

V Oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z materią.

Rozważmy równoległą wiązkę fotonów przechodzącą przez warstwę materii. Fotony mogą oddziaływać z atomami warstwy na drodze czterech różnych procesów. Są to: zjawisko fotoelektryczne, tworzenie par, zjawisko Thomsona i zjawisko Comptona.

Zjawisko fotoelektryczne

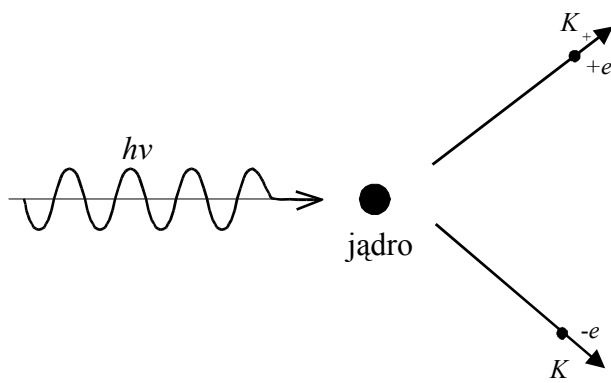
Omówione w pyt. III

Zjawisko Thomsona i zjawisko Comptona

Omówione w pyt. IV

Kreacja i anihilacja par

Oprócz zjawiska fotoelektrycznego, Comptona i Thomsona istnieje jeszcze jeden proces, w którym fotony w wyniku oddziaływania z materią tracą swą energię. Jest to zjawisko **kreacji par**. Zjawisko tworzenia par jest również doskonałym przykładem przemiany energii promienistej w energię spoczynkową, a także w energię kinetyczną.



W procesie tym foton o wysokiej energii traci wskutek zderzenia z jądrem całą swą energię $h\nu$ i jej kosztem powstaje para cząstek – elektron i pozyton, mających pewną energię kinetyczną. **Pozyton jest cząstką o własnościach identycznych z własnościami elektronu, z wyjątkiem znaku ładunku elektrycznego (i kierunku momentu magnetycznego).**

W procesie tworzenia par energia przekazana jądro ulegającemu odrzutowi jest zanedbywalna, ponieważ jądro ma dużą masę. Obie cząstki mają jednakowe energie spoczynkowe m_0c^2 . Wyprodukowany pozyton ma nieco większą energię kinetyczną, ponieważ w wyniku oddziaływania kulombowskiego wytworzonej pary z dodatnio naładowanym jądrem występuje przyspieszenie pozytonu i hamowanie elektronu

$$h\nu = E_- + E_+ = K_- + K_+ + 2m_0c^2$$

Podstawowe prawa, które muszą być spełnione podczas oddziaływania to: prawo zachowania całkowitej energii relatywistycznej, prawo zachowania pędu oraz prawo

zachowania ładunku. Obecność ciężkiego jądra (które może odebrać część pędu nie zmieniając przy tym w sposób znaczny bilansu energetycznego) jest konieczne, aby w procesie tworzenia pary spełnione były jednocześnie zarówno prawo zachowania pędu jak i energii. **Mówimy, że proces kreacji par przebiega w polu jądra**, czyli w polu oddziaływania z jądrem.

Możemy stwierdzić, że **minimalna energia fotonu, zwana inaczej energią progową, potrzebna do wytworzenia pary cząstek**, wynosi $2m_0c^2$, czyli 1,02 MeV, co odpowiada długości fali 0,012 Å. Jeżeli długość fali jest mniejsza, a tym samym energia jest większa od energii progowej, to wytworzona para cząstek ma oprócz energii spoczynkowej również pewną energię kinetyczną.

Oczywiście taki pozyton nie żyje długo, ponieważ zaraz po napotkaniu elektronu anihiluje.

W przyrodzie pary elektron-pozyton wytwarzane są przez fotony promieniowania kosmicznego, a w laboratoriach przez fotony wytwarzane w akceleratorach cząstek. Pary innych cząstek, jak proton-antyproton można również wytworzyć, o ile fotony mają wystarczająco dużą energię. Ponieważ elektron i pozyton mają najmniejszą masę spoczynkową ze wszystkich znanych cząstek, więc energia progowa, konieczna do ich wytworzenia, jest także najmniejsza. Doświadczenia potwierdzają kwantowy obraz zjawiska tworzenia par. Natomiast w ramach teorii klasycznej nie można znaleźć żadnego wyjaśnienia tego zjawiska.

Ze zjawiskiem kreacji par ściśle związany jest proces odwrotny zwany anihilacją par. Polega on na tym, że gdy spoczywające cząstki – elektron i pozyton – znajdują się blisko siebie, wtedy łączą się ze sobą i ulegają anihilacji. W rezultacie następuje unicestwienie dwóch cząstek materialnych, w miejsce których powstaje promieniowanie elektromagnetyczne. Ponieważ początkowy pęd układu wynosił zero, a pęd w rozważanym procesie musi być zachowany, więc nie może powstać tylko jeden foton. Najbardziej prawdopodobnym procesem jest kreacja dwóch fotonów poruszających się w przeciwnych kierunkach z jednakowymi pędami. Jeśli para cząstek ma na początku pewną energię kinetyczną, to energia powstających fotonów będzie większa niż 0,51 MeV i odpowiednio długość fali może być mniejsza niż 0,024 Å.

W wyniku występowania zjawiska fotoelektrycznego oraz kreacji par zachodzi całkowita absorpcja fotonów, natomiast zjawisko Comptona i zjawisko Thomsona prowadzą do rozpraszania fotonów.

Określając prawdopodobieństwo zachodzenia tych procesów w danych warunkach, podaje się wielkości zwane przekrojami czynnymi.

Przeanalizujmy problem na przykładzie zjawiska fotoelektrycznego. Zauważmy, że liczba N aktów absorpcji powinna wzrastać proporcjonalnie do liczby fotonów I padających na warstwę oraz do liczby n atomów tarczy przypadających na jednostkę powierzchni, więc

$$N \sim I \cdot n$$

Powyższy związek zapiszemy w formie równości, stałą proporcjonalności oznaczając symbolem σ :

$$N = \sigma I n,$$

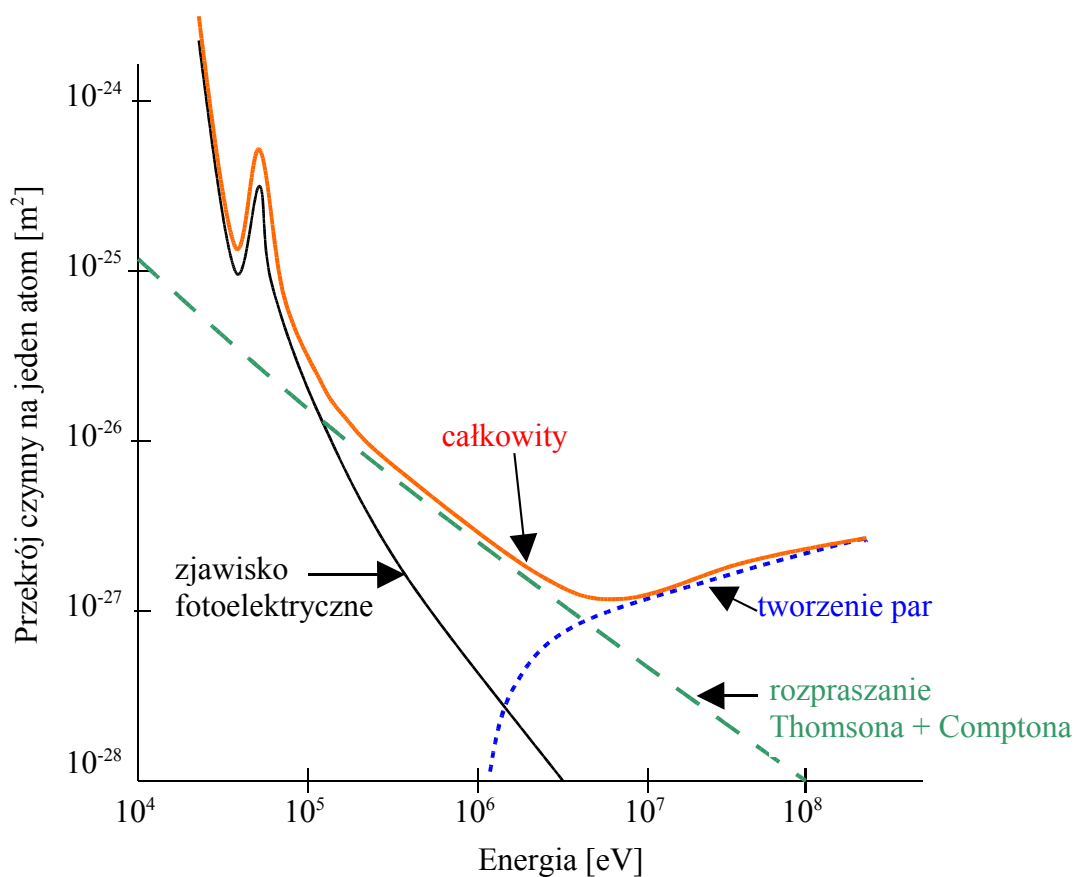
gdzie **σ jest przekrojem czynnym.**

Przekrój czynny, który jest wielkością zależną zarówno od energii fotonu jak i rodzaju atomu, stanowi miarę efektywności, z jaką takie atomy absorbują fotony w zjawisku fotoelektrycznym.

Wymiarem przekroju czynnego jest wymiar powierzchni.

Oczywiście takie same rozważania można przeprowadzić dla innych zjawisk. Pojęcie przekroju czynnego jest sposobem liczbowego wyrażenia prawdopodobieństwa, iż dany rodzaj atomu powoduje, że foton o danej energii ulega danemu procesowi.

Na wykresie dla zjawiska fotoelektrycznego obserwujemy skoki. Związane jest to z pracą wybijającą elektrony z atomów (nie z pracą wyjścia) w ten sposób, że jeżeli



dostarczymy energię potrzebną na pracę wyjścia z metalu, to elektrony mamy na powierzchni i prawdopodobieństwo zajścia następnego zjawiska gwałtownie maleje aż do momentu, gdy osiągniemy energię umożliwiającą wybicie elektronu z atomu, a następnie na powierzchnię metalu.

Całkowity przekrój czynny przynależący na jeden atom jest sumą przekrojów czynnych 10^{-26} rozpraszanie, zjawiska fotoelektrycznego i tworzenia par. Wielkość ta określa prawdopodobieństwo występowania jakiegokolwiek oddziaływania fotonu z atomem. Ponieważ prawdopodobieństwo występowania każdego z tych procesów w różny sposób zależy od liczby atomowej, więc zakresy energii, w których poszczególne procesy dominują, są zupełnie inne dla atomów o różnych liczbach atomowych

Proces	Ołów [eV]	Aluminium [eV]
Zjawisko fotoelektryczne	$h\nu < 5 \cdot 10^5$	$h\nu < 5 \cdot 10^4$
Rozpraszanie	$5 \cdot 10^5 < h\nu < 5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^4 < h\nu < 1 \cdot 10^7$
Tworzenie par	$5 \cdot 10^6 < h\nu$	$1 \cdot 10^7 < h\nu$

Oprócz przekroju czynnego wprowadza się jeszcze jedną wielkość zwaną współczynnikiem osłabienia. Natężenie wiązki, określane liczbą fotonów I , jaką zawiera wiązka, maleje wykładniczo, gdy grubość warstwy t wzrasta. **Wielkość $\sigma\rho$, zwana współczynnikiem osłabienia, ma wymiar m^{-1} i równa jest odwrotności grubości warstwy Δ potrzebnej do osłabienia wiązki e razy.** Grubość ta czasami nazywana jest odległością osłabienia:

$$A = \frac{1}{\sigma\rho}$$

Współczynnik osłabienia jest zależny od energii fotonu w ten sam sposób jak całkowity przekrój czynny.

Na rysunku przedstawione są zmierzone współczynniki osłabienia dla ołowiu, cyny i aluminium (dla fotonów o stosunkowo wysokiej energii).

