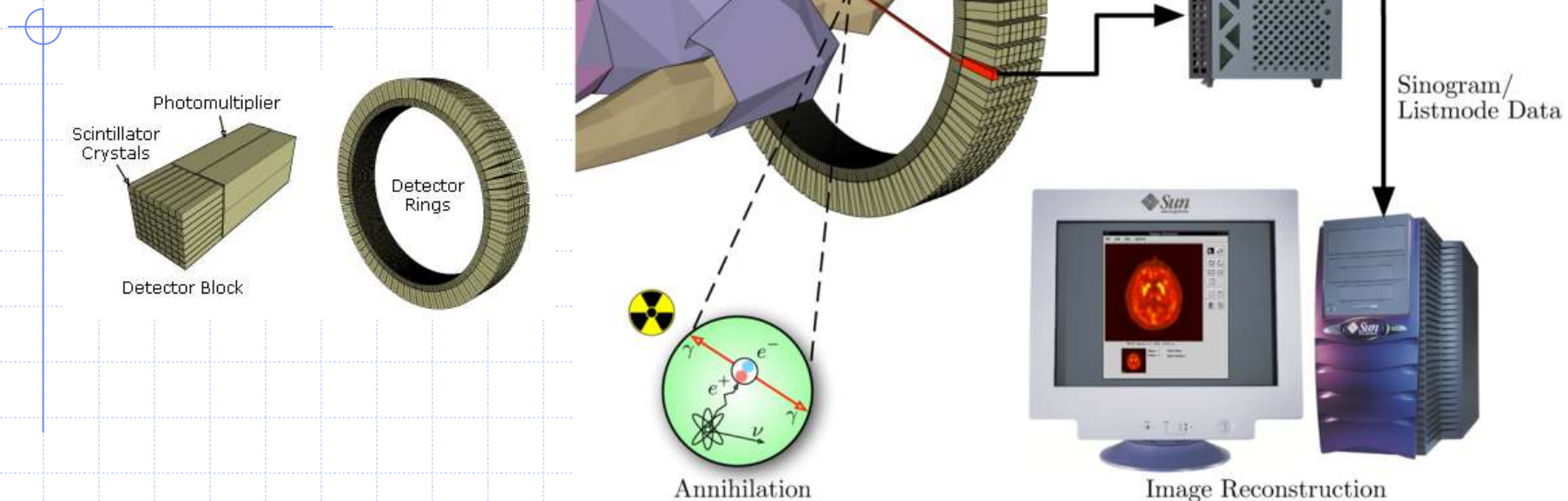
Uwaga! Anihilacja pozytonu!

Dygresja: anihilacja pozytonu – wykorzystanie w diagnostyce

◆ PET – posit(r)on electron tomography



PET CT



Wykorzystany radioznacznik	W jakim celu jest wykonywane
18-F [FDG]	dla oceny: - chorób nowotworowych - metabolizmu mózgu
Ga 68 [DOTATE]	dla oceny guzów neuroendokrynnych
18F Na [fluorek sodu]	dla oceny układu kostnego
18F [cholina]	dla oceny nowotworu prostaty
18F [DOPA]	dla oceny guzów chromochłonnych

Uwaga: więcej informacji na temat tomografii PET zostanie załączone jako osobny plik - suplement do wykładu

Oddziaływanie elektronów z materią

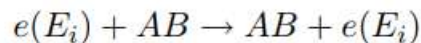
- ◆ O ile w przypadku fotonów pojedynczy akt oddziaływania zmienia znacząco energię fotonu i osłabienie ich wiązki ma charakter eksponencjalny (nie ma możliwości określenia zasięgu fotonów X/gamma w materiale), o tyle elektrony zachowują się inaczej i można mówić o zasięgu tych cząstek w materii (R)

Oddziaływanie z materią

- ◆ Do podstawowych procesów oddziaływania elektronów z materią zaliczyć należy:
 - jonizację - podobnie jak dla ciężkich cząstek naładowanych,
 - oddziaływania nieelastyczne wskutek których emitowane jest promieniowanie elektromagnetyczne (tzw. promieniowania hamowania) zaś elektron traci część swej energii,
 - elastyczne zderzenia z elektronami i jądrami atomowymi wskutek których elektron zmienia kierunek swego ruchu, a w przypadku zderzeń z elektronami traci także część swej energii.
- ◆ Straty energii elektronów na jonizację i zderzenia elastyczne odgrywają istotną rolę dla niewielkich energii elektronów. W obszarze wysokich energii dominują straty związane z emisją promieniowania hamowania.

Oddziaływanie promieniowania beta z cząsteczką

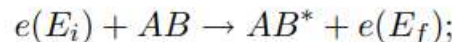
- sprężyste, które schematycznie można zapisać:



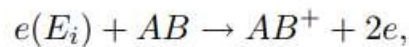
oraz

- niesprężyste, do których zaliczamy:

- wzbudzenie (rotacyjne, oscylacyjne lub/i elektronowe)

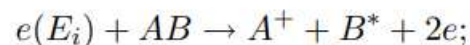


- jonizację (jednokrotną)

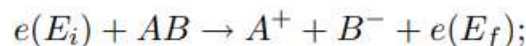


przy dostatecznie dużej energii elektronów może nastąpić jonizacja wielokrotna (powstaje jon dodatni AB^{n+});

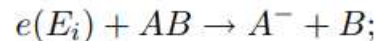
- jonizację dysocjacyjną



- jonizację dysocjacyjno-dipolarną



- wychwyt dysocjacyjny



- wychwyt niedysocjacyjny



Przekroje czynne

Przechodząc przez materię cząstki β mogą z nią oddziaływać na kilka różnych sposobów. Oddziaływanie promieniowania β z materią można podzielić na: jonizację, zderzenia sprężyste z jonami i elektronami oraz zderzenia niesprężyste (tzw. hamowanie). Prawdopodobieństwo zajścia tych procesów można opisać poprzez przekrój czynny na dany proces. Przekrój czynny na jonizację:

$$\sigma_j = 8\pi \left(e^2 / m_0 c^2 \right)^2 \left(Z / \beta^4 \right) \ln \left(E \sqrt{2/I} \right) \left[\text{cm}^2 / \text{atom} \right] \quad (2.1)$$

gdzie E – energia elektronu, $\beta = v/c$, I – średni potencjał jonizacji i wzbudzenia absorbenta.

Przekrój czynny na rozpraszanie sprężyste na jądrach:

$$\sigma_m = \pi \left(e^2 / m_0 c^2 \right)^2 Z^2 \left[(1 - \beta^2) / \beta^4 \right] \left[\text{cm}^2 / \text{atom} \right] \quad (2.2)$$

Przekrój czynny na rozpraszanie sprężyste na elektronach:

$$\sigma_{re} = 8\pi \left(e^2 / m_0 c^2 \right)^2 Z / \beta^4 \left[\text{cm}^2 / \text{atom} \right] \quad (2.3)$$

Przekrój czynny na emisję promieniowania hamowania:

$$\sigma_p = \frac{16}{3} \left(e^2 / m_0 c^2 \right)^2 Z^2 / 135 \left[(E + m_0 c^2) / E \right] \left[\text{cm}^2 / \text{atom} \right] \quad (2.4)$$

Przekrój czynny na oddziaływanie promieniowania β z materią jest sumą wszystkich powyższych przekrojów.

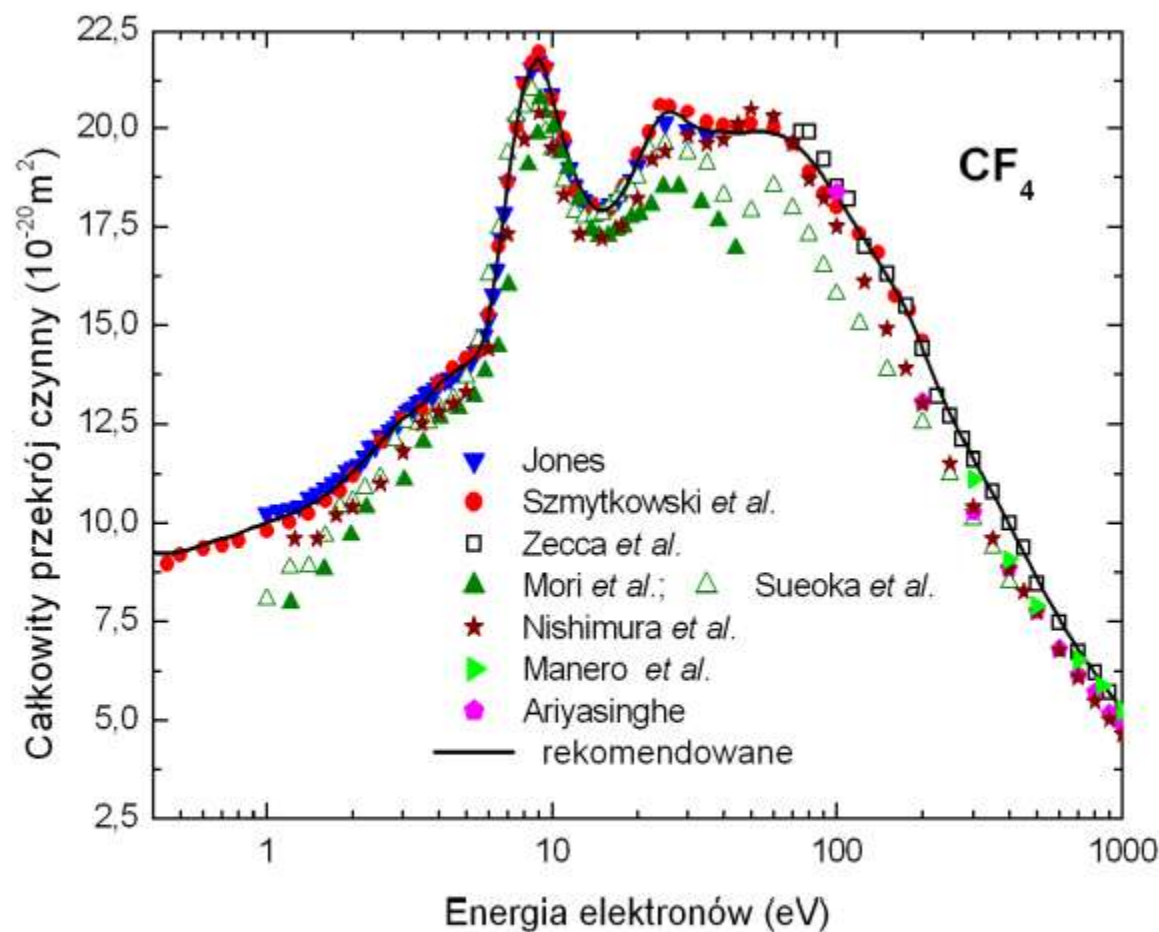
Przekrój czynny na jonizację

- ◆ Przybliżenie dla niewielkich energii ($E < 100$ keV):

$$\sigma_j = 2 \cdot \frac{Z}{\beta^4} \cdot \ln \frac{E \cdot \sqrt{2}}{I}, \quad b / atom$$

- ◆ gdzie $\beta = v/c$, I – potencjał jonizacyjny ośrodka (patrz: formuła Bethe-Blocha, będzie omówiona później)

Całkowity przekrój czynny na oddziaływanie elektronów z materią



Rysunek 3.4: Porównanie całkowitych przekrojów czynnych na rozpraszanie elektronów na drobinach CF₄ otrzymanych w różnych laboratoriach

Przekroje czynne – c.d.

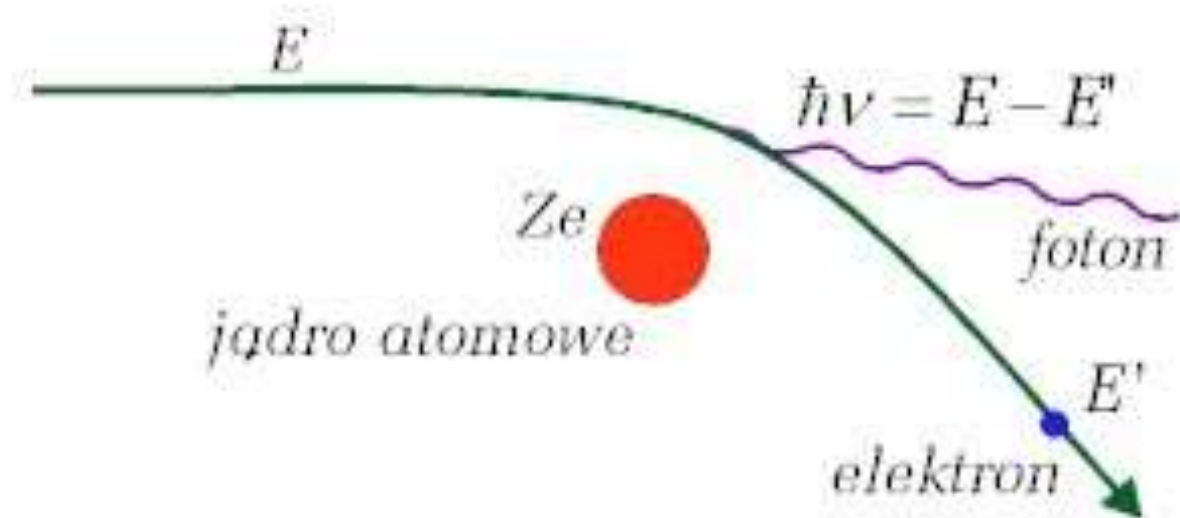
- ◆ Więcej znaleźć można w pracy doktorskiej Alicji Domarackiej pt. „Całkowite przekroje czynne na rozpraszanie elektronów na drobinach wieloatomowych”
- ◆ http://pbc.gda.pl/Content/3704/Domaracka_PhD15570.pdf?handler=pdf
- ◆ Szczegółowe formuły także na: https://pl.wikibooks.org/wiki/Wst%C4%99p_do_fizyki_j%C4%85dra_atomowego/Oddzia%C5%82ywanie_promieniowania_z_materi%C4%85

ODDZIAŁYWANIE PROMIENIOWANIA BETA Z MATERIAŁ

- PROMIENIOWANIE HAMOWANIA

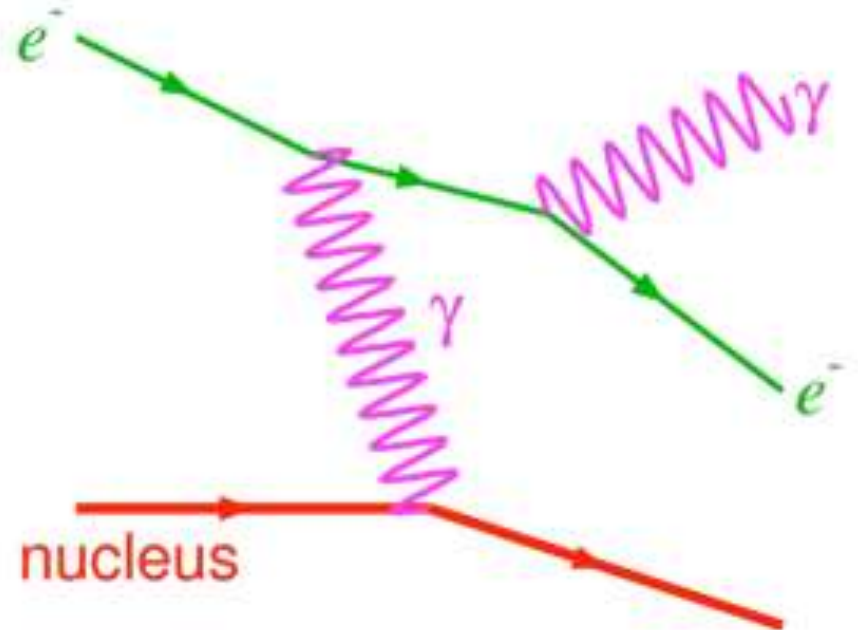
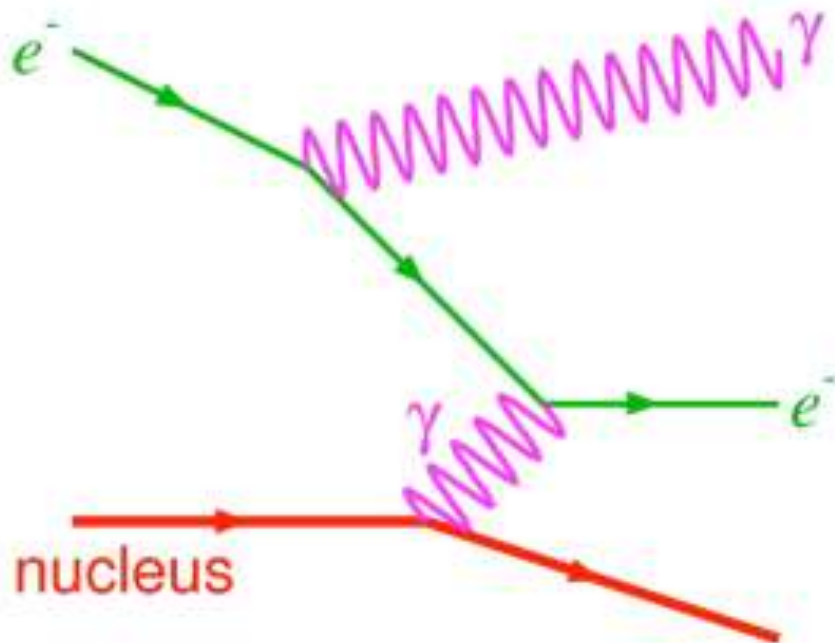
Promieniowanie hamowania (Bremsstrahlung)

- ◆ Zachodzi, gdy cząstka naładowana (najczęściej elektron) wyhamowuje w polu jądra atomowego
- ◆ Towarzyszy temu emisja fotonu



Na diagramie Feynmana

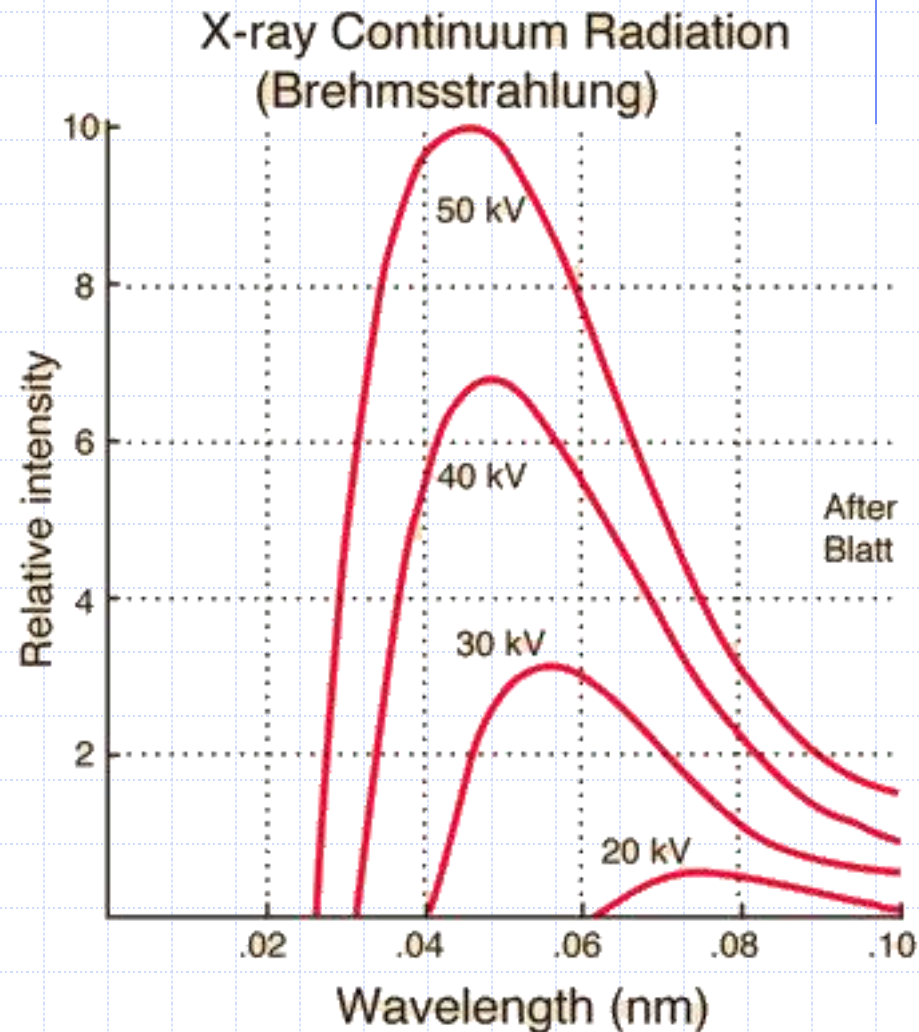
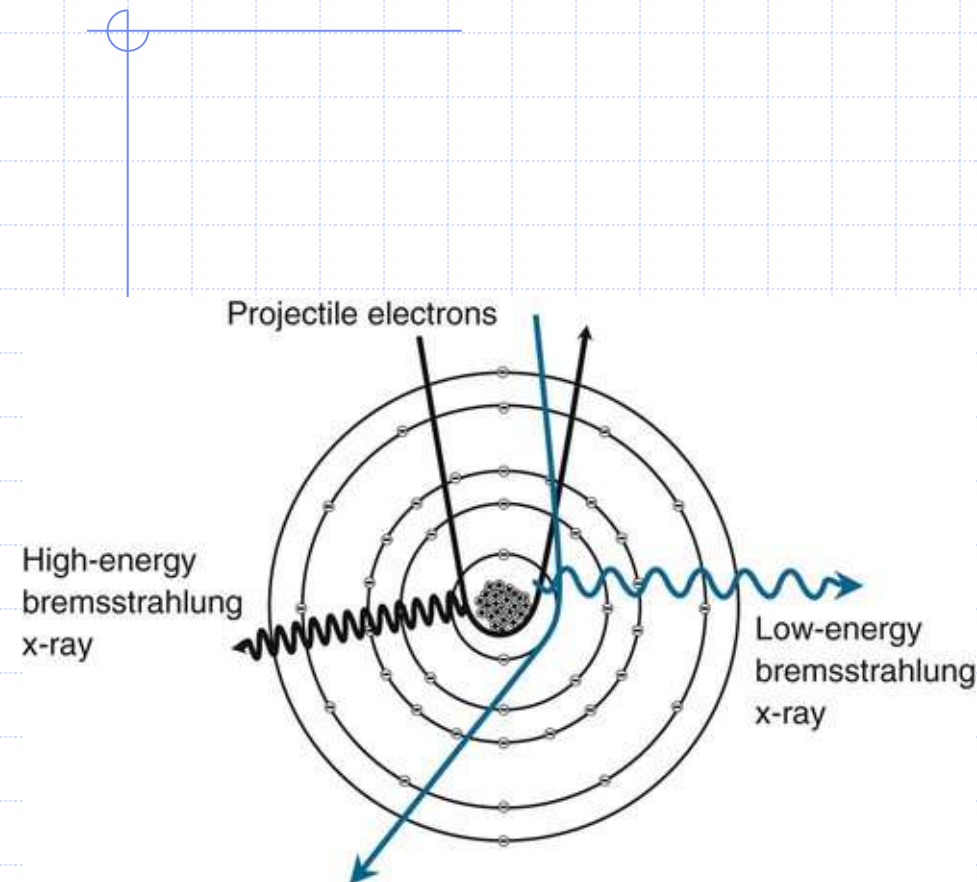
Bremsstrahlung



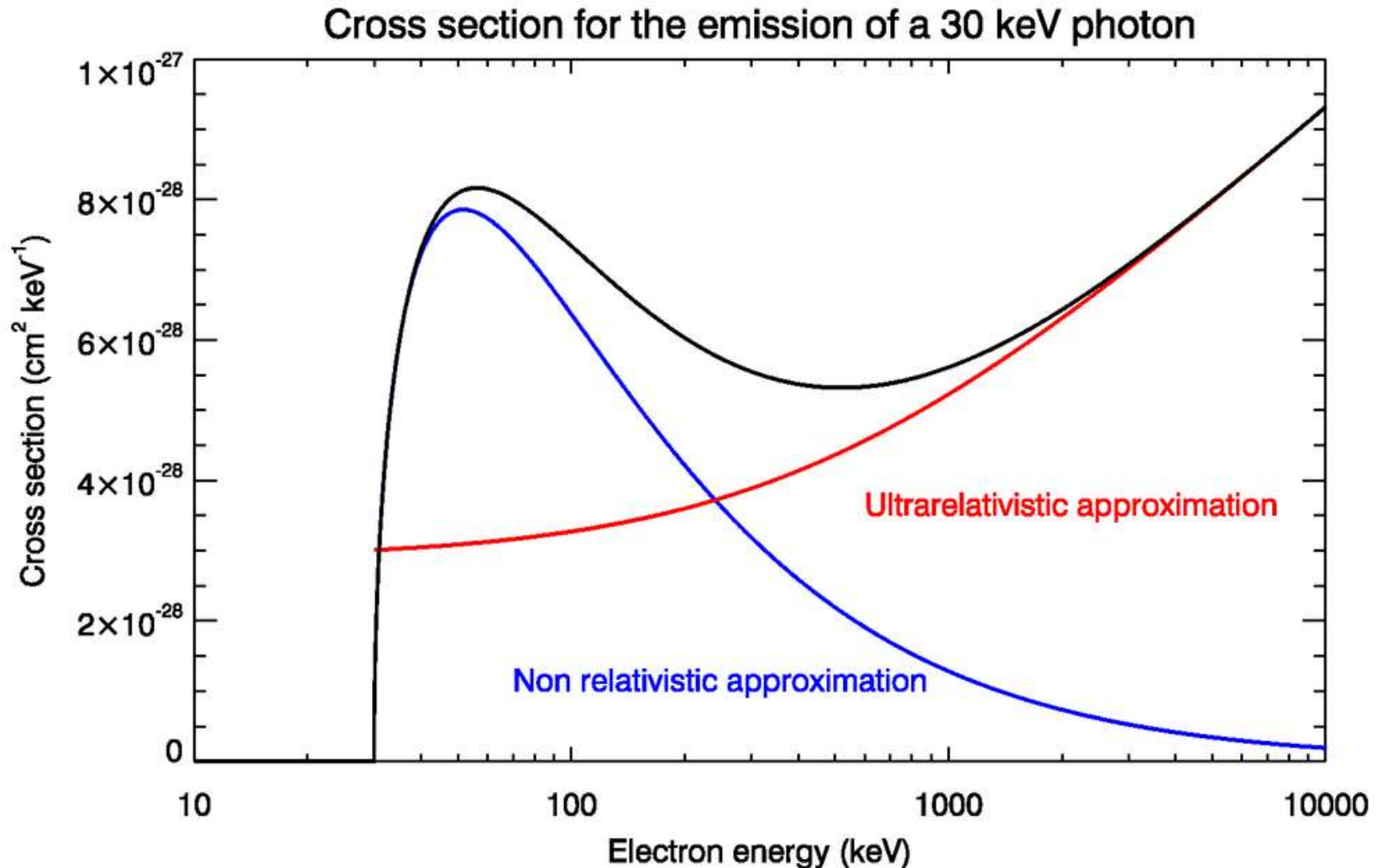
Promieniowanie hamowania

- ◆ Energia fotonu jest proporcjonalna do $(E/E_0)^4$ gdzie E to energia kinetyczna cząstki, zaś E_0 to jej energia spoczynkowa
- ◆ Dlatego efekt ten jest tak istotny dla elektronów z uwagi na ich niewielką masę
- ◆ Fotony posiadają ciągłe widmo energii
- ◆ Jest to przykład oddziaływania nieelastycznego elektronów

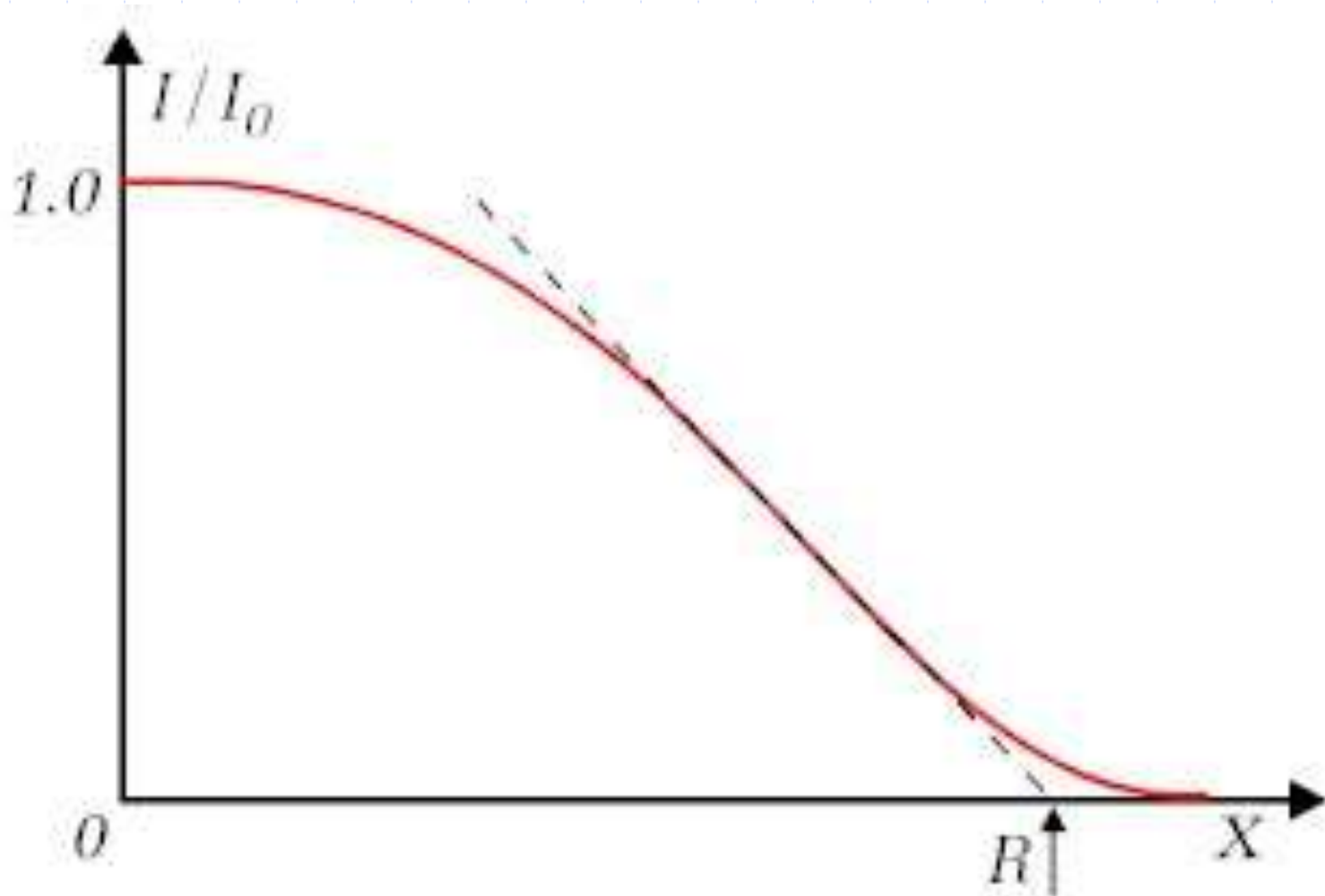
Ciągłe widmo energetyczne fotonów hamowania



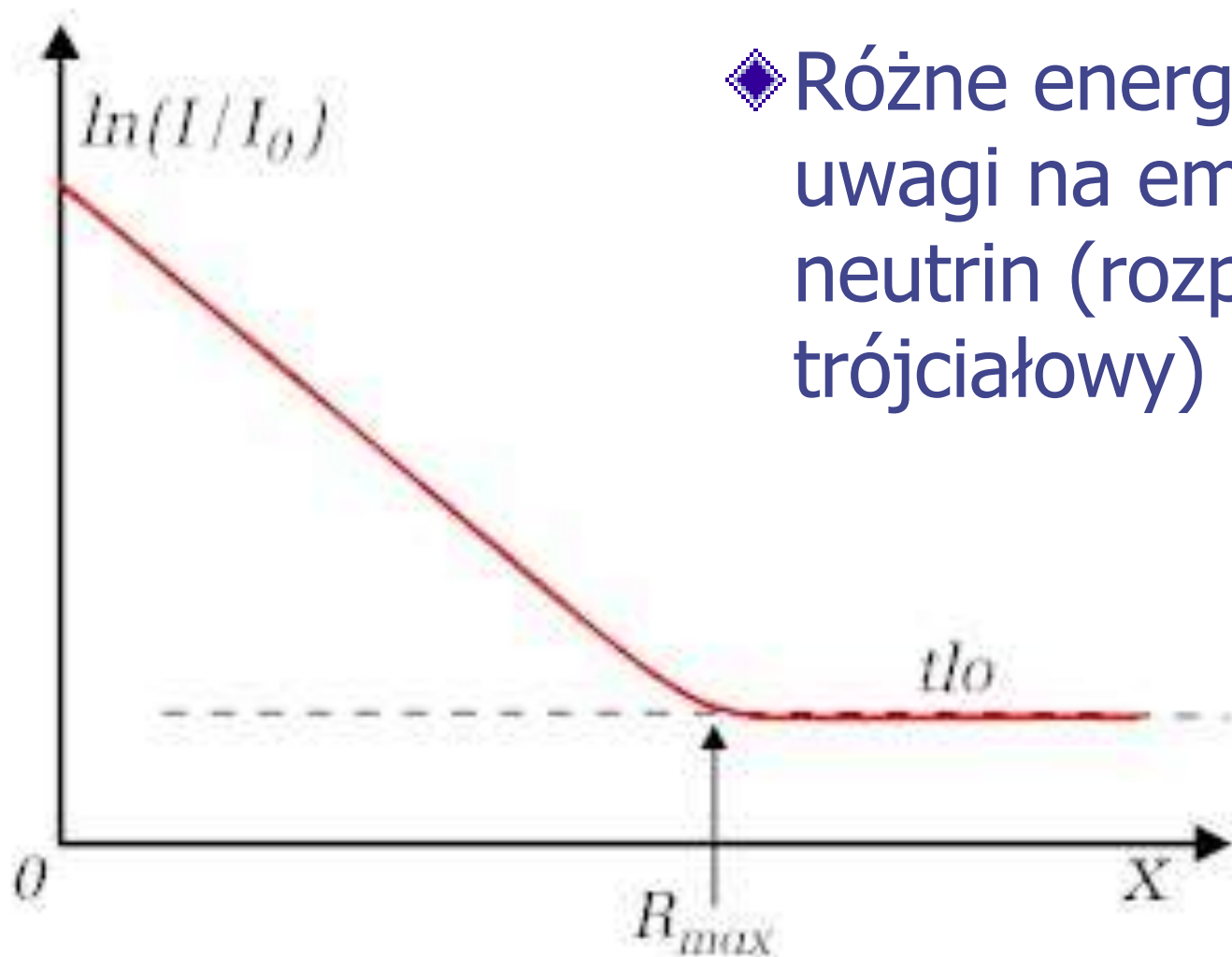
Przekrój czynny na emisję fotonu o energii 30 keV



Względna intensywność wiązki elektronów monoenergetycznych

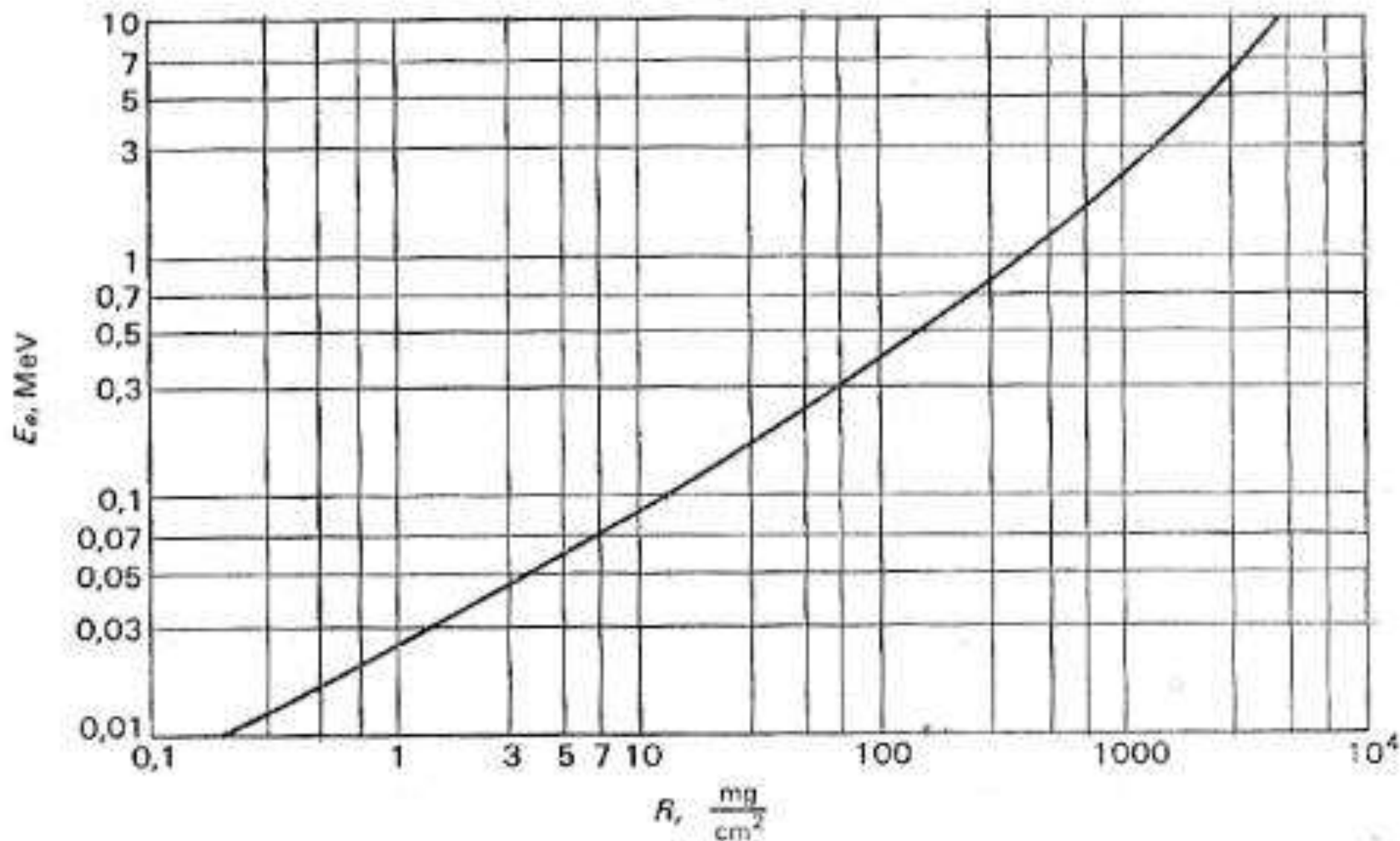


Względna intensywność (log) elektronów rozpadowych



◆ Różne energie z uwagi na emisję neutrin (rozpad trójciałowy)

Pierwotna energia wiązki elektronów a ich zasięg (dla Al)



Zasięgi cząstek naładowanych – przykładowe porównanie

Rodzaj promieniowania	Energia [MeV]	Zasięg w powietrzu [cm]	Zasięg w wodzie [cm]
elektrony β	1	320	0,4
	2	750	0,9
	5	1995	2,5
	10	6065	5,2
promieniowanie ^{60}Co ^{40}K	0,306	65	0,08
	1,325	465	0,58
promieniowanie alfa	3	1,57	Poniżej 0,01
	5	3,15	
	8	7,09	

Energia krytyczna

- ◆ Dla wysokoenergetycznych elektronów
- ◆ Gdy energia elektronu jest większa od energii krytycznej (E_{kr}), wówczas straty energii na promieniowanie hamowania przewyższają straty na jonizację

Substancja	E_{kr} MeV
węgiel	81
azot	91,2
tlen	81,2
glin	42,2
argon	38,4
żelazo	21,7
miedź	19,6
ołów	7,6
powietrze	97,5
woda	81

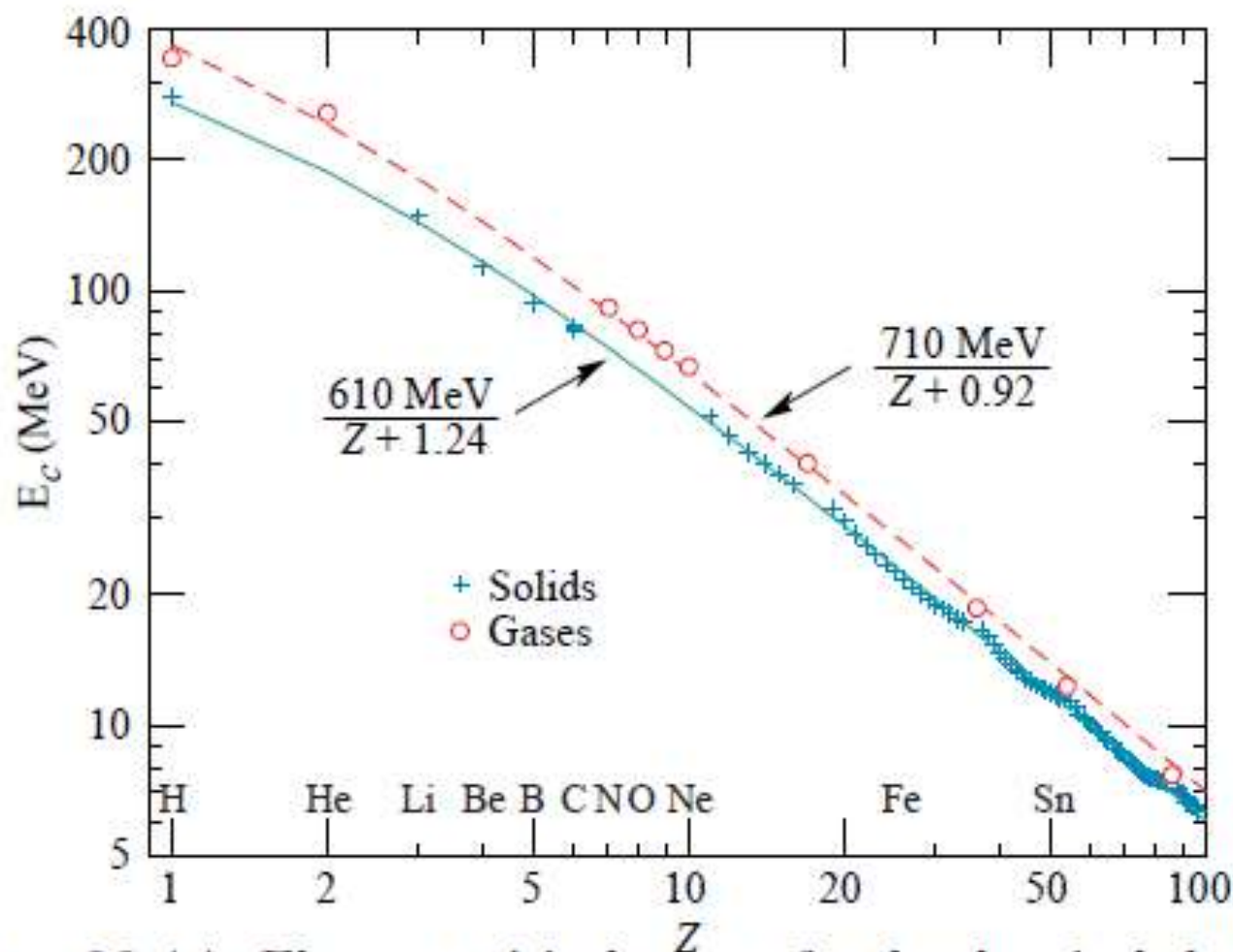


Figure 33.14: Electron critical energy for the chemical elements, using Rossi's definition [2]. The fits shown are for solids and liquids (solid line) and gases (dashed line). The rms deviation is 2.2% for the solids and 4.0% for the gases. (Computed with code supplied by A. Fassó.)

Długość radiacyjna

- ◆ Straty energii elektronów na promieniowanie hamowania są w obszarze wysokich energii proporcjonalne do energii elektronu, co można zapisać w postaci:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

- ◆ Rozwiązanie: $E = E_0 \cdot e^{-x/X_0}$
- ◆ Wielkość X_0 nazywa się długością radiacyjną. Jest to długość, po przejściu której energia elektronów zmniejszy się wskutek promieniowania hamowania **e** razy

Długość radiacyjna

High-energy electrons predominantly lose energy in matter by bremsstrahlung, and high-energy photons by e^+e^- pair production. The characteristic amount of matter traversed for these related interactions is called the radiation length X_0 , usually measured in g cm^{-2} . It is both (a) the mean distance over which a high-energy electron loses all but $1/e$ of its energy by bremsstrahlung, and (b) $\frac{7}{9}$ of the mean free path for pair production by a high-energy photon [42]. It is also the appropriate scale length for describing high-energy electromagnetic cascades. X_0 has been calculated and tabulated by Y.S. Tsai [43]:

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} \left\{ Z^2 [L_{\text{rad}} - f(Z)] + Z L'_{\text{rad}} \right\}. \quad (33.26)$$

For $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$, $4\alpha r_e^2 N_A/A = (716.408 \text{ g cm}^{-2})^{-1}$. L_{rad} and L'_{rad} are given in Table 33.2. The function $f(Z)$ is an infinite sum, but for elements up to uranium can be represented to 4-place accuracy by

$$f(Z) = a^2 \left[(1 + a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369 a^2 + 0.0083 a^4 - 0.002 a^6 \right], \quad (33.27)$$

where $a = \alpha Z$ [44].

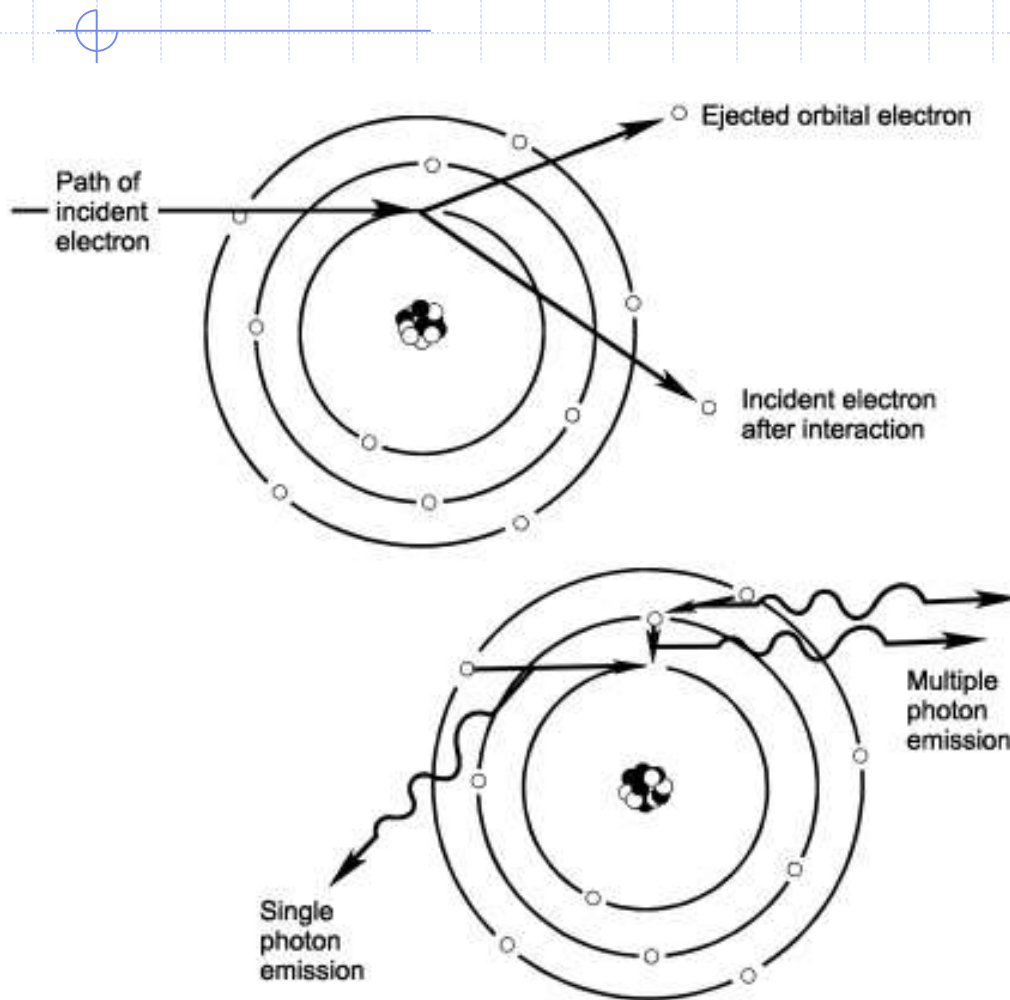
Table 33.2: Tsai's L_{rad} and L'_{rad} , for use in calculating the radiation length in an element using Eq. (33.26).

Element	Z	L_{rad}	L'_{rad}
H	1	5.31	6.144
He	2	4.79	5.621
Li	3	4.74	5.805
Be	4	4.71	5.924
Others	> 4	$\ln(184.15 Z^{-1/3})$	$\ln(1194 Z^{-2/3})$

ODDZIAŁYWANIE PROMIENIOWANIA BETA Z MATERIAŁ

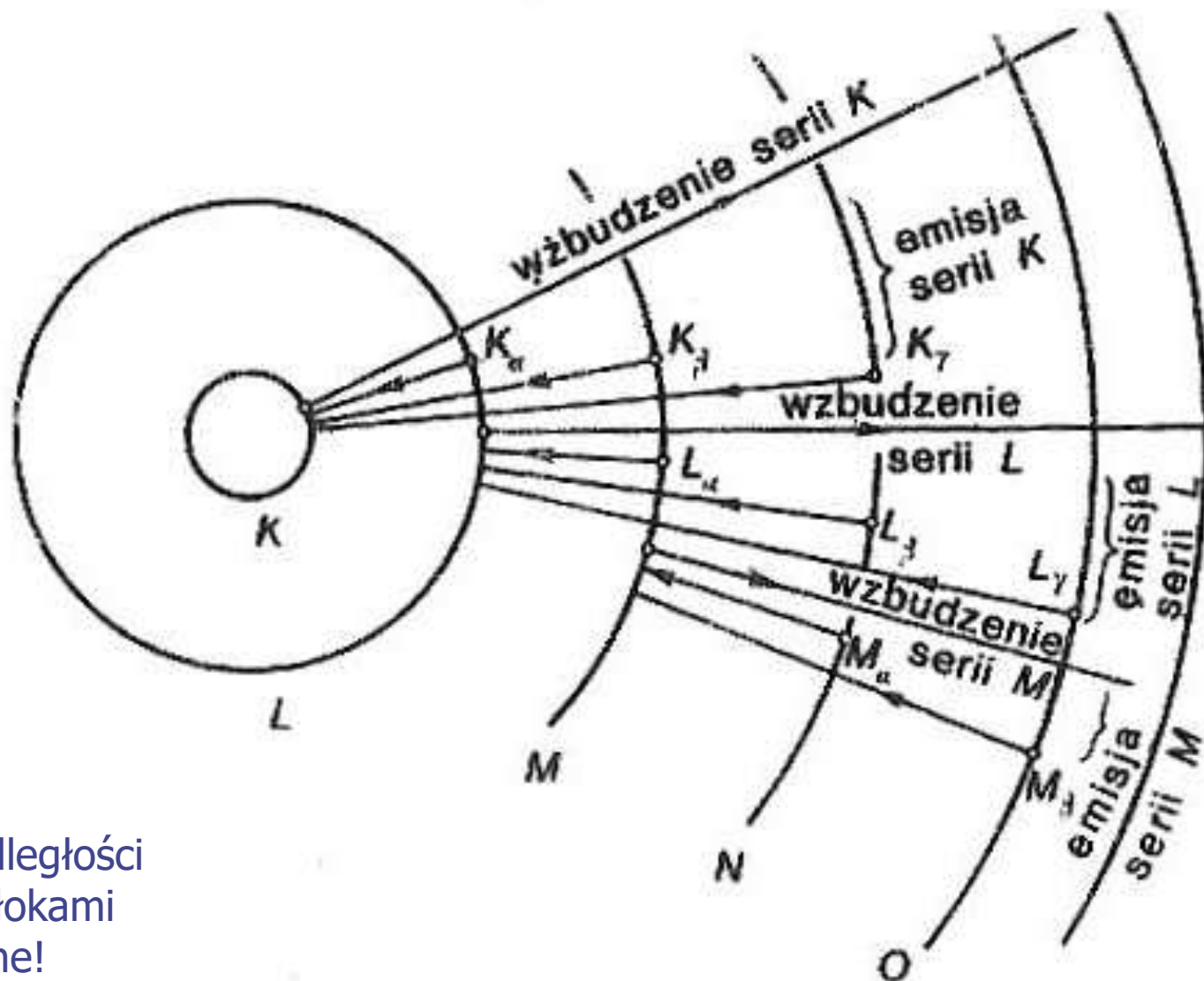
- PROMIENIOWANIE CHARAKTERYSTYCZNE

Promieniowanie charakterystyczne



- ◆ Padający elektron wybija inny elektron
- ◆ Na jego miejsce opada elektron z powłoki o wyższej energii emitując foton o ściśle określonej energii

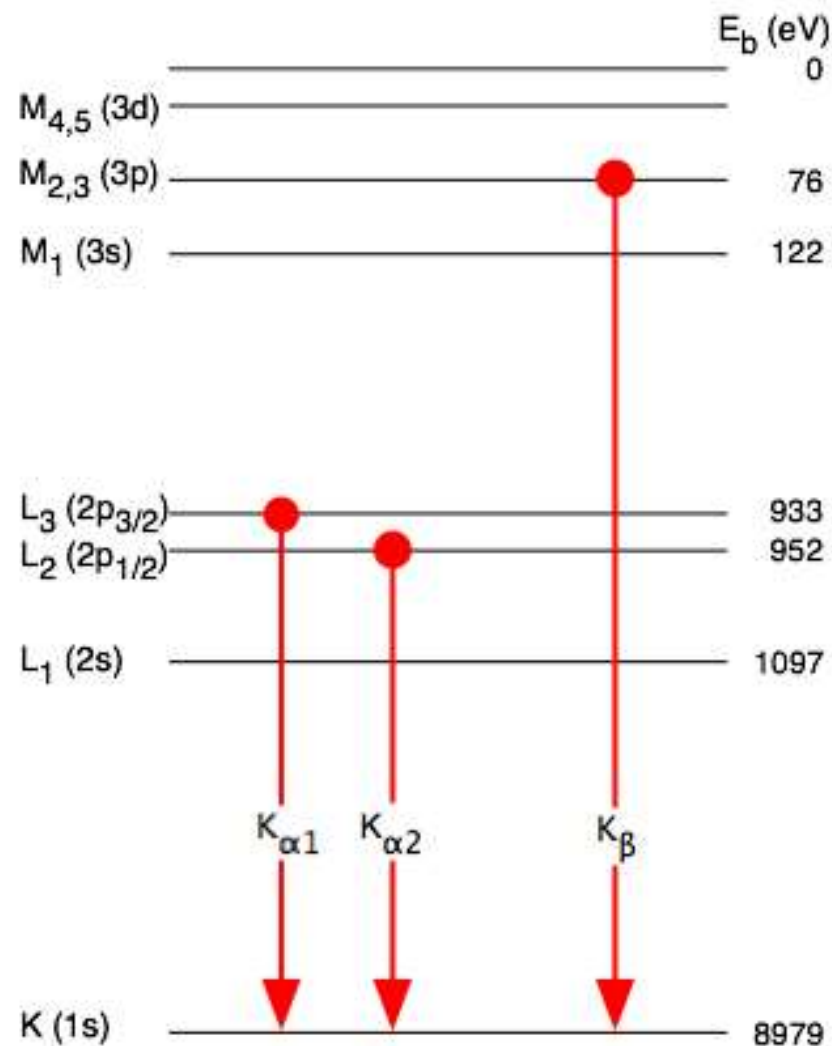
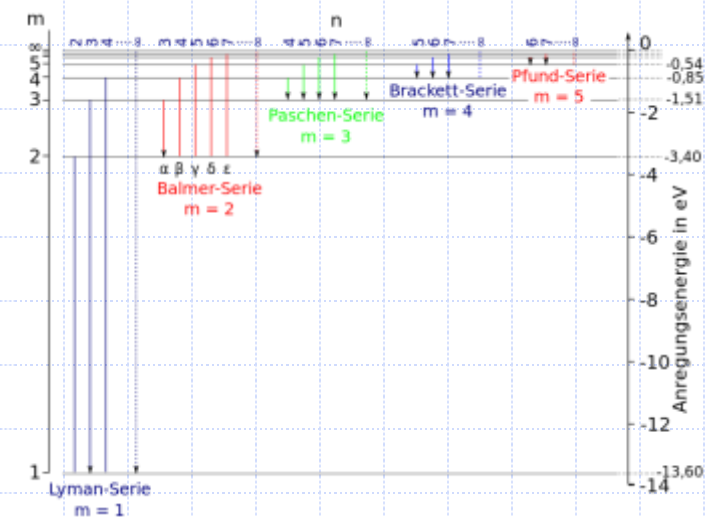
Serie widmowe



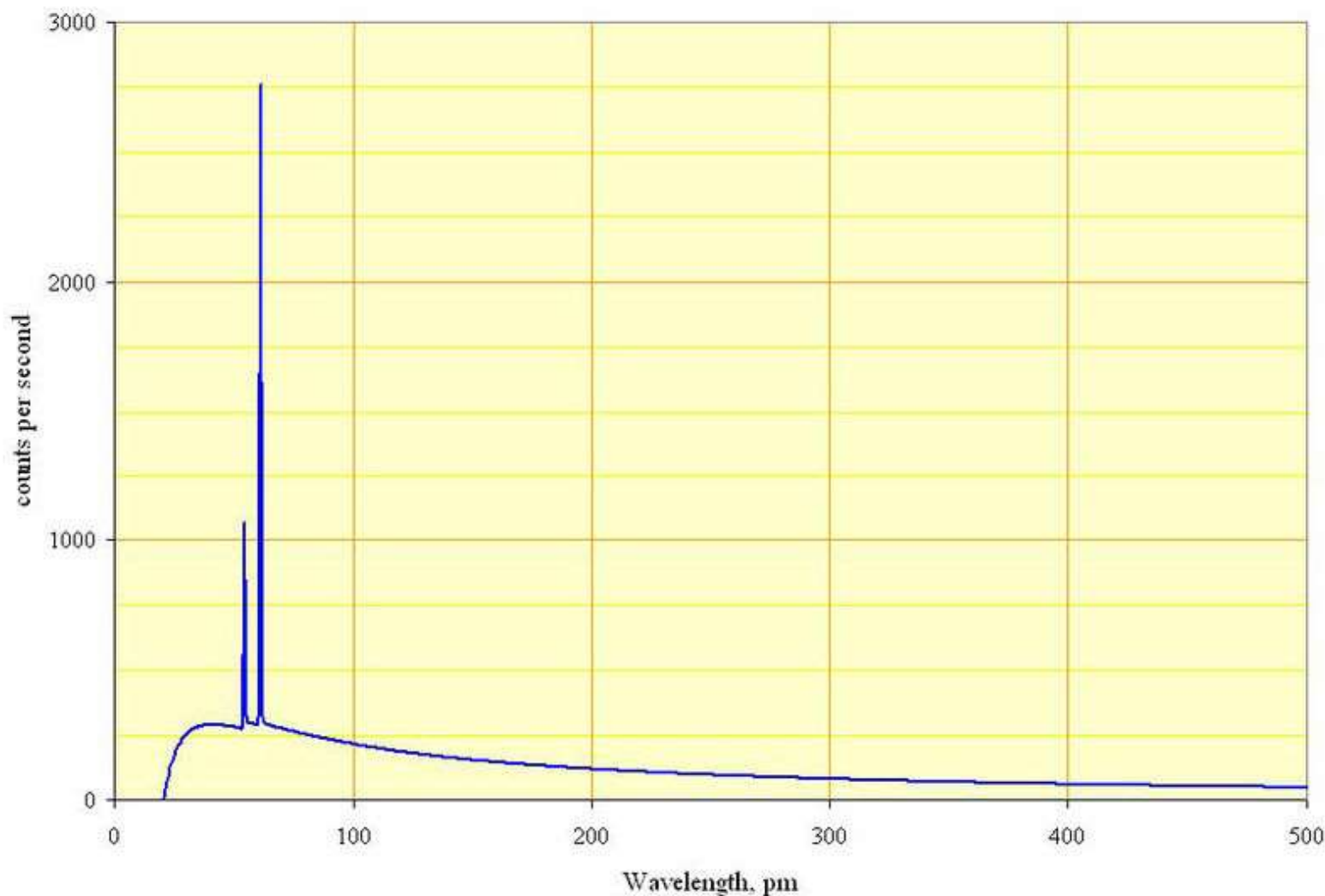
Proporcje odległości
między powłokami
niezachowane!

Promieniowanie charakterystyczne

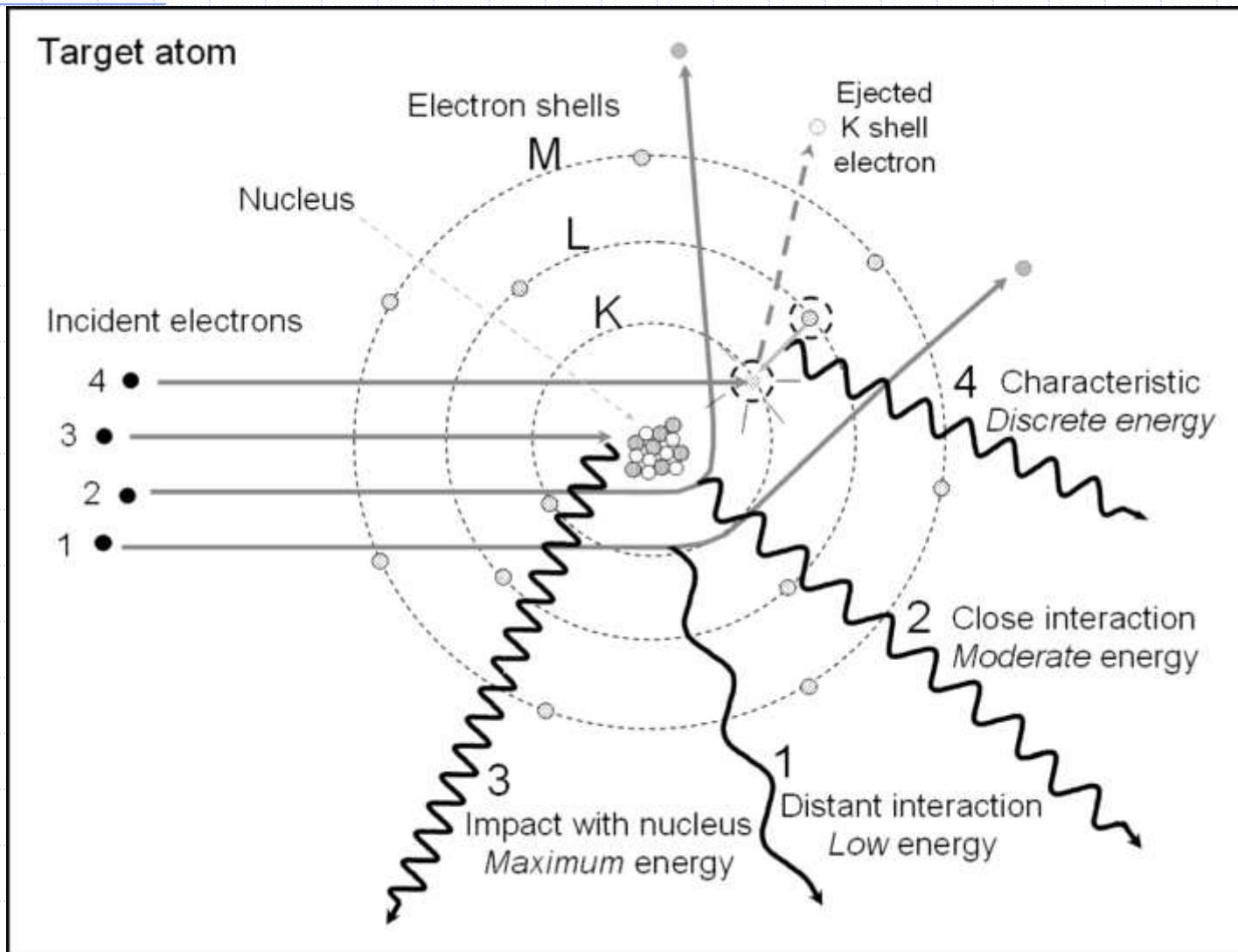
- ◆ Zwane też emisją K-alfa, K-beta etc.
- ◆ → notacja Siegbahna
- ◆ → prawo Moseleya



Promieniowanie hamowania i charakterystyczne z lampy RTG



Promieniowanie beta - podsumowanie



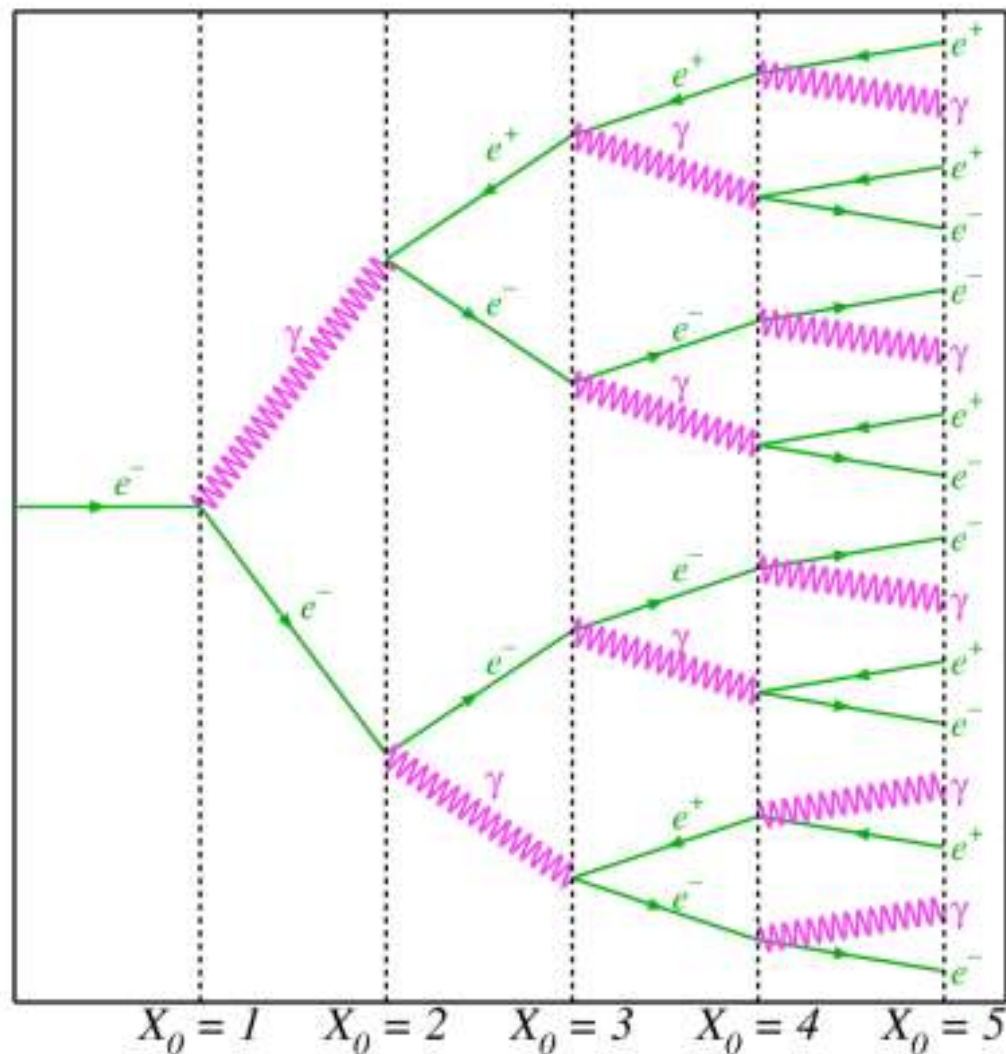


KASKADA FOTONOWO- ELEKTRONOWA

Kaskada fotonowo-elektronowa

- ◆ Promieniowanie gamma poprzez m.in. efekt Comptona oraz kreację par generuje elektrony
- ◆ Z kolei elektrony poprzez m.in. promieniowanie hamowania generują fotony
- ◆ Dla wysokich energii (gdzie dominuje kreacja par z jednej strony oraz prom. hamowania z drugiej) mamy wzajemną generację fotonów i elektronów

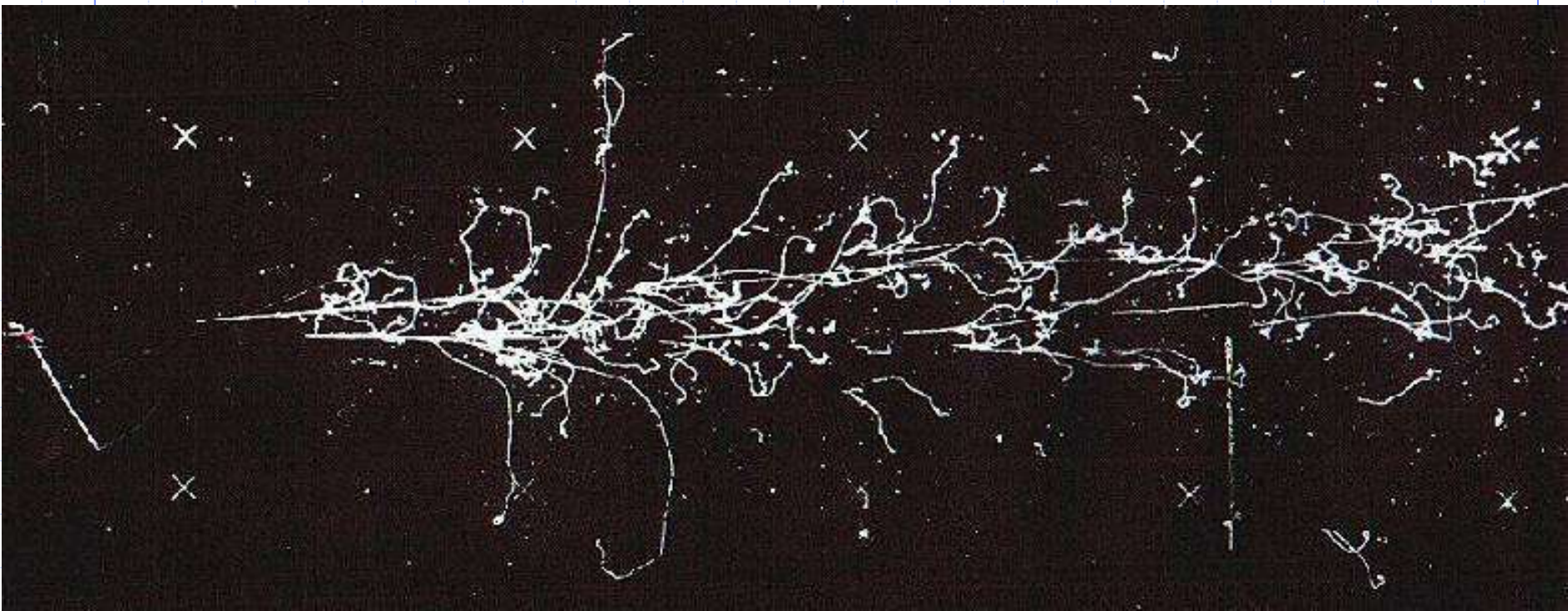
Kaskada fotonowo-elektronowa



$$L_{pair} \approx \frac{9}{7} L_{rad}$$

X_0 – długość
radiacyjna

Kaskada fotonowo-elektronowa



Praktyczna uwaga

- ◆ W laboratoriach z izotopami gamma (lub lampami RTG) stosuje się ciężkie osłony (np. ołów czy beton)
- ◆ W laboratoriach z izotopami beta jest to niewskazane z uwagi na to, że elektrony na ciężkich jądrach generują promieniowanie X (jako Bremsstrahlung)
- ◆ Dlatego w takich laboratoriach używa się osłon lekkich, np. z pleksi

ODDZIAŁYWANIE CIĘŻKICH CZĄSTEK NAŁADOWANYCH Z MATERIĄ (NP. PROMIENIOWANIE ALFA, PROMIENIOWANIE PROTONOWE)

Oddziaływanie ciężkich cząstek

- ◆ Cząstki ciężkie (czyli takie, których masa jest dużo większa od masy elektronu) zachowują się generalnie podobnie i można je opisywać tymi samymi równaniami
- ◆ Najczęściej mowa tu o promieniowaniu alfa lub protonowym, czasem o ciężkich jonach czy mionach
- ◆ Zasadniczo cząstki te powodują jonizację ośrodka w wyniku oddziaływań z elektronami atomów

Oddziaływanie ciężkich cząstek

- ◆ Straty energii na wielokrotne jonizacje mają charakter quasi-ciągły i można określić wielkość charakteryzującą średnie straty energii cząstki na jednostkę jej drogi w ośrodku materialnym dE/dx – straty te opisujemy za pomocą **równania Bethe-Blocha**:

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 \right)$$

- ◆ Wzór ten istnieje pod wieloma postaciami

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 \right)$$

We wzorze tym ***z*** jest liczbą atomową padającej cząstki, ***Z*** liczbą atomową absorbentu (liczbą protonów w jądrze atomu ośrodka), ***A*** liczbą masową absorbentu (sumaryczną liczbą protonów i neutronów w jądrze), ***c*** prędkością światła w próżni, ***K***- stałą stanowiącą kombinację kilku stałych fizycznych i równą ***307 keVcm²/g***, ***β = v/c = pc/E*** - aktualną prędkością cząstki wyrażoną w jednostkach prędkości światła (***p***=pęd; ***E***=energia całkowita)

$$-\frac{dE}{dx} = K Z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 \right)$$

Pozostałe wielkości:

$$I = 9,1 \cdot Z \left(1 + \frac{1,9}{Z^{2/3}} \right) \text{eV} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M} \right)^2}$$

Gdzie M oznacza masę cząstki, m_e masę elektronu, a I jest średnim potencjałem jonizacji i wzbudzenia atomów absorbentu.

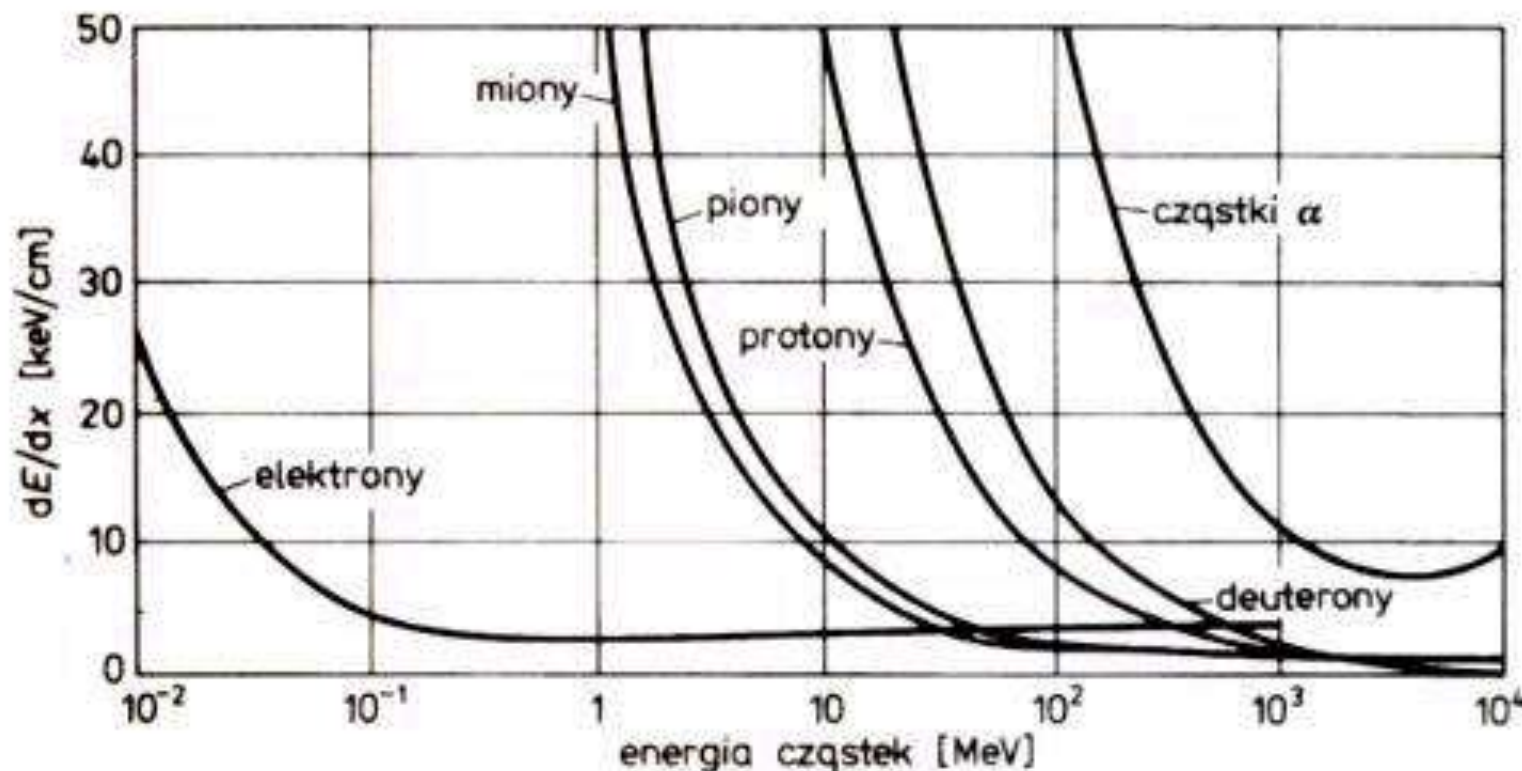
$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 \right)$$

Jak widać z postaci wzoru, strata energii na jednostkę drogi w absorbencie jest wprost proporcjonalna do kwadratu ładunku cząstki padającej (z^2), do stosunku liczby protonów do wszystkich nukleonów w jądrze atomu (Z/A), a co najważniejsze jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu prędkości cząstki. Oznacza to, że w miarę przechodzenia cząstki przez absorbent straty energii będą bardzo szybko rosnąć. Cząstka będzie na kolejnych odcinkach swego toru deponować coraz to większe ilości energii w postaci zjonizowanych atomów, aż do zatrzymania się po przebyciu określonej drogi.

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 \right)$$

Wzór ten traci słuszność dla bardzo małych energii cząstek, gdyż nie uwzględnia występujących wtedy procesów chwytania przez cząstkę elektronów i ponownego ich oddawania (brak członu jonizacyjnego „delta”).

Podany wzór Bethe-Blocha uwzględnia też zjawiska relatywistyczne. Czynniki logarytmiczny, gdzie kwadrat prędkości jest w liczniku i gdzie występuje też tzw. czynnik Lorentza - gamma, rośnie wraz ze wzrostem prędkości. Prowadzi to do słabego zwiększania się strat jonizacyjnych dla największych energii cząstek, kiedy już prędkości bliskie są prędkości światła

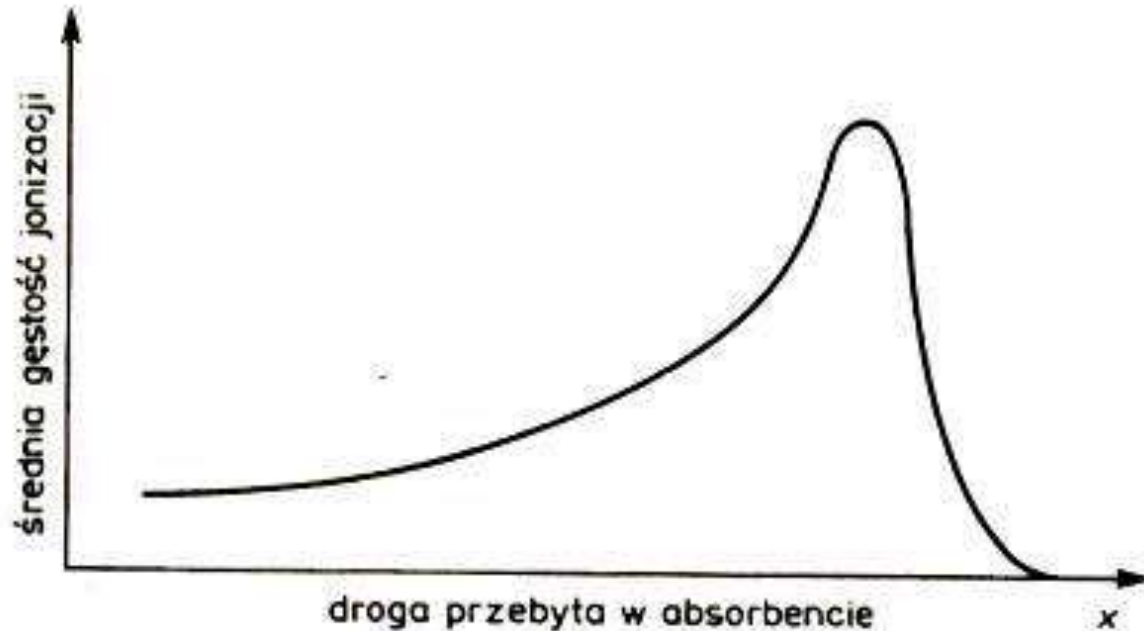


Rys. 2.4. Straty energii dla wybranych cząstek naładowanych na jednostkę drogi w powietrzu

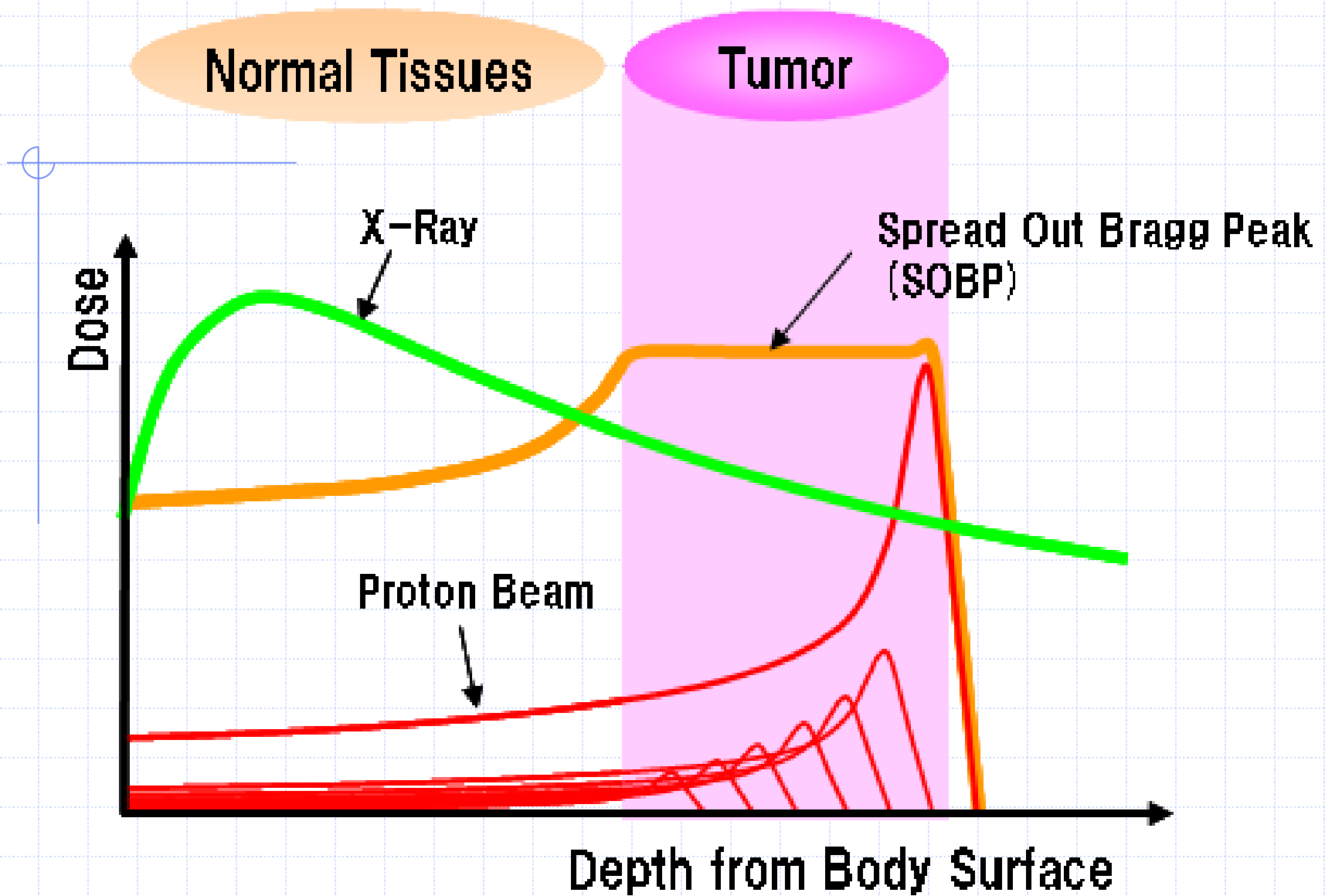
Obserwujemy bardzo duże straty jonizacyjne dla małych energii, istnienie obszaru energii gdzie straty te mają wartości minimalne (efekty relatywistyczne) i słaby wzrost dla energii największych. Dla cząstek o różnych masach i ładunkach krzywe mają różny przebieg

Krzywa Bragga

Rys. 2.5. Gęstość jonizacji wywołanej przez cząstkę naładowaną w zależności od jej drogi w absorbencie (krzywa Bragga)

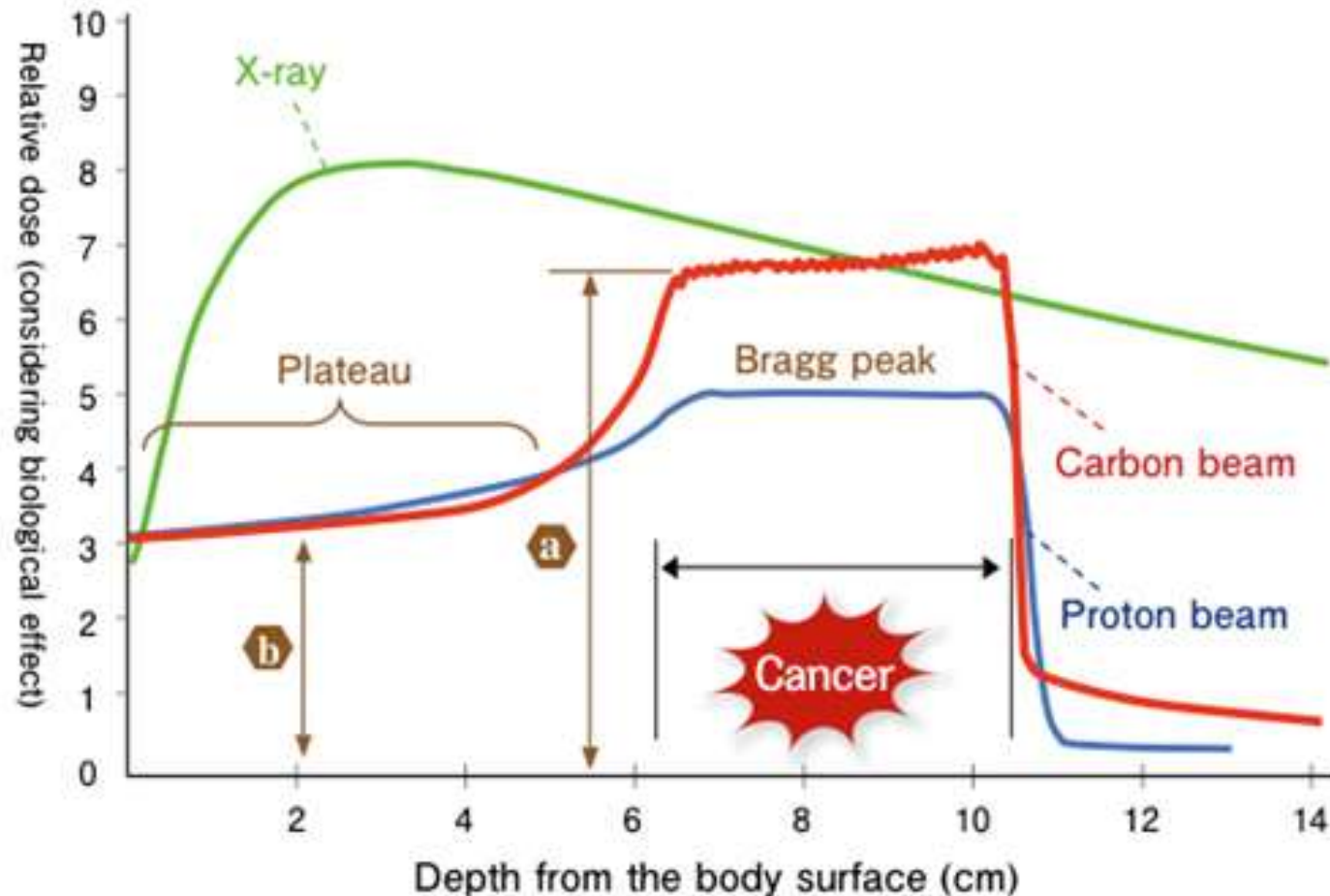


Na początkowym odcinku toru straty są stosunkowo niewielkie, następnie rosną w pobliżu końca toru cząstki w materii. Natychmiast nasuwa się możliwość zastosowania tej zależności dla celów radioterapii.

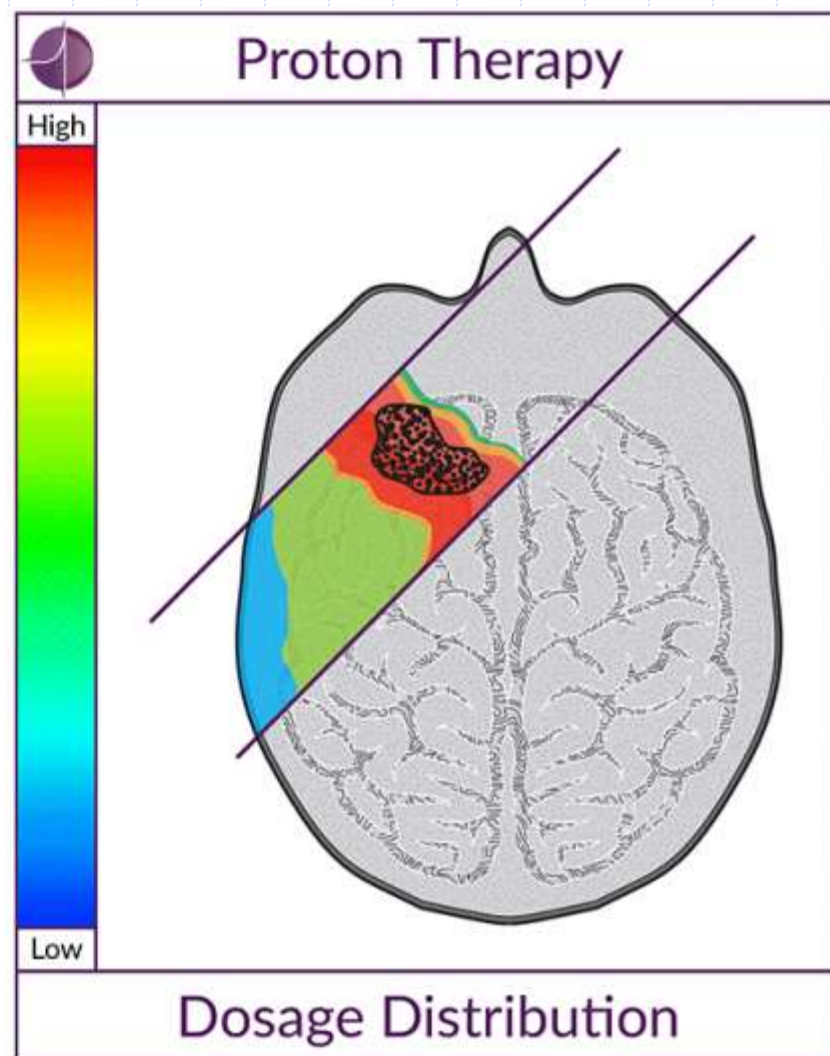
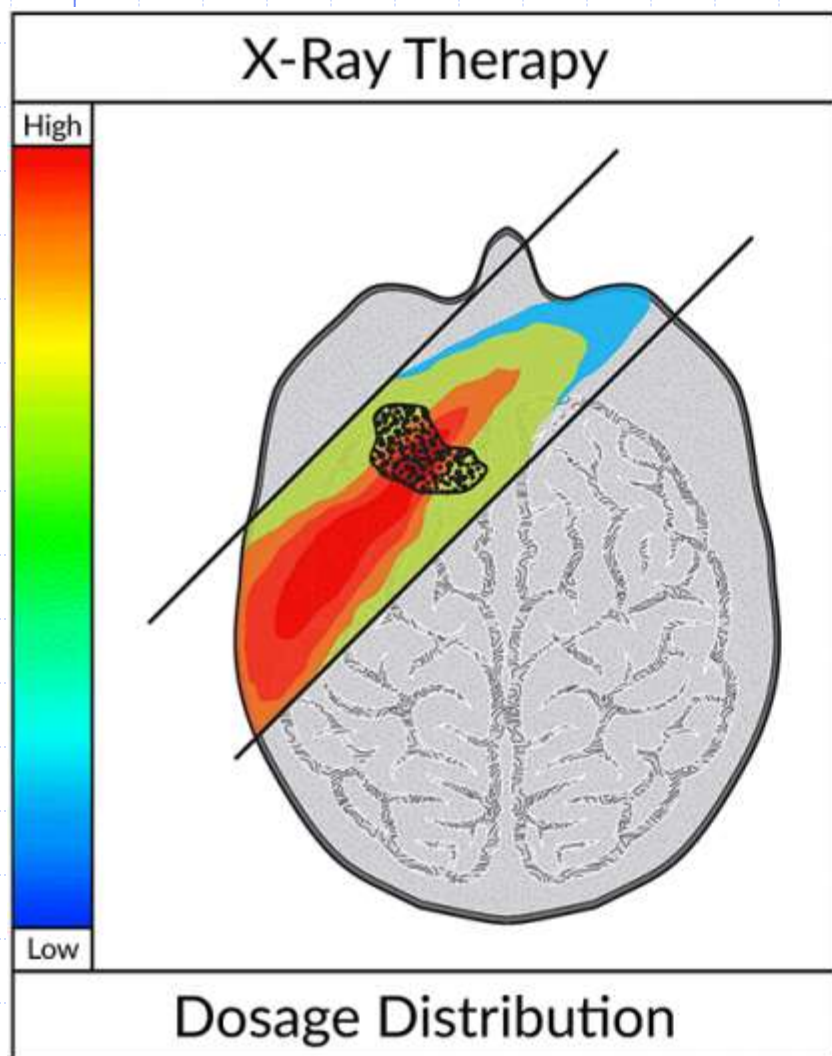


Protony vs. jony węgla

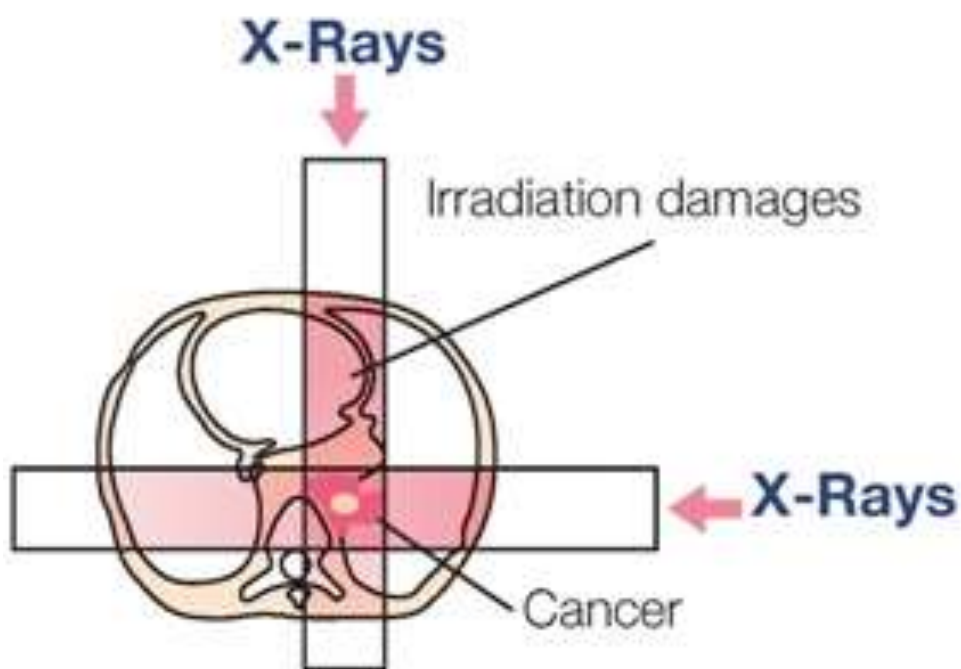
When the ratios of peak to plateau (a/b) are compared while considering biological effect, the carbon beam has the largest value.



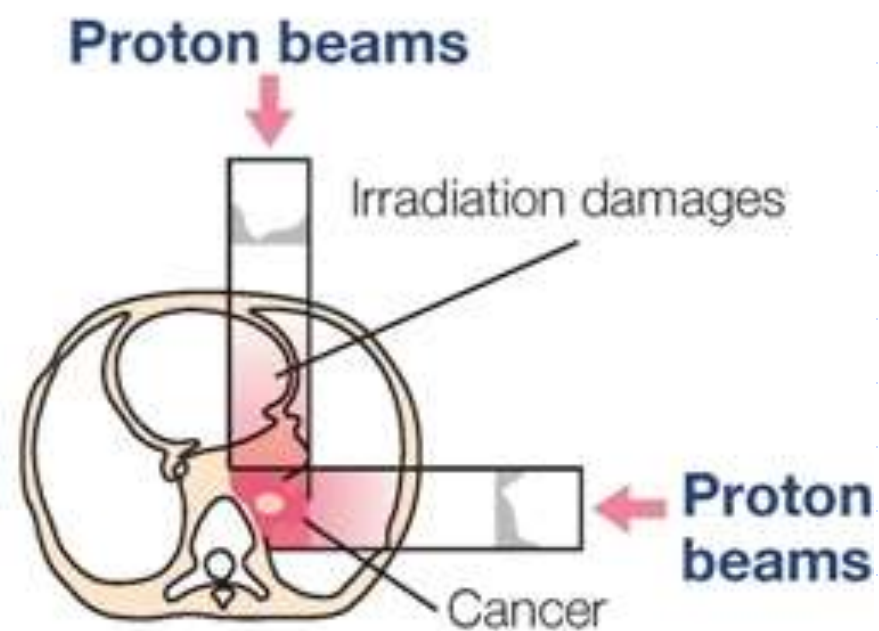
Jedna wiązka



Dwie wiązki



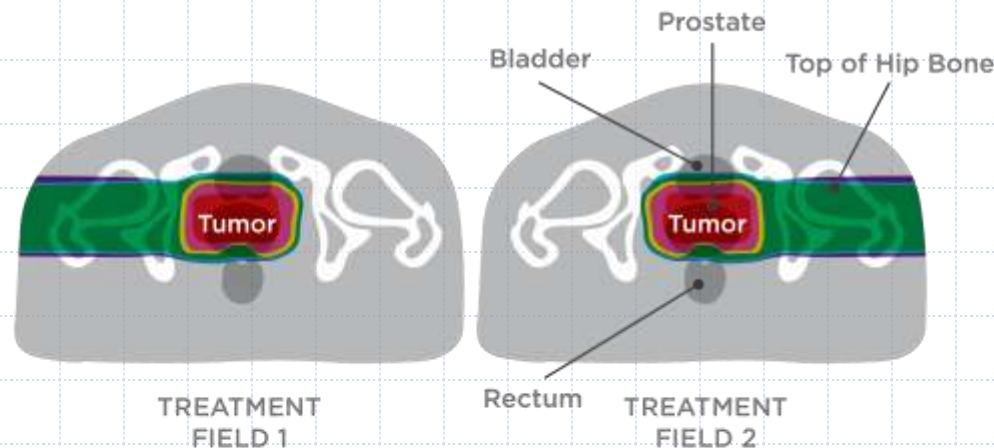
X-rays go through the nidus.



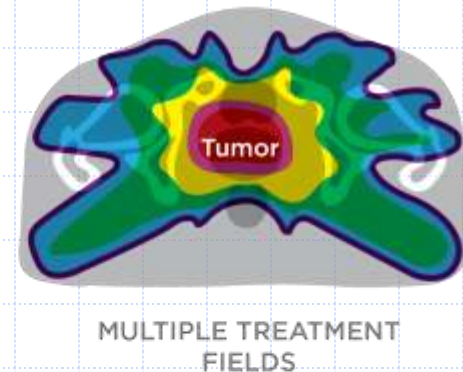
Proton beams stop at the nidus.

Prostate Cancer: Proton therapy delivers significantly less radiation to the bladder and rectum than conventional radiation, reducing the risk of short and long-term side effects and secondary disease.

PROTONS



CONVENTIONAL RADIATION

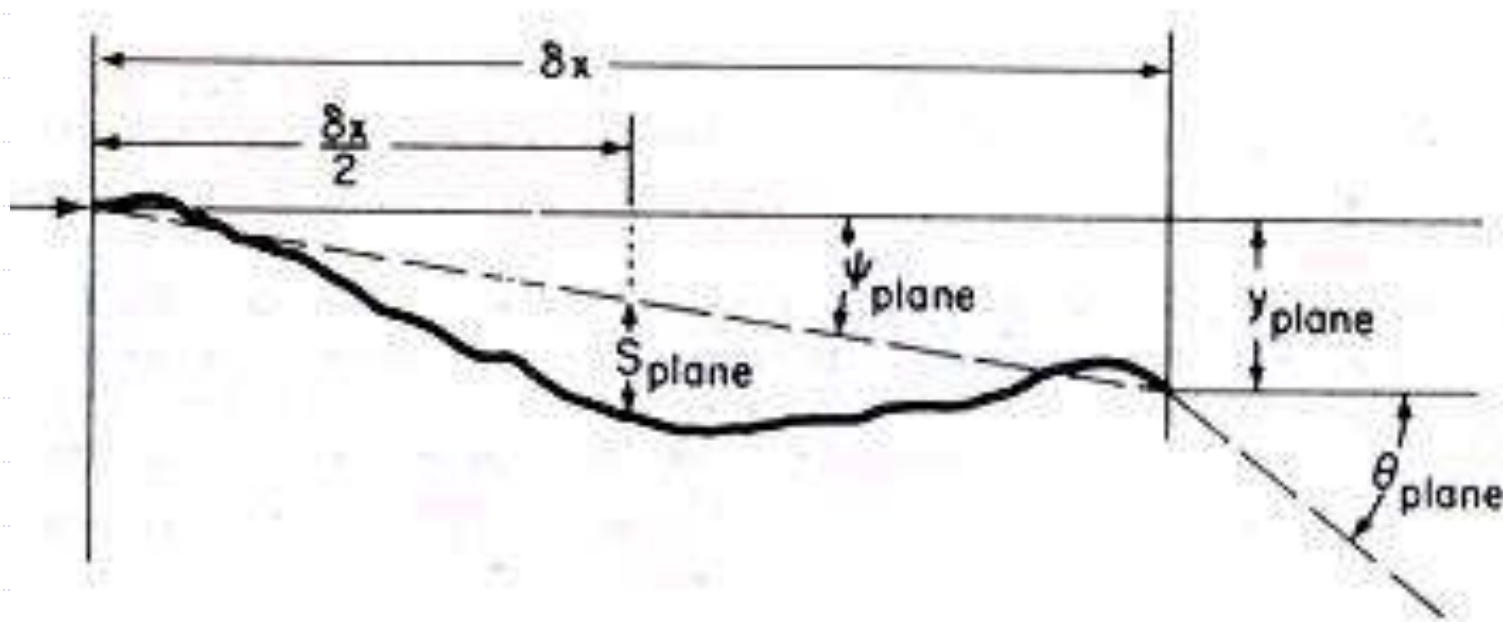


These images show the areas exposed to radiation during treatment.



Rozproszenia wielokrotne

Oprócz strat energii naładowanej cząstki przechodzącej przez materię obserwujemy także zjawisko wielokrotnych rozproszeń tejże cząstki, zilustrowane na rysunku:



Rozproszenia wielokrotne - c.d.

Oddziaływanie cząstki z materią prowadzi nie tylko do zmiany wartości prędkości cząstki, ale także do zmiany jej kierunku

Im większe straty energetyczne następują, tym większe jest prawdopodobieństwo większego odchylenia toru cząstki

$$\theta_0 = \frac{14,1 \text{ MeV}/c}{p\beta} Z \sqrt{L/L_R} \left[1 + \frac{1}{9} \log(L/L_R) \right]$$

$$\theta_0 = \frac{14,1 \text{ MeV}/c}{p\beta} Z \sqrt{L/L_R} \left[1 + \frac{1}{9} \log(L/L_R) \right]$$

Gdzie θ oznacza odchylenie standardowe rozkładu normalnego, któremu z dobrym przybliżeniem podlega rozkład wielkości charakteryzujących rozproszenia wielokrotne; L jest grubością materiału, a L_R tzw. jednostką radiacyjną (L_{rad})

czastka alfa

▼

Olow gestosc = 11,34

▼

dx [g/cm²]
E czastki [MeV]
Grubosc abs. [g/cm²]
Grubosc [cm]
Czastka
Absorbent i gestosc [g/cm³]

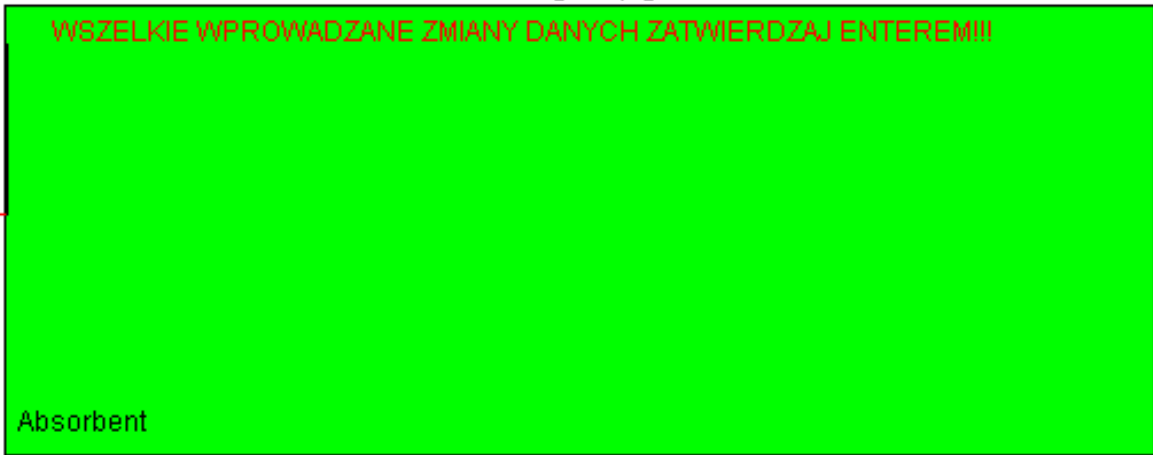
Suwak do regulacji grubosci

Czekaj...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!

WSZELKIE WPROWADZANE ZMIANY DANYCH ZATWIERDZAJ ENTEREM!!!

AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz

Zrodlo



Aktualna grubosc absorbentu
 wynosi 44 cm



dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Czastka Absorbent i gestosc [g/cm³]

Suwak do regulacji grubosci

Czekaj...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSCI

WSZELKIE WPROWADZANE ZMIANY DANYCH ZATWIERDZAJ ENTEREM!!!

AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz

Zrodlo

Absorbent

Aktualna grubosc absorbentu
 wynosi 44 cm

$E(x)$ [MeV]

50[MeV]

dE/dx [MeV*g/cm²] 0[g/cm²] = 0[cm]

$(dE/dx)_{maks}=222$

$(dE/dx)_{pocz}=64$

dE/dx [MeV*g/cm²] 0[g/cm²] = 0[cm]

$(dE/dx)_{maks}=222$

$(dE/dx)_{pocz}=64$

x [g/cm²]

x [g/cm²]

$-\log(E)$

dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Czystka Absorbent i gestosc [g/cm³]

Suwak do regulacji grubosci

Czekaj...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!

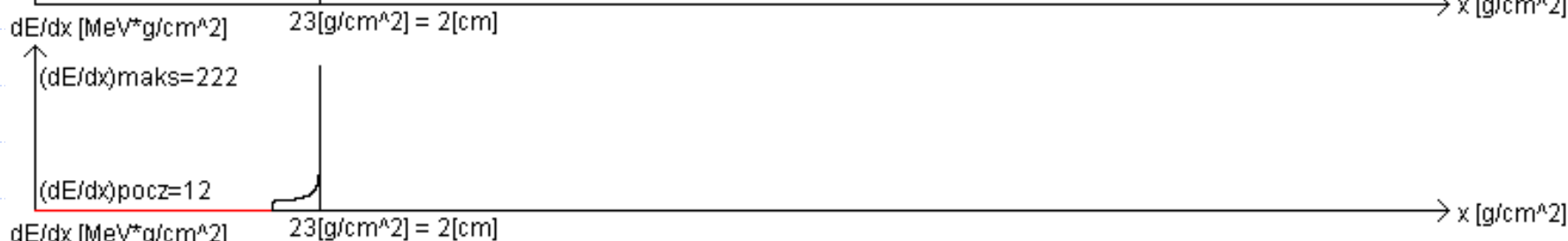
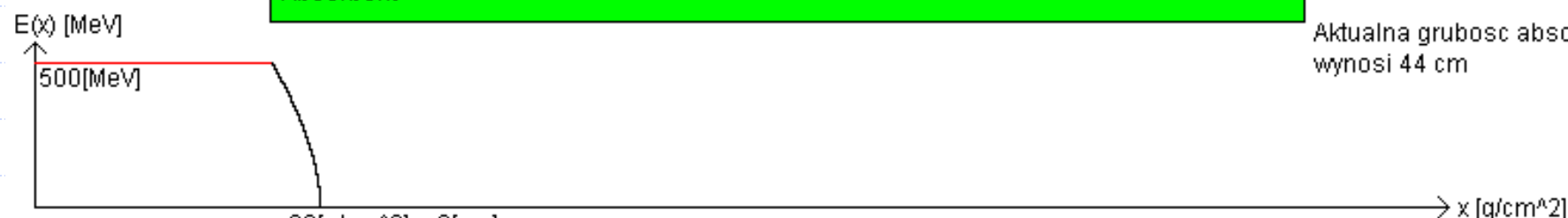
WSZELKIE WPROWADZANE ZMIANY DANYCH ZATWIERDZAJ ENTEREM!!!

AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz

Zrodlo



Aktualna grubosc absorbentu wynosi 44 cm



dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Cząstka Absorbent i gestosc [g/cm³]

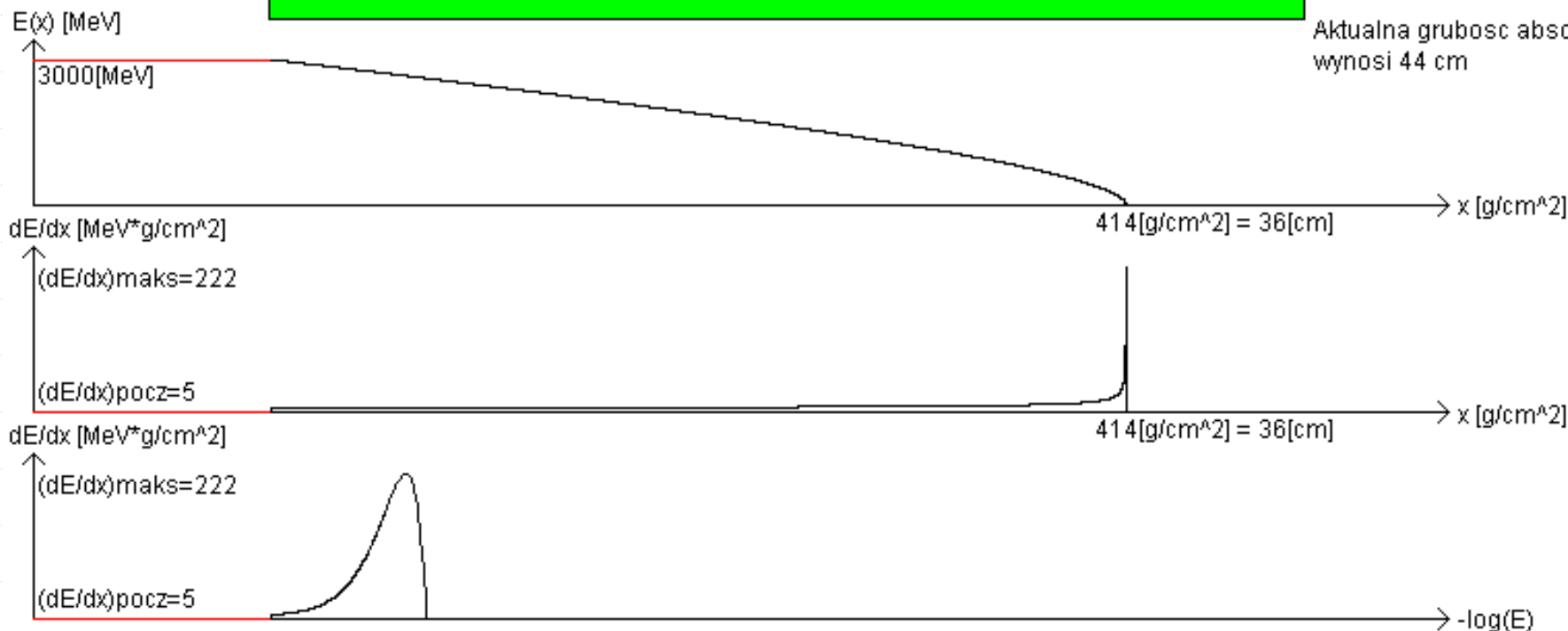
Suwak do regulacji grubosci

Czekaj...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!



AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz

Zrodlo



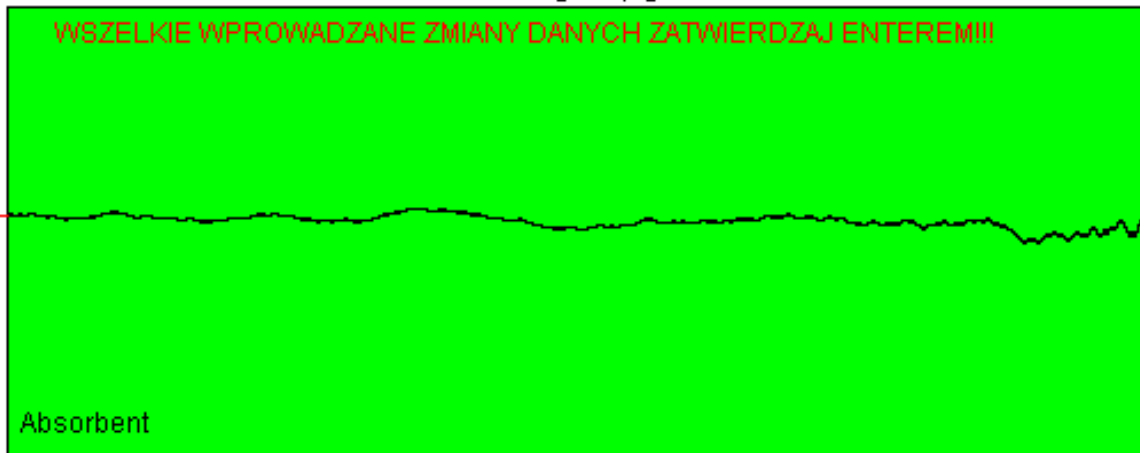
$\text{dx [g/cm}^2\text{]}$
 E czastki [MeV]
 $\text{Grubosc abs. [g/cm}^2\text{]}$
 Grubosc [cm]
 Czastka
 $\text{Absorbent i gestosc [g/cm}^3\text{]}$

Suwak do regulacji grubosci

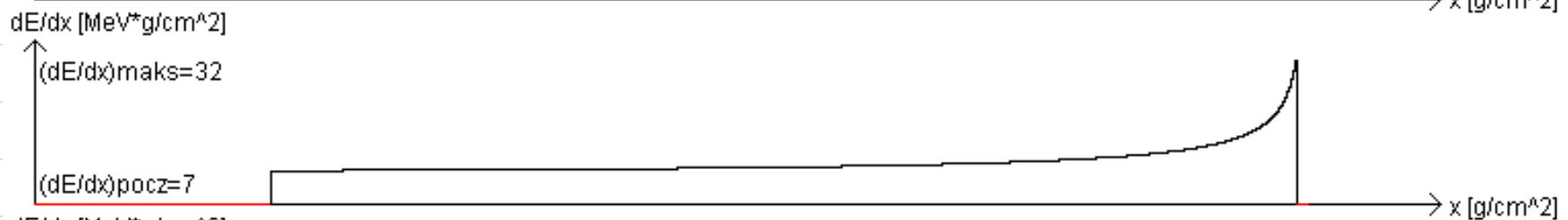
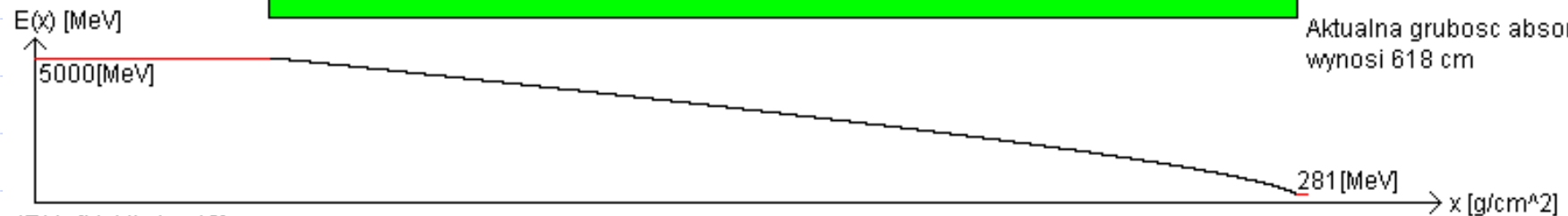
Czekaj...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!

WSZELKIE WPROWADZANE ZMIANY DANYCH ZATWIERDZAJ ENTEREM!!!

AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz



Aktualna grubosc absorbentu wynosi 618 cm



dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Czysta Absorbent i gestosc [g/cm³]

Suwak do regulacji grubosci

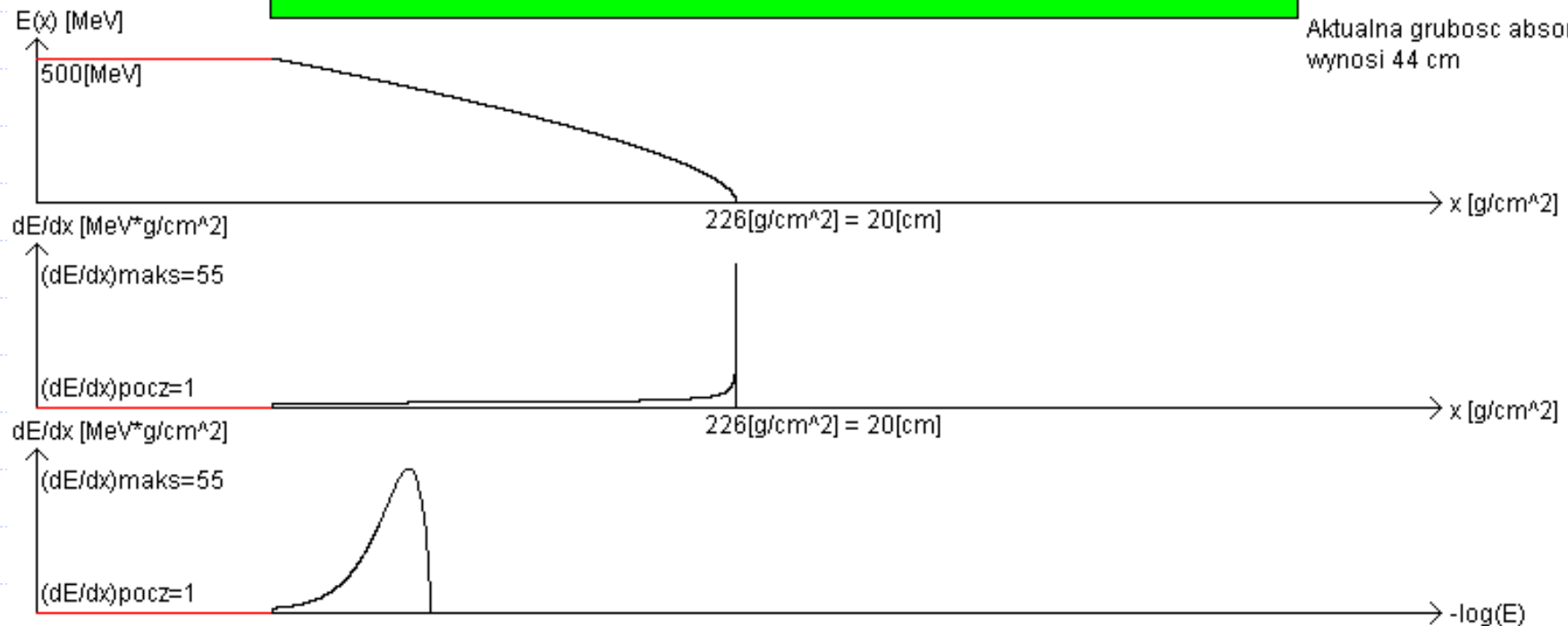
Czekaj...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!

WSZELKIE WPROWADZANE ZMIANY DANYCH ZATWIERDZAJ ENTEREM!!!

AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz



Aktualna grubosc absorbentu
 wynosi 44 cm



dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Cząstka Absorbent i gestosc [g/cm³]

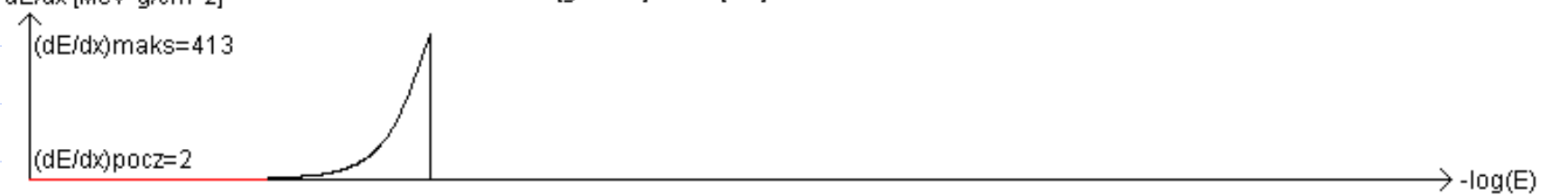
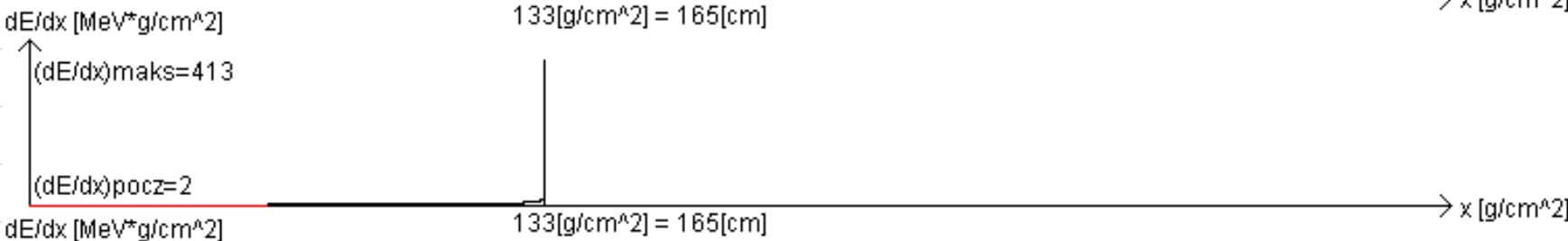
Suwak do regulacji grubosci

Czekaj...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!



AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz

Aktualna grubosc absorbentu wynosi 618 cm



$\text{dx [g/cm}^2\text{]}$
 E czastki [MeV]
 $\text{Grubosc abs. [g/cm}^2\text{]}$
 Grubosc [cm]
 Czastka
 $\text{Absorbent i gestosc [g/cm}^3\text{]}$

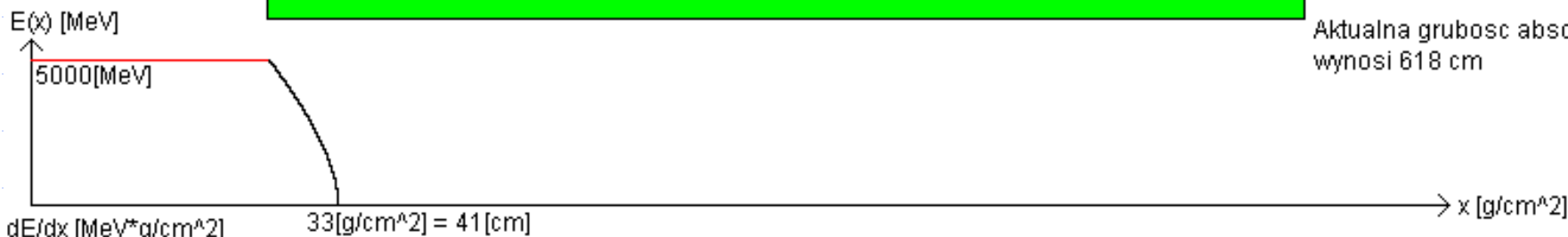
Suwak do regulacji grubosci

Czekaj...
Koniec
Kliknij WYCZYSC!



AUTORZY:
Krzysztof Wojciech Fornalski
Leon Kananowicz

Aktualna grubosc absorbentu
wynosi 618 cm



dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Czastka Absorbent i gestosc [g/cm³]

Suwak do regulacji grubosci

Czeka...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!



AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz

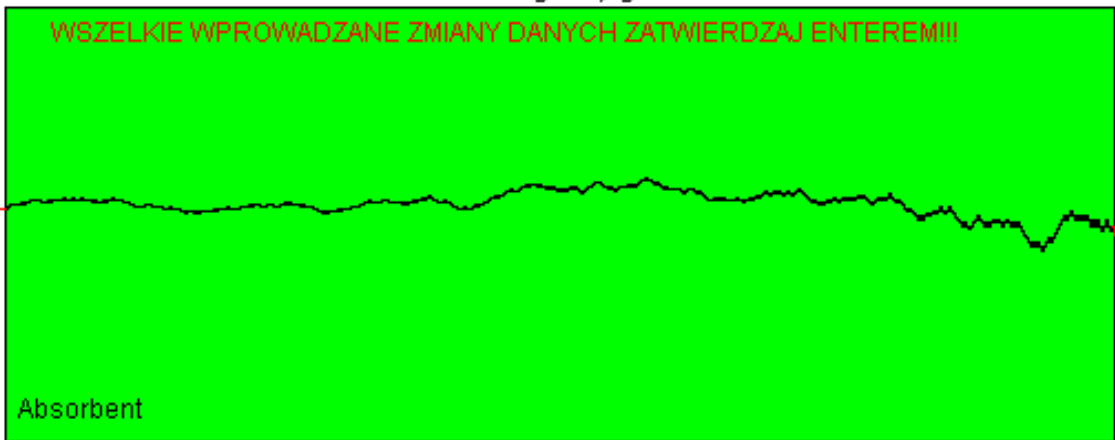
Aktualna grubosc absorbentu wynosi 44 cm



dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Czastka Absorbent i gestosc [g/cm³]

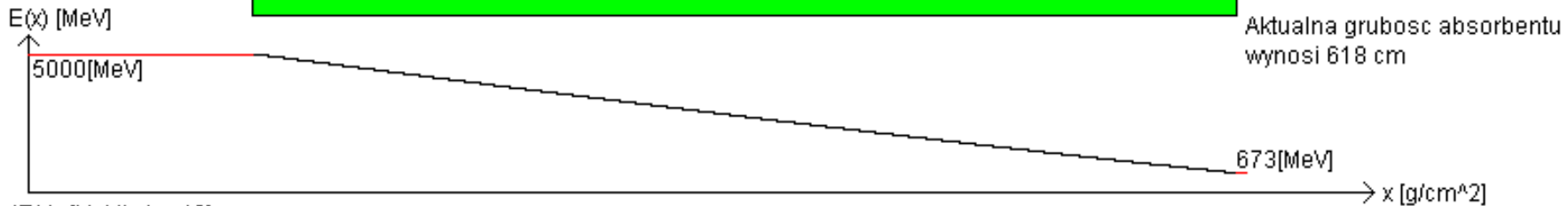
Suwak do regulacji grubosci

Czekaj...
Koniec
Kliknij WYCZYSC!



AUTORZY:
Krzysztof Wojciech Fornalski
Leon Kananowicz

Zrodlo



dx [g/cm²] E czastki [MeV] Grubosc abs. [g/cm²] Grubosc [cm] Czysta Absorbent i gestosc [g/cm³]

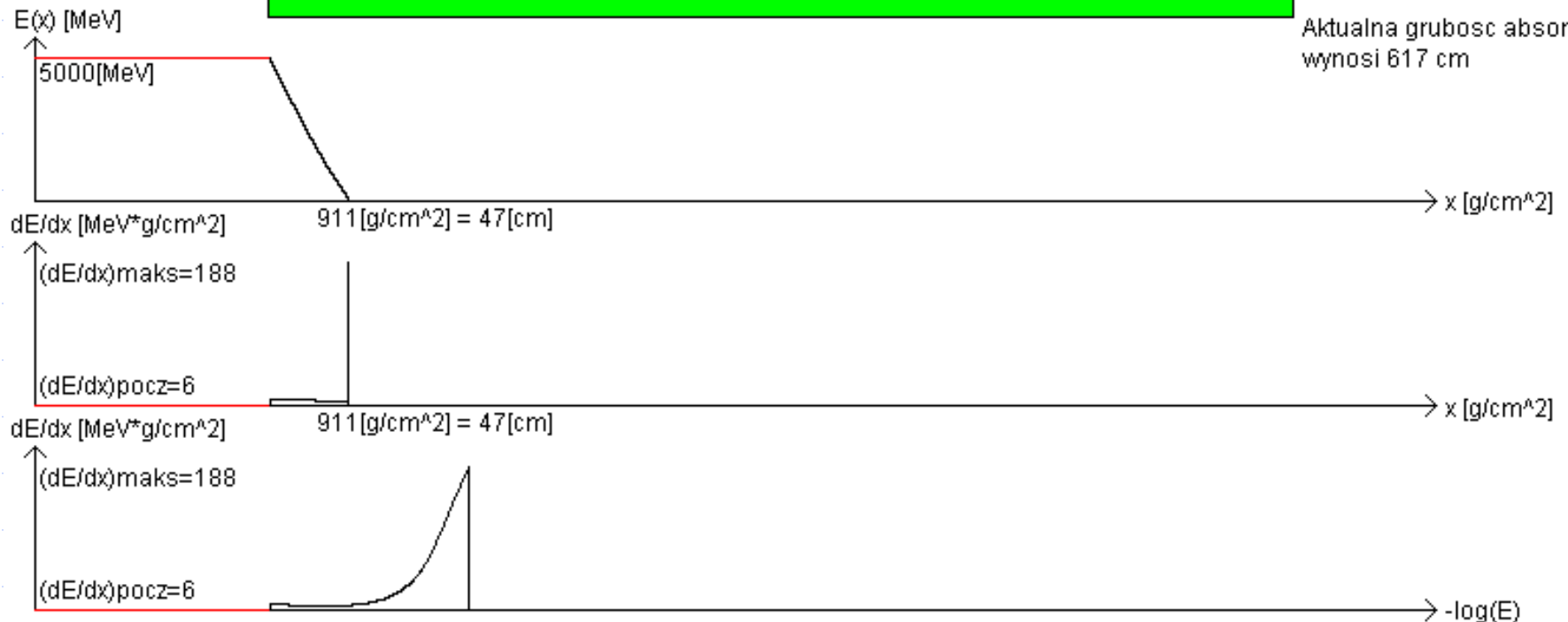
Suwak do regulacji grubosci

Czeka...
 Koniec
 Kliknij WYCZYSC!



AUTORZY:
 Krzysztof Wojciech Fornalski
 Leon Kananowicz

Aktualna grubosc absorbentu wynosi 617 cm





ODDZIAŁYWANIE NEUTRONÓW Z MATERIAŁ - WYBRANE ZAGADNIENIA

Promieniowanie neutronowe

- ◆ Zachowuje się inaczej niż pozostałe typy promieniowania
- ◆ Masa neutronu zbliżona do masy protonu, ale neutron nie posiada ładunku elektrycznego
- ◆ Jonizacja nie wprost
- ◆ Łatwość zachodzenia reakcji jądrowych

Osłona przed promieniowaniem neutronowym

- ◆ Materiał lekki, bogaty w wodór (np. woda, parafina) celem zatrzymania/spowolnienia neutronów i emisji protonów
- ◆ Materiał ciężki (np. ołów) celem zatrzymania protonów
- ◆ Sam ołów nie zatrzymuje promieniowania neutronowego, a jedynie może je rozproszyć



Oddziaływania neutronów

- ◆ Rozpraszanie elastyczne – neutrony rozpraszają się na lekkich jądrach, głównie wodoru (proton) → zasada zachowania pędu. Dzięki temu energia neutronów maleje kosztem energii kinetycznej protonu, który następnie jonizuje materię w standardowy sposób. Możliwe jest też rozproszenie elastyczne na cięższych jądrach → odbicie neutronu
- ◆ Reakcje jądrowe, w tym rozszczepienie jąder atomowych – tym nie będziemy się zajmować w ramach naszego wykładu
- ◆ Wzbudzona promieniotwórczość – wniknięcie neutronu do jądra. Neutron staje się jego składnikiem zmieniając tym samym jego izotop (np. na promieniotwórczy)

Dygresja – promieniotwórczość indukowana

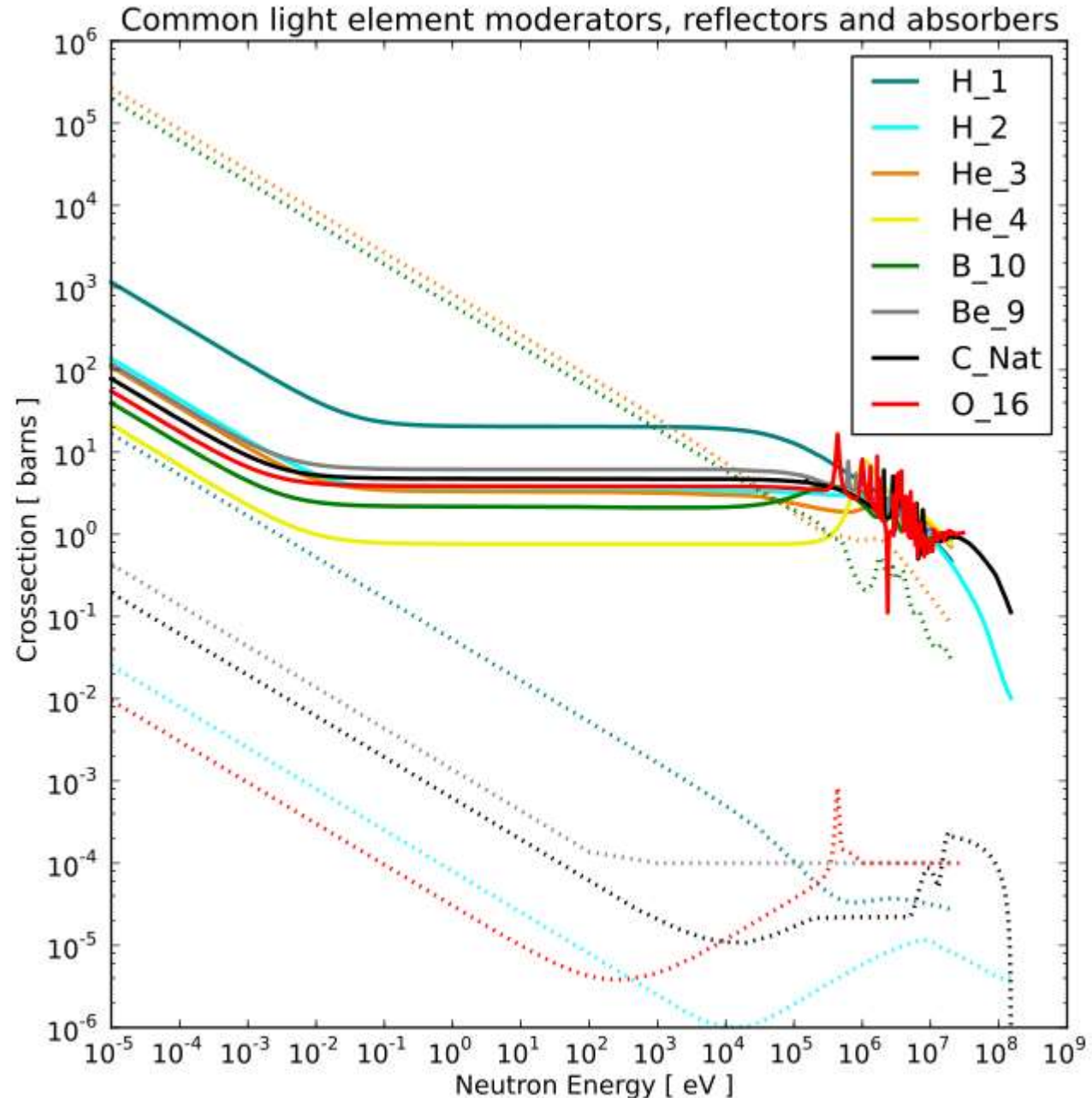
- ◆ Generalnie coś napromienione nie staje się promieniotwórcze
- ◆ Są jednak 2 wyjątki od tej zasady:
 - Promieniowanie neutronowe, które zmienia typ izotopu jądra
 - Wysokoenergetyczne promieniowanie gamma, które może wzbudzać jądro
- ◆ Oba procesy są jednak relatywnie mało prawdopodobne

Oddziaływania neutronów

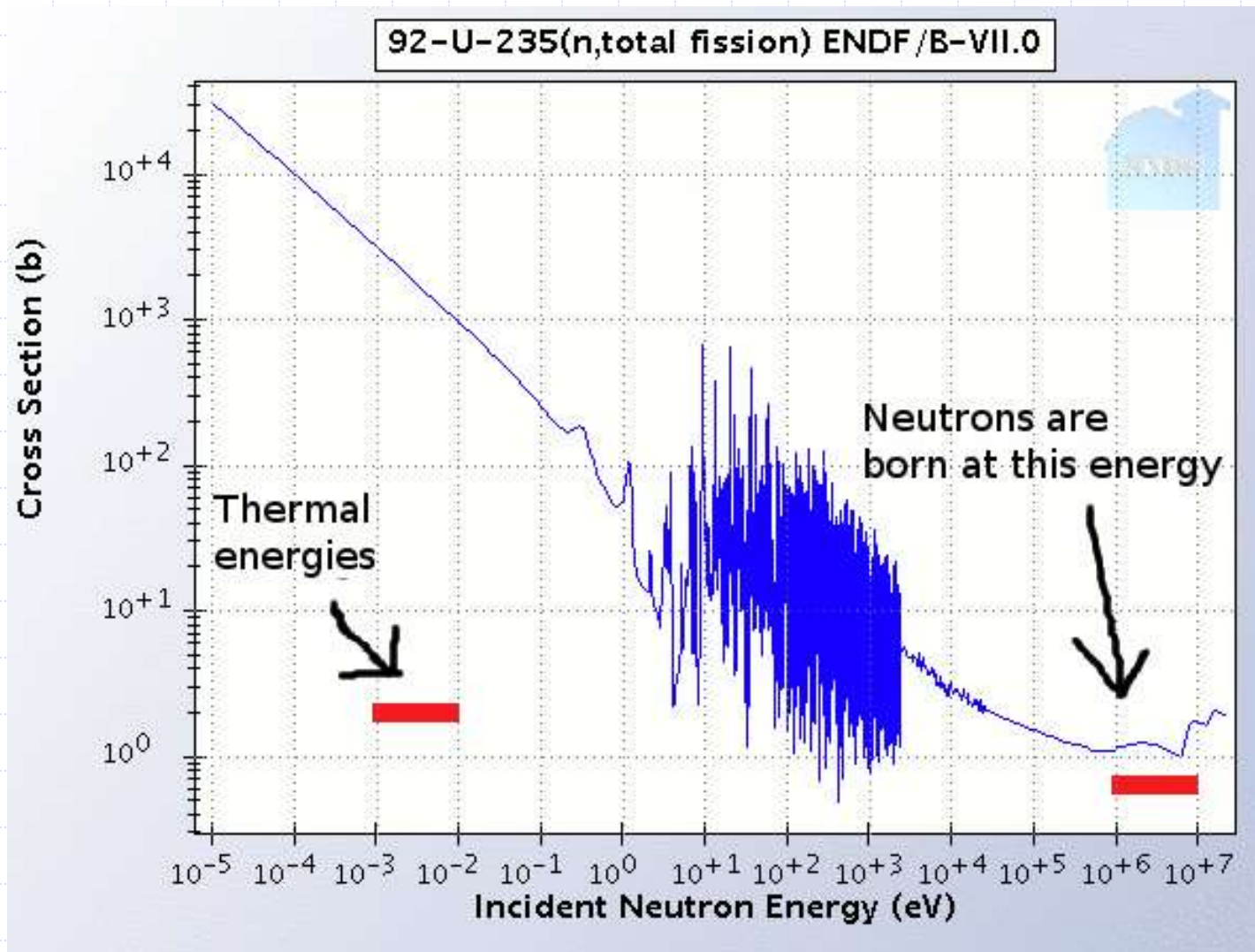
- ◆ Promieniowanie neutronowe jest silnie przenikliwe
- ◆ Oddziaływania zależą od energii neutronów
- ◆ Mówimy wówczas np. o neutronach termicznych (powolnych), neutronach rezonansowych, średnich energii czy też o neutronach prędkich (wysokich energii)
- ◆ Nie będziemy omawiać poszczególnych procesów; do promieniowania neutronowego wrócimy przy okazji dozymetrii

Przekroje czynne

- ◆ Ciągła linia – rozpraszanie; przerywana linia – absorpcja



Przekrój czynny na rozszczepienie uranu-235



Zastosowania

- ◆ Radiografia neutronowa (lepsze parametry od prom. X)
- ◆ (B)NCT (boron neutron capture therapy) – pacjent otrzymuje izotop boru-10 posiadającego bardzo duży przekrój czynny na wychwyt neutronów. Następnie pacjent naświetlany jest neutronami epitermicznymi (powolnymi), które wychwytywane są przez bor-10 (w miejscu nowotworu), a powstałe promieniowanie jonizujące ($\text{bor-10} + n^0 \rightarrow \text{lit-7} + \alpha$) niszczy komórki nowotworowe