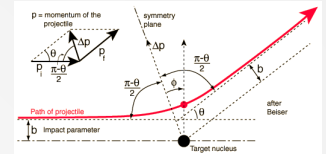


Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłąkowska-Mucha

WFiIS AGH
2020, Kraków

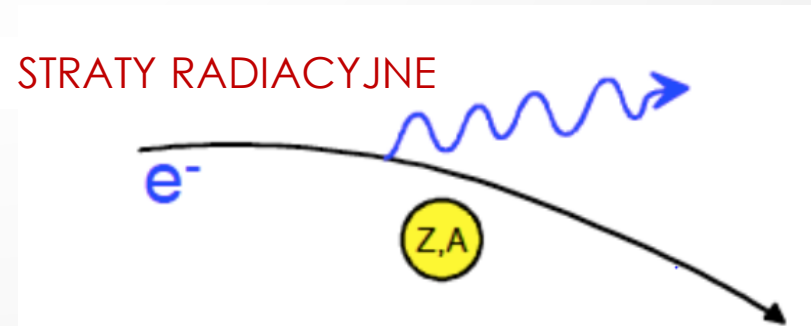
Elektrony



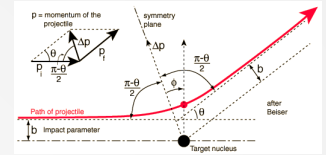
- ❑ Dla niskich energii (10-30 MeV) elektrony, podobnie jak ciężkie cząstki naładowane, tracą energię głównie na drodze jonizacji
- ❑ W przypadku elektronów mamy do czynienia ze zderzeniem takich samych nierozróżnialnych cząstek i zależność na stratę en. kin jest trochę inna.
- ❑ Straty energii dla elektronów słabo zależą od energii: $-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \sim \ln E$
- ❑ Powyżej, tak zwanej, energii krytycznej głównym mechanizmem strat energii jest **promieniowanie hamowania** (bremsstrahlung).
- ❑ Jest to proces emisji fotonów przez elektron przyspieszany w polu kulombowskim jądra

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{Brems} \propto \frac{E}{m^2}$$

STRATY RADIACYJNE



Bremsstrahlung



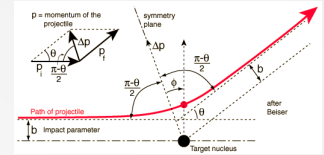
- ❑ **Promieniowanie hamowania** jest emitowane przez szybkie naładowane cząstki.
- ❑ Jego mechanizm fizyczny związany jest z oddziaływaniem z jądrami atomowymi materiału czynnego
- ❑ Dla cząstek relatywistycznych, strata energii na drodze emisji promieniowania hamowania da się opisać równaniem:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{Brem} \approx 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} z^2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \cdot \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right)$$

Gdzie: Z , A to liczby atomowa oraz masowa medium; z , m , E to ładunek, masa oraz energia cząstki penetrującej

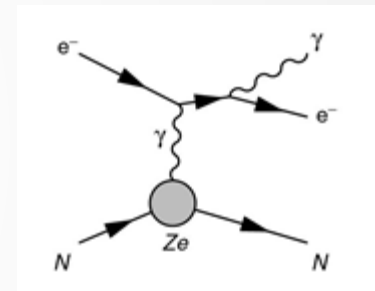
- ❑ Straty energii na emisję PH, charakteryzują się zupełnie innymi własnościami niż straty jonizacyjne
 - ❑ **Liniowa** zależność od **energii** cząstek
 - ❑ **Odwrotnie proporcjonalne** do kwadratu masy cząstek

Elektrony



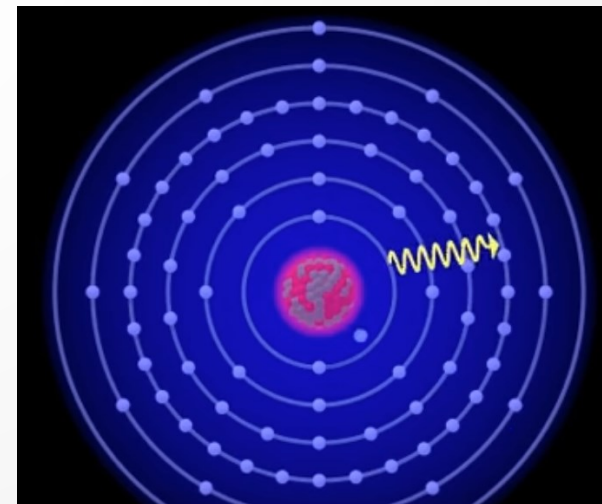
- ❑ W zasadzie, elektrony „zawsze są relatywistyczne” i zakładamy, że dominującym sposobem oddziaływania z materią jest dla nich promieniowanie hamowania
- ❑ Inne cząstki naładowane również podlegają temu procesowi, ale jest on **silnie tłumiony przez masę cząstek** (m_e^2/m_μ^2)

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{Brems} = \frac{E}{X_0}$$

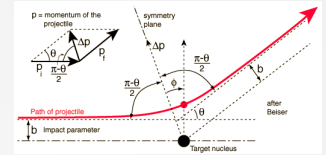


X_0 - droga radiacyjna, po przejściu X_0 elektron ma $1/e$ energii (63%)

$$\left. \frac{dE}{dx}(E_c) \right|_{Brems} = \left. \frac{dE}{dx}(E_c) \right|_{Ion}$$



Bremsstrahlung



- ❑ Promieniowanie hamowania ma szczególne znaczenie dla elektronów (b. mała masa)
- ❑ Równanie ze s.3 można uprościć:

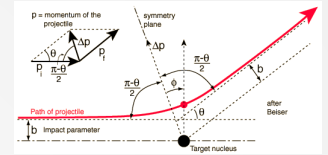
$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_B \approx 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} z^2 r_e^2 E \cdot \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right)$$

- ❑ Oraz dalej:

$$\boxed{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_B = \frac{E}{X_0}}$$

- ❑ Równanie to formalnie definiuje **długość radiacyjną** X_0
- ❑ Całkowanie daje nam **atenuację energii** naładowanych cząstek na drodze strat radiacyjnych
- ❑ Straty radiacyjne są procesem konkurencyjnym dla jonizacji, energia dla której straty te są identyczne (definiowana zwykle dla elektronów) nazywa się **energiją krytyczną** E_c

Bremsstrahlung



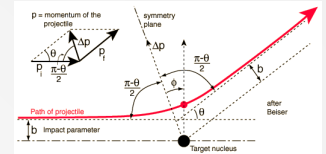
$$\left(-\frac{dE}{dx}(E_c) \right)_I = \left(-\frac{dE}{dx}(E_c) \right)_B$$

- ❑ Rozkład energii emitowanych fotonów hamowania jest odwrotnie proporcjonalny do ich energii $\propto 1/E_\gamma$
- ❑ Fotony te są emitowane „do przodu”, rozkład kątowy można przybliżyć formułą $\theta_\gamma \approx m_e c^2 / E$
- ❑ Numeryczne wartości energii krytycznej można wyznaczyć używając formuły BB oraz na straty hamowania, dla elektronów dostaniemy:

$$E_c = \frac{610}{Z + 1.24} [MeV]$$

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_B \cdot X_0 \approx E_c$$

Bremsstrahlung

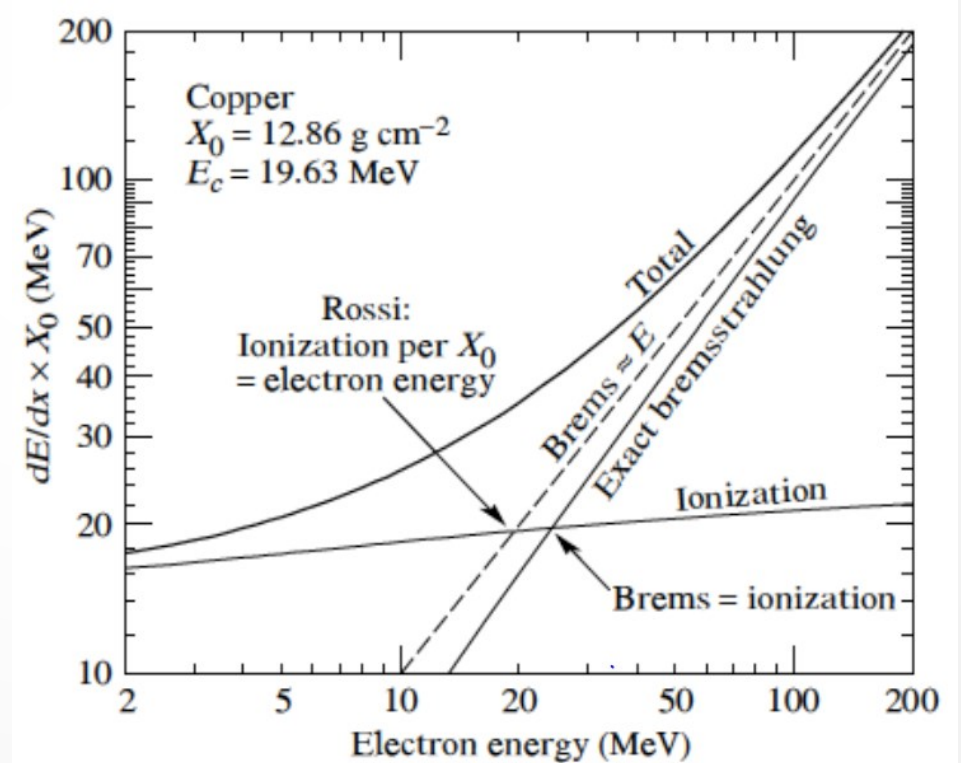
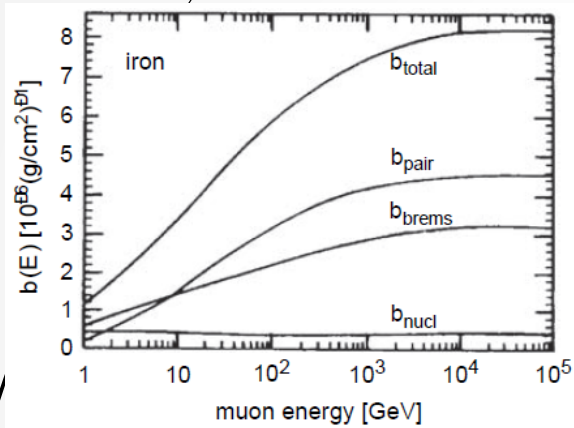
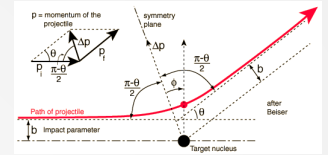


- ❑ Energie krytyczne (oraz długości radiacyjne!) skalują się tak jak kwadraty mas cząstek naładowanych, które podlegają hamowaniu
- ❑ Znając wartości energii krytycznej dla elektronów możemy wyznaczyć ją dla mionów (na przykład):

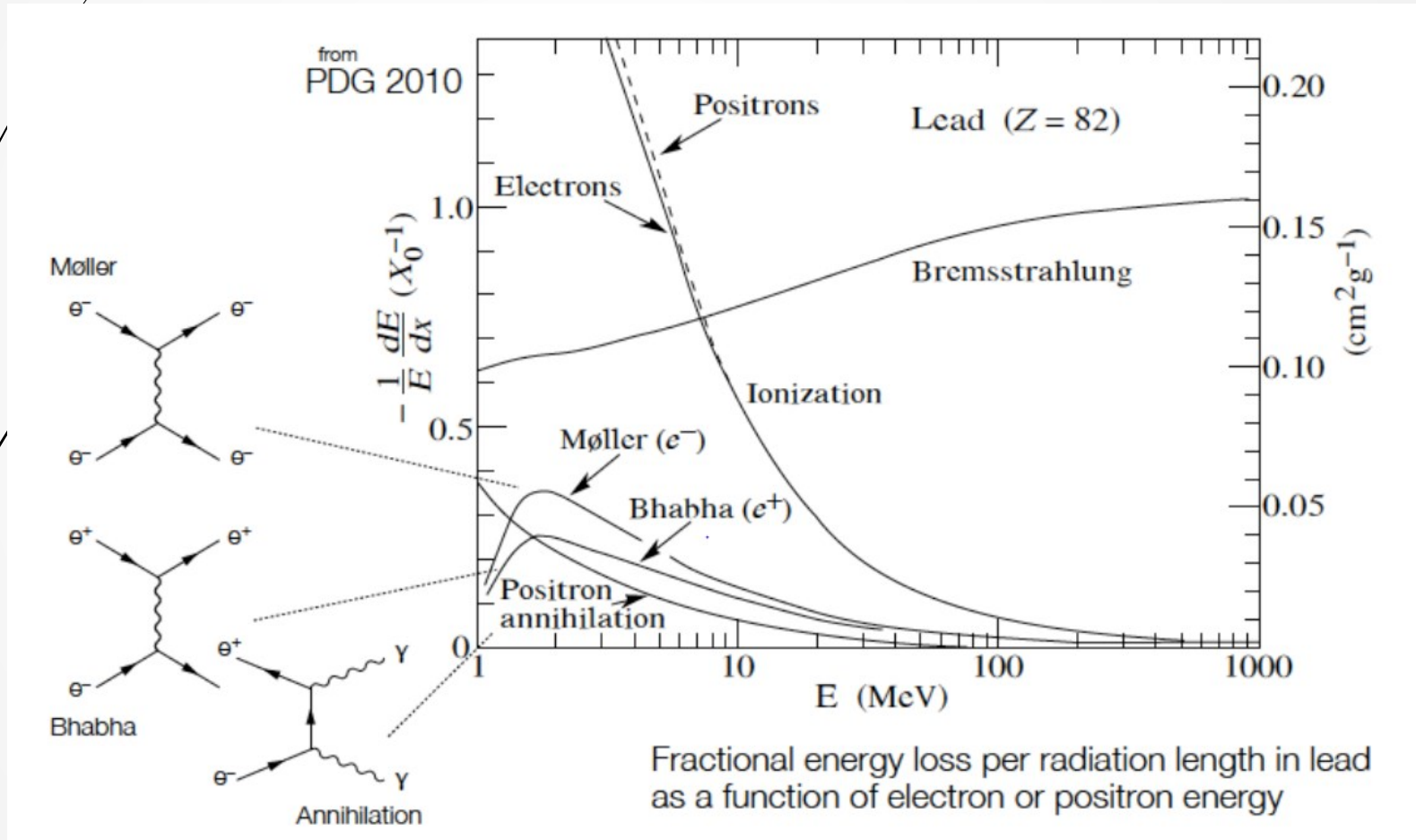
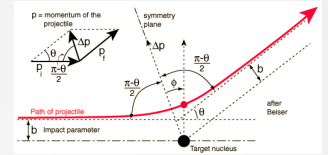
$$E_c^\mu \approx E_c^e \cdot \left(\frac{m_\mu}{m_e} \right)^2 = 890 \text{ GeV}$$

Material	Z	A	X_0 [g/cm ²]	X_0 [cm]	E_c [MeV]
Hydrogen	1	1.01	61.3	731 000	350
Helium	2	4.00	94	530 000	250
Lithium	3	6.94	83	156	180
Carbon	6	12.01	43	18.8	90
Nitrogen	7	14.01	38	30 500	85
Oxygen	8	16.00	34	24 000	75
Aluminium	13	26.98	24	8.9	40
Silicon	14	28.09	22	9.4	39
Iron	26	55.85	13.9	1.76	20.7

Strata całkowa

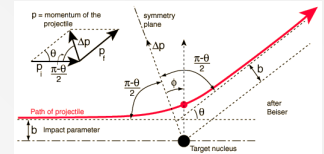


Strata całkowa



E.Garutti

Strata całkowita



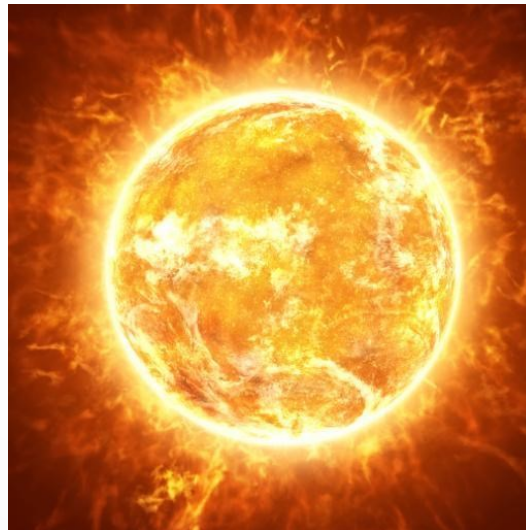
- ❑ W przeciwieństwie do „łagodnych” strat jonizacyjnych straty energii na drodze promieniowania hamowania, produkcji par oraz reakcji foto-jądrowych charakteryzują się **b. dużymi przekazami energii**
 - ❑ Duże fluktuacje statystyczne
 - ❑ Trudno zdefiniować średnią stratę całkowitą
- ❑ Stratę całkowitą zapisujemy jako:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{brem} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{pair} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{photo}$$

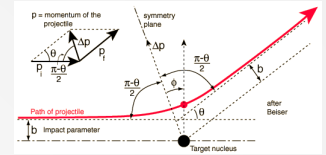
$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} + b(Z, A, E) \cdot E$$

- ❑ Współczynniki b , znaleźć można w literaturze (por. slajd 10 oraz 11, lub następny...)

Fotony



A teraz fotony...



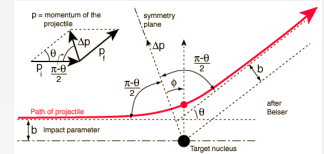
- ❑ Fizyka oddziaływania fotonów z materią różni dość zasadniczo od zjawisk związanych z jonizacją
- ❑ Detekcja fotonów (neutralne!) opiera się o wykorzystanie procesów, w których produkowane są cząstki wtórne posiadające ładunek (**czyli, „the bottom line is” – jonizacja!**)
 - ❑ W każdym akcie oddziaływania foton albo „ulega zniszczeniu” (efekt fotoelektryczny, dysocjacja) albo przekazuje znaczą część swojej energii początkowej (rozproszenie Compton’a)
 - ❑ Brak możliwości wyznaczenia zasięgu, zamiast tego wprowadzamy pojęcie atenuacji (głębokość optyczna) wiązki fotonów:

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

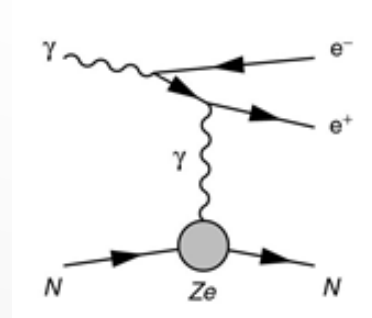
gdzie: masowy współczynnik atenuacji (MWA):

$$\mu = \frac{N_A}{A} \sum_i \sigma_i$$

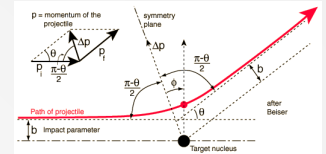
Fotony



- ❑ **Trzy** główne sposoby oddziaływania – silna zależność od energii
 - ❑ **Efekt fotoelektryczny** dla fotonów o energiach $\sim keV$ (maksymalna energia wiązań elektronów w atomach)
 - ❑ **Rozproszenie Compton'a** (kwazi-stacjonarny elektron) $\sim MeV$
 - ❑ **Dysocjacja** do pary elektron-pozyton (**kreacja par**) dominuje dla fotonów o energiach $> 10 MeV$
- ❑ Uwaga – dysocjacja fotonu może zajść jedynie w polu elektrostatycznym jądra atomowego – zasady zachowania, energia odrzutu
- ❑ Oddziaływanie elektronów i fotonów (o dużych energiach) jest opisane przez tzw. **długość radiacyjną** X_0 ($\sim cm$)

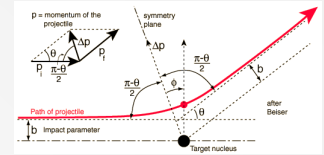


Główni aktorzy



- ❑ Przekroje czynne występujące w zależności opisującej MWA zależą silnie od energii fotonów
 - ❑ Uwaga! Nie można zdefiniować dla fotonów „zasięgu” w materiale czynnym
- ❑ W zależności od energii możemy wyróżnić trzy zakresy w których dominują inne zjawiska
 - ❑ **Niskie energie** ($100 \text{ keV} \geq E_\gamma \geq E_{jon}$) dominuje efekt fotoelektryczny: $\gamma + atom \rightarrow atom^* + e^-$
 - ❑ **Energie** $E_\gamma \sim 1 \text{ MeV}$, dla których dominuje efekt Compton'a (rozproszenie na quasi-stacjonarnym elektronie atomowym): $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$
 - ❑ Dla wysokich energii $E_\gamma \gg 1 \text{ MeV}$ dominuje produkcja par (dysocjacja fotonu): $\gamma + j.at. \rightarrow e^- + e^+ + j.at.$

Efekt fotoelektryczny



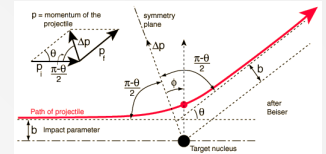
- ❑ Elektrony atomowe są zdolne do całkowitego pochłonięcia fotonów (swobodne nie – **zasady zachowania!**)
- ❑ W procesie musi uczestniczyć **jądro atomowe** – z uwagi na to, absorpcja przez elektrony znajdujące się w **powłoce K** jest wyjątkowo duża (~ 80% całkowitego przekroju czynnego)
- ❑ Całkowity przekrój czynny (przybliżenie Borna), można zapisać jako:

$$\sigma_{foto}^K = \left(\frac{32}{\epsilon^7}\right)^{1/2} \alpha^4 Z^5 \sigma_{Th}^e \left[\frac{cm^2}{atom}\right]$$

gdzie: ϵ – zredukowana energia fotonu: $\epsilon = E_\gamma/m_e c^2$, σ_{Th}^e - to elastyczny przekrój czynny na rozpraszanie fotonów na elektronach: $\sigma_{Th}^e = \frac{8}{3} \pi r_e^2$

- ❑ Mechanizm fizyczny efektu fotoelektrycznego jest pojęciowo prosty i posiada jasną „interpretację klasyczną”, jednakże prowadzi on do szeregu ciekawych efektów wtórnych

Efekt fotoelektryczny

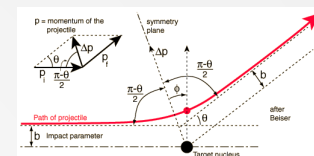


- ❑ Wzbudzony atom może wyemitować, np. z powłoki K , elektron – to „puste” miejsce może zostać zajęte przez elektron z wyżej powłoki czemu towarzyszy emisja fotonów promieniowania charakterystycznego X
- ❑ Energię tego promieniowania daje prawo Moseley’a:

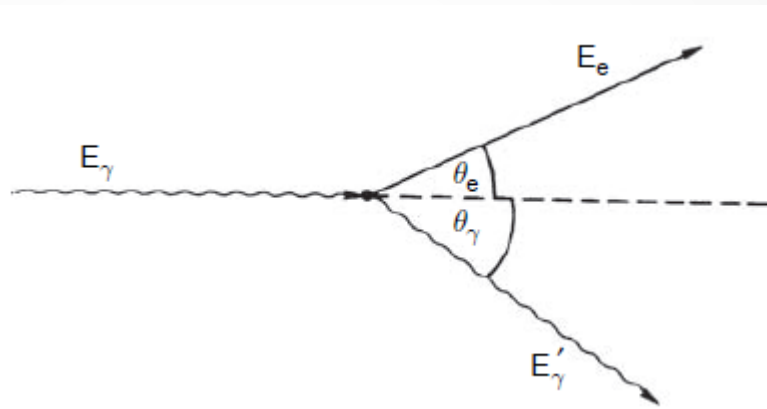
$$E = Ry(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \rightarrow E(K_{\alpha}) = \frac{3}{4} Ry(Z - 1)^2$$

- ❑ Procesem konkurencyjnym do emisji promieniowania X jest usunięcie kolejnego elektronu – tzw. efekt Auger’a
 - ❑ Elektrony Auger’a charakteryzują się dyskretnym widmem
 - ❑ Ich energia nie jest w żaden sposób związana z energią pierwotnych fotonów

Efekt Compton'a



- Zakładamy, że energia wiązania elektronu jest pomijalnie mała w porównaniu z energią fotonu



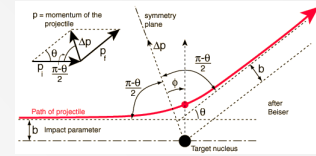
- Przekrój czynny opisujący rozproszenie Comptona może być przybliżony formułą:

$$\sigma_C^e \propto \frac{\ln(\epsilon)}{\epsilon}$$

- Stosunek energii fotonu rozproszonego do energii początkowej:

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + \epsilon(1 - \cos(\theta_\gamma))}$$

Kreacja par



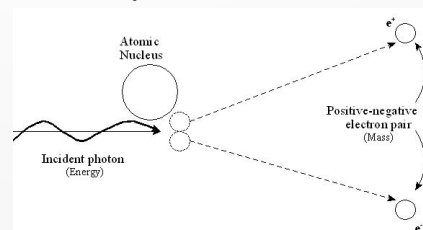
- ❑ Dysocjacja fotonów jest efektem progowym – energia fotonów musi osiągnąć pewną minimalną wartość:

$$E_{\gamma} \geq 2m_e c^2 + 2 \frac{m_e^2}{m_{j.at.}} c^2$$

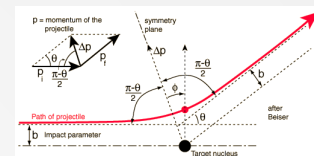
- ❑ W przypadku praktycznych urządzeń do detekcji, zawsze będziemy zakładać, że proces kreacji par odbywa się w polu jądra atomowego oraz, że kreowanymi cząstkami są elektrony
- ❑ Dla dużych energii fotonów, przekrój czynny zapiszemy jako:

$$\sigma_p \approx \frac{7}{9} 4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} = \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}$$

- ❑ Rozkład kątowy produkowanych elektronów jest bardzo wąski, charakterystyczny kąt rozwarcia opisujący ten rozkład można przybliżyć jako: $\vartheta \approx m_e c^2 / E_{\gamma}$

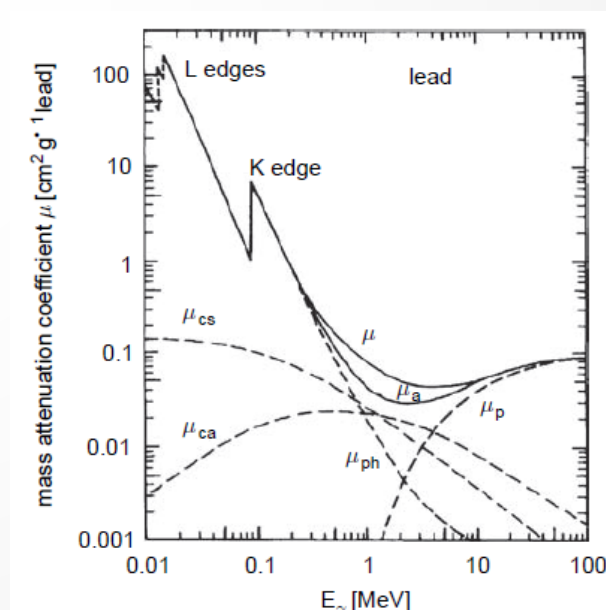
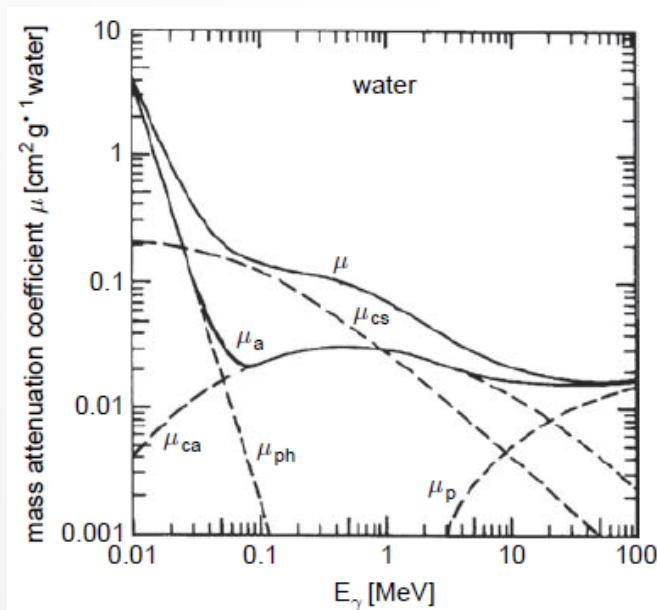


Całkowita absorpcja

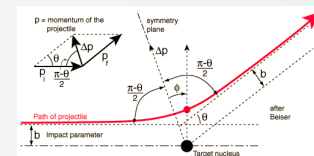


$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad \mu = \frac{N_A}{A} \sum_i \sigma_i$$

- Oddziaływanie fotonów z materią może być podsumowane poprzez podanie masowych współczynników atenuacji w funkcji energii fotonów



Całkowita absorpcja



- ❑ Poszczególne „składowe” oddziaływań można również uszeregować w/g względnej istotności w funkcji energii fotonów

