



17. Dualizm korpuskularno-falowy - I

17.1. Korpuskularna natura fal elektromagnetycznych:

- promieniowanie termiczne (ciała doskonale czarne),
- hipoteza Plancka,
- pojęcie kwantu,
- zjawisko fotoelektryczne,
- efekt Comptona.



Mechanika kwantowa

Mechanika kwantowa - teoria opisująca prawa ruchu obiektów mikroskopowych, o bardzo małych masach i rozmiarach (atom, cząstki elementarne) oraz nietypowe zjawiska makroskopowe (np. nadprzewodnictwo).

Granicą MK dla średnich rozmiarów, energii czy pędów jest mechanika klasyczna.

Mechanika kwantowa jest jednak znacznie bardziej złożona matematycznie i pojęciowo –

w świecie mikroskopowym wiele wielkości jest **skwantowanych**, tzn. występuje w całkowitych wielokrotnościach pewnych minimalnych porcji zwanych **kwantami**.

Foton - kwant światła

Opis szeregu zjawisk wymaga uwzględnienia kwantowej natury światła:

- prawidłowy opis emisyjności promieniowania termicznego z postulatem kwantyzacji energii świetlnej - **prawo Plancka**;
- **zjawisko fotoelektryczne** – energia kwantów - równanie Einsteina;
- **efekt Comptona** - pęd fotonów.

Promieniowanie termiczne

- model ciała doskonale czarnego;
- prawa promieniowania termicznego;
 - prawo Kirchhoffa,
 - prawo Stefana-Boltzmannna,
 - prawo przesunięć Wiena;
- prawo Rayleigha-Jeansa – klasyczne;
- prawo Plancka – kwantowe.

Podstawowe definicje

Promieniowaniem termicznym (zwanym też cieplnym lub temperaturowym) nazywamy promieniowanie wysyłane przez ciała ogrzane do pewnej temperatury na skutek drgań ładunków elektrycznych.

Wszystkie ciała **emitują** takie promieniowanie do otoczenia, a także z otoczenia je **absorbują**.

Zdolność absorpcyjna $a(\nu, T)$, określa jaki ułamek energii padającej na powierzchnię zostanie pochłonięty.

Zdolność odbicia $r(\nu, T)$, określa jaki ułamek energii padającej zostanie odbity.

W przypadku ciała nieprzezroczystego, gdy transmisja promieniowania przez ciało jest równa zero związek pomiędzy absorpcją a odbiciem określa równanie:

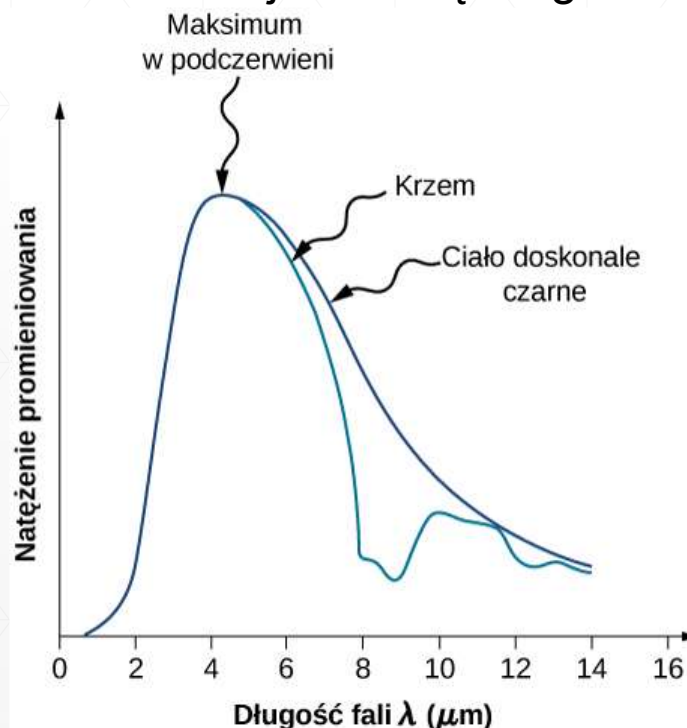
$$a(\nu, T) + r(\nu, T) = 1$$

Zdolność emisyjna

Zdolność emisyjna ciała $e(\nu, T)d\nu$ definiujemy jako energią promieniowania wysyłanego w jednostce czasu z jednostki powierzchni o temperaturze T , w postaci **fal elektromagnetycznych** o częstościach zawartych w przedziale od ν do $\nu + d\nu$.

Wielkość $e(\nu, T)$ można wyrazić również w funkcji długości fali $e(\lambda, T)$ i wówczas iloczyn $e(\lambda, T)d\lambda$ oznacza szybkość, z jaką jednostkowy obszar powierzchni wypromieniowuje energię odpowiadającą długościom fal zawartym w przedziale $\lambda, \lambda + d\lambda$, czyli natężenie promieniowania na jednostkę długości fali.

- Widmo emitowane przez ciała stałe ma charakter ciągły
- Szczegóły tego widma są prawie niezależne od rodzaju substancji
- Widmo silnie zależy od temperatury emitującego ciała



Ciało doskonale czarne

Ciało doskonale czarne (c.d.cz.) całkowicie absorbuje promieniowanie termiczne.

$$a = 1 \text{ i } r = 0$$

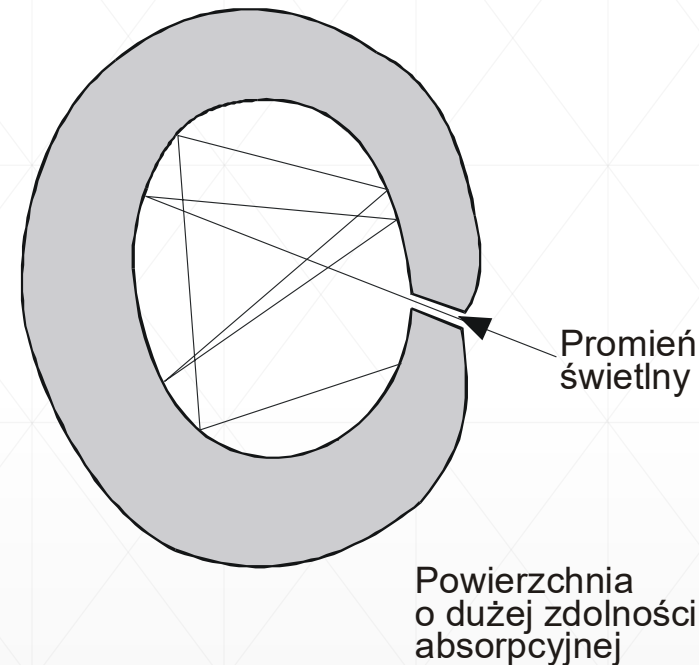
Prawo Kirchhoffa:

Stosunek zdolności emisyjnej do zdolności absorpcyjnej jest dla wszystkich powierzchni jednakowy i równy zdolności emisyjnej c.d.cz.

$$\frac{e(\nu, T)}{a(\nu, T)} = e_{c.d.cz.}(\nu, T) \equiv \varepsilon(\nu, T)$$

Ponieważ zawsze $a \leq 1$, więc i $e(\nu, T) \leq \varepsilon(\nu, T)$, tzn. zdolność emisyjna każdej powierzchni nie jest większa od zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego.

Model c.d.cz.



Prawa promieniowania c.d.cz.

Prawo Stefana-Boltzmann –

całkowita zdolność emisyjna c.d.cz. jest proporcjonalna do 4 potęgi T

$$E = \sigma T^4$$

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
stała Stefana-Boltzmann

Prawo przesunięć Wiena – maksimum zdolności emisyjnej ze wzrostem T przesuwa się w kierunku większych częstości (krótszych długości fali)

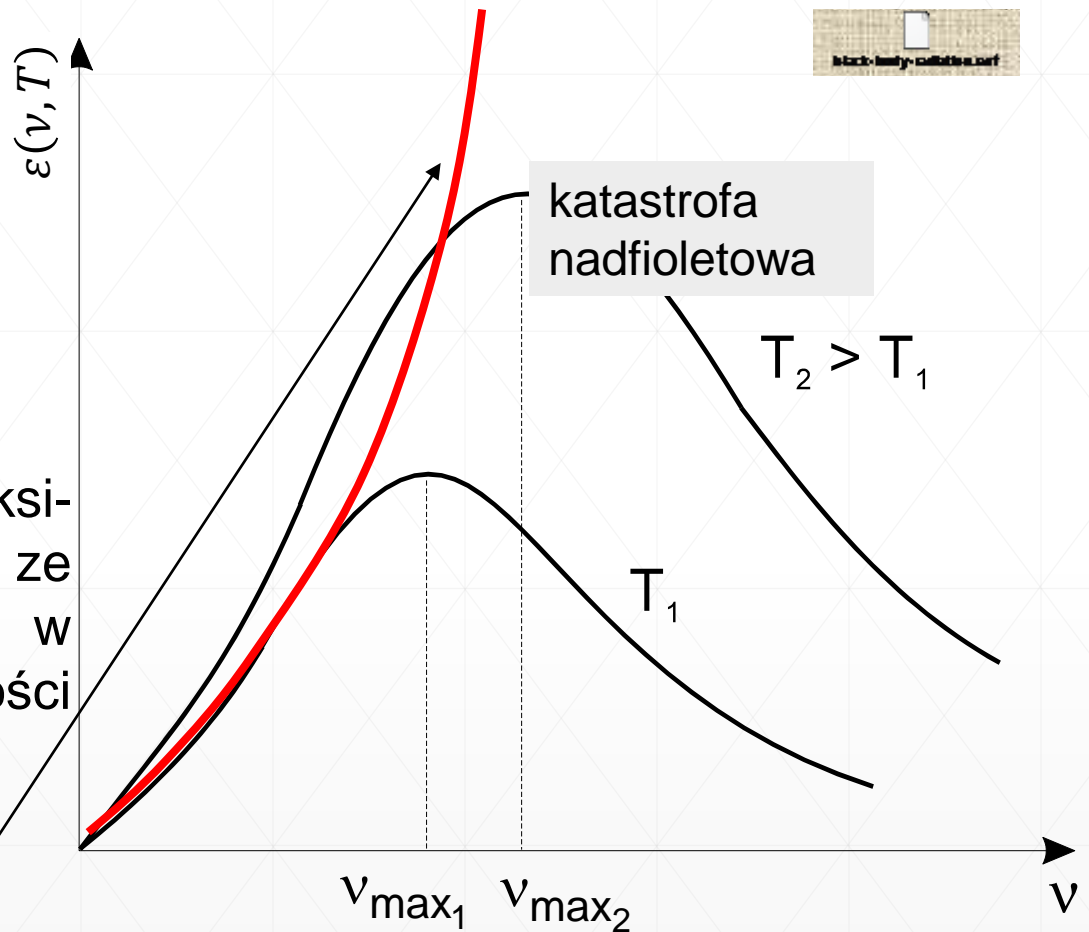
$$\nu_{\max} = b \cdot T$$

$b = 5.877 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}\text{K}^{-1}$ stała Wiena

Prawo Rayleigha-Jeansa – klasyczna zależność zdolności emisyjnej od ν i

T (z tw. klasycznej statystyki o równomierności rozkładu energii na wszystkie stopnie swobody. Założyli, że na każde drganie E-M przypada średnio energia równa dwóm połówkom kT (na energie elektryczną i magnetyczną)

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$



Prawo Plancka

Hipoteza Plancka: elektryczny oscylator harmoniczny stanowiący model elementarnego źródła promieniowania, w procesie emisji promieniowania może tracić energię tylko porcjami, czyli kwantami ΔE , o wartości proporcjonalnej do częstości ν jego drgań własnych.

$$\Delta E = h\nu \quad \text{gdzie stała Plancka } h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

zdolność emisyjna c.d.cz. jest funkcją częstości i temperatury

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

i pozostaje w bardzo dobrej zgodności z doświadczeniem

Wnioski

- Postulat Plancka (energia nie może być wypromieniowana w sposób ciągły), doprowadził do teoretycznego wyjaśnienia promieniowania ciała doskonale czarnego.
- Z prawa Plancka wynika prawo Stefana-Boltzmann'a i prawo przesunięć Wiena:

$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon(\nu, T) d\nu = \sigma T^4 \quad \Bigg| \quad \frac{\partial \varepsilon(\nu, T)}{\partial \nu} = 0 \quad \longrightarrow \quad \nu_{\max} = b \cdot T$$

- Porcje energii promienistej emitowanej przez ciało wynoszące $h\nu$ zostały nazwane kwantami lub **fotonami**.
- Hipoteza Plancka dała początek mechanice kwantowej, a stała h występuje obecnie w wielu równaniach fizyki atomowej, jądrowej i ciała stałego.

Własności fotonu

Foton (kwant światła) jest cząsteczką elementarną, która istnieje tylko w ruchu (nie ma masy spoczynkowej):

- energia fotonu:

$$E = h\nu$$

$$mc^2 = h\nu$$

- masa fotonu (w ruchu):

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

- pęd fotonu:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- spin $s = 0$ – foton jest bozonem,
- w ośrodkach jednorodnych porusza się prostoliniowo,
- w próżni i powietrzu porusza się z prędkością światła,
- może wybić elektron z metalu, ale w tym procesie musi być pochłonięty w całości,

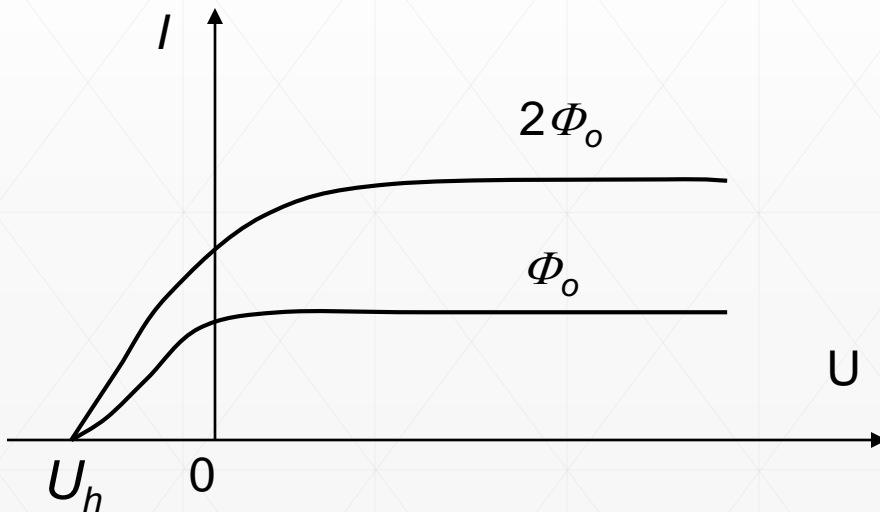
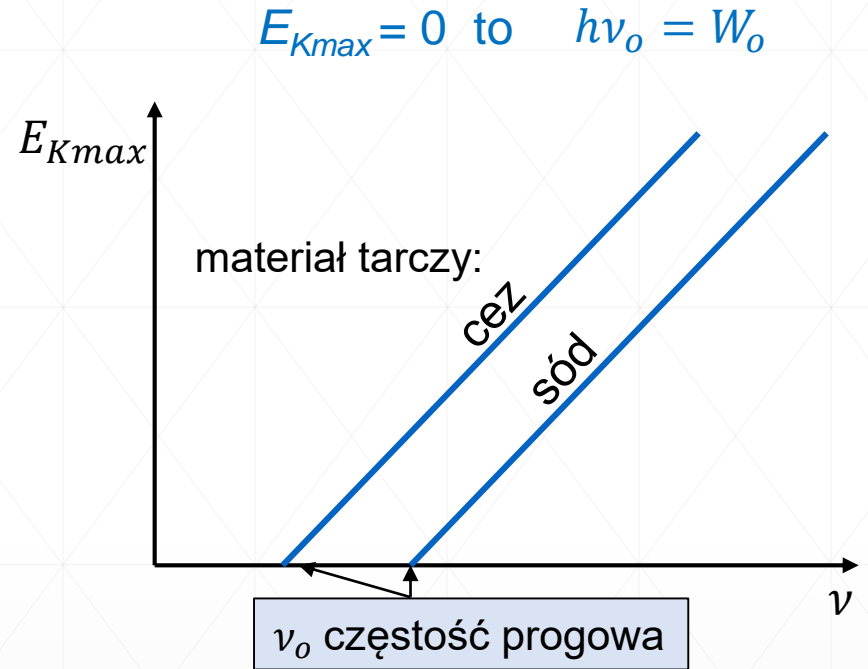
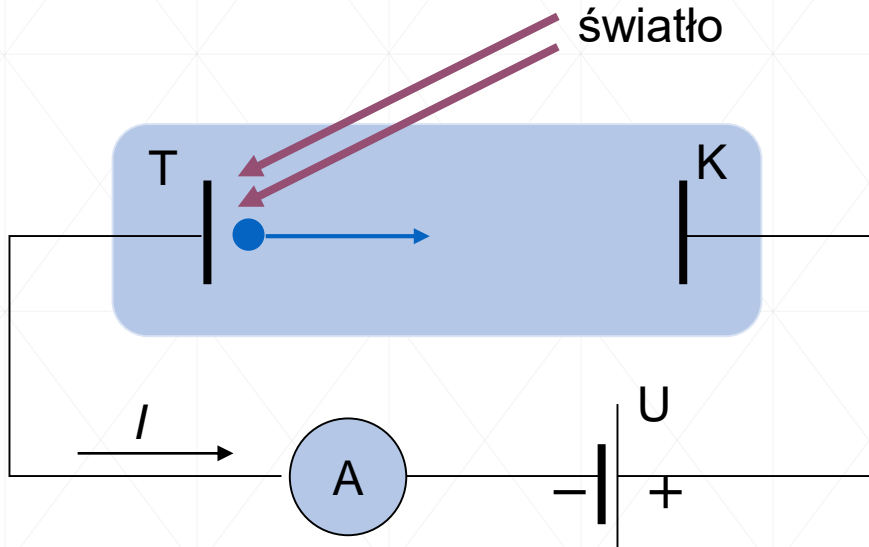
m - masa fotonu; h - stała Plancka; ν - częstotliwość; c - prędkość światła.

Zjawisko fotoelektryczne

Zjawisko fotoelektryczne polega na wybijaniu wiązką światła elektronów z powierzchni metalu;

- światło pada na metalową płytkę i uwalnia z jej elektrony zwane fotoelektronami;
- fotoelektrony można zarejestrować jako prąd elektryczny (fotoprąd) płynący pomiędzy płytką T (tarczą), a elektrodą K (katodą) na skutek przyłożonej różnicy potencjałów;
- pełna nazwa to **zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne**, dla odróżnienia od wewnętrznego, w którym elektrony przenoszone są pomiędzy pasmami energetycznymi;
- **zjawisko fotoelektryczne** znane też jest pod nazwami: **efekt fotoelektryczny** lub **fotoefekt**.

Zjawisko fotoelektryczne



liczba emitowanych elektronów (prąd I) rośnie ze wzrostem natężenia światła Φ_0

maksymalna energia elektronów $E_{Kmax} = U_h$ nie zależy od natężenia światła Φ_0 , natomiast rośnie ze wzrostem częstotliwości światła ν

Zjawisko fotoelektryczne

Wyniki eksperymentalne nie są zgodne z teorią falową światła.

Teoria falowa	Wynik eksperymentalny
elektron nie opuści metalu dopóki amplituda fali E_0 nie przekroczy określonej wartości krytycznej	progowego natężenia nie zaobserwowano
energia emitowanych elektronów wzrasta proporcjonalnie do E_0^2	energia elektronów okazała się niezależna od wielkości E_0
liczba emitowanych elektronów powinna zmniejszyć się ze wzrostem częstotliwość światła	liczba elektronów (prąd) nie zależą od częstotliwości światła
energia elektronów nie powinna zależeć od częstotliwości światła	zauważono zależność energii elektronów od częstotliwości
zjawisko powinno zachodzić przy dowolnej częstotliwości światła	zaobserwowano występowanie częstotliwości progowej

Teoria Einsteina

- Einstein założył, że światło rozchodzi się w przestrzeni nie jak fala, ale jak cząstka, czyli światło stanowi zbiór kwantów, z których każdy posiada energię $h\nu$
- kwanty światła (fotony) zachowują się podobnie do cząstek materialnych (przy zderzeniu foton może być pochłonięty, a cała jego energia przekazana jest elektronowi)
- jeden foton dostarcza energii $h\nu$, która w części (W_0) zostaje zużyta na wyrwanie elektronu z materiału (praca wyjścia). Ewentualny nadmiar energii ($h\nu - W_0$) elektron otrzymuje w postaci energii kinetycznej, przy czym część z niej może być stracona w zderzeniach wewnątrz materiału
- równanie Einsteina $h\nu = W_0 + E_{Kmax}$

Pęd fotonu

Foton, oprócz energii $E=h\nu$, posiada również pęd p . Zgodnie z teorią relatywistyczną wszystkie cząstki które posiadają energię muszą posiadać pęd, nawet jeśli nie mają masy spoczynkowej. Wychodząc z relatywistycznej zależności energii od pędu otrzymujemy:

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2 \quad \xrightarrow{m_0 = 0} \quad E = pc$$

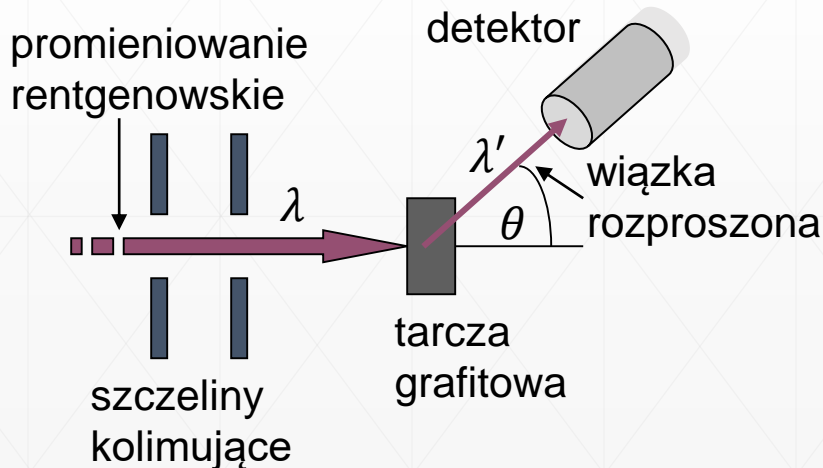
$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{Kierunek pędu fotonu jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali elektromagnetycznej}$$

Foton nie ma ładunku elektrycznego ani momentu magnetycznego, ale może oddziaływać z innymi cząstkami

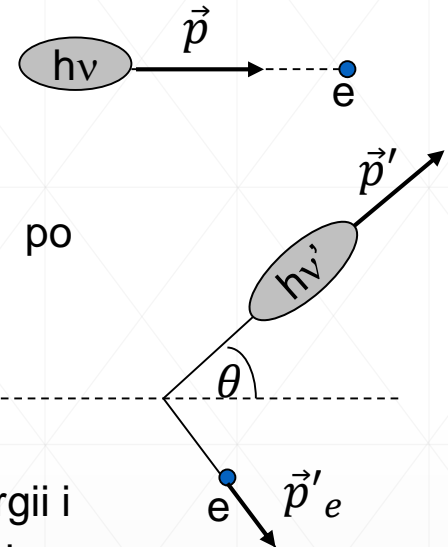
Efekt Comptona

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad E = pc$$

Rozpraszanie fotonów na swobodnych elektronach:
wiązka promieniowania rentgenowskiego o długości fali λ rozpraszana przez grafitową tarczę zmieniała swą długość w zależności od kąta rozpraszania θ .
W klasycznym podejściu długość fali wiązki rozproszonej powinna być taka sama jak padającej.



przed zderzeniem



z prawa zachowania energii i pędu przed i po zderzeniu

$$h\nu = h\nu' + E'_e$$

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

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

Zderzenie fotonu z elektronem

Foton oprócz energii $E = h\nu$
 posiada również pęd $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$
 $E = pc$

z prawa zachowania energii i pędu przed i po zderzeniu (m – masa spoczynkowa)

energia spoczynkowa i całkowita elektronu

$$pc + mc^2 = p'c + E'_e \quad (p - p' + mc)^2 = (E'_e/c)^2$$

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}'_e \quad \vec{p} - \vec{p}' = \vec{p}'_e \quad p^2 - 2\vec{p}\vec{p}' + p'^2 = p'^2_e \quad (-)$$

$$m^2c^2 - 2pp' + 2pmc - 2p'mc + 2pp' \cos \theta = \frac{E'^2_e}{c^2} - p'^2_e$$

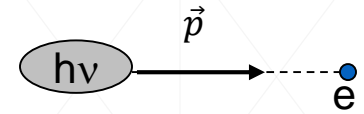
$$E_0^2 = m^2c^4 = E_e'^2 - p_e'^2c^2$$

$$m^2c^2 - 2p'(p + mc - p \cos \theta) + 2pmc = m^2c^2$$

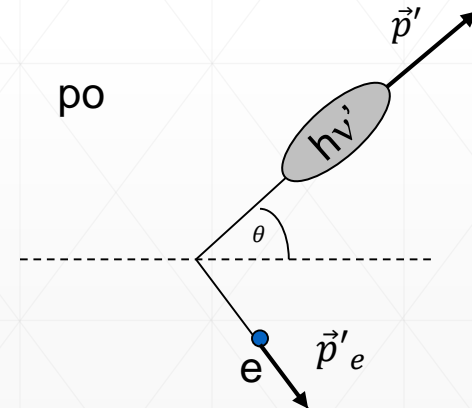
$$p' = \frac{p}{1 + \frac{p}{mc}(1 - \cos \theta)}$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

przed zderzeniem



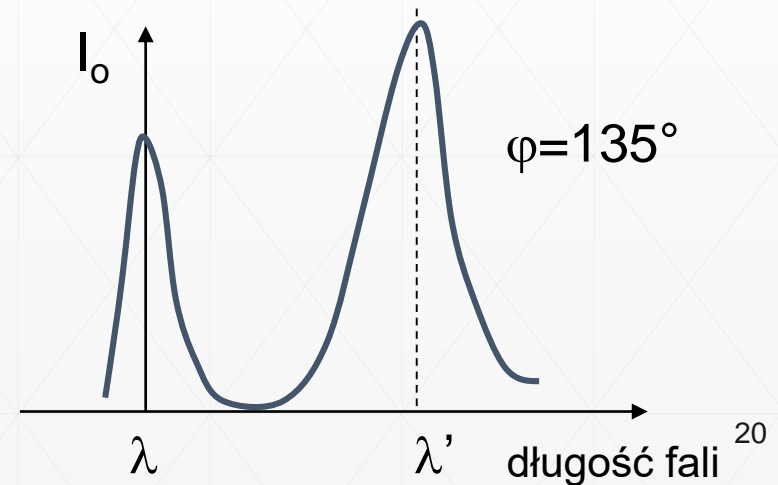
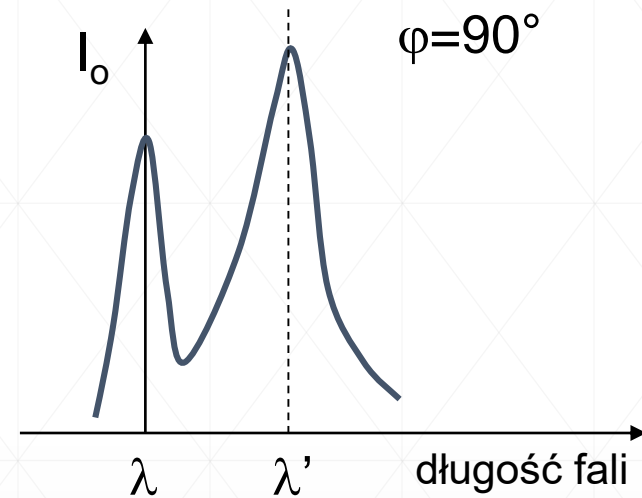
po



Wyniki doświadczenia Comptona

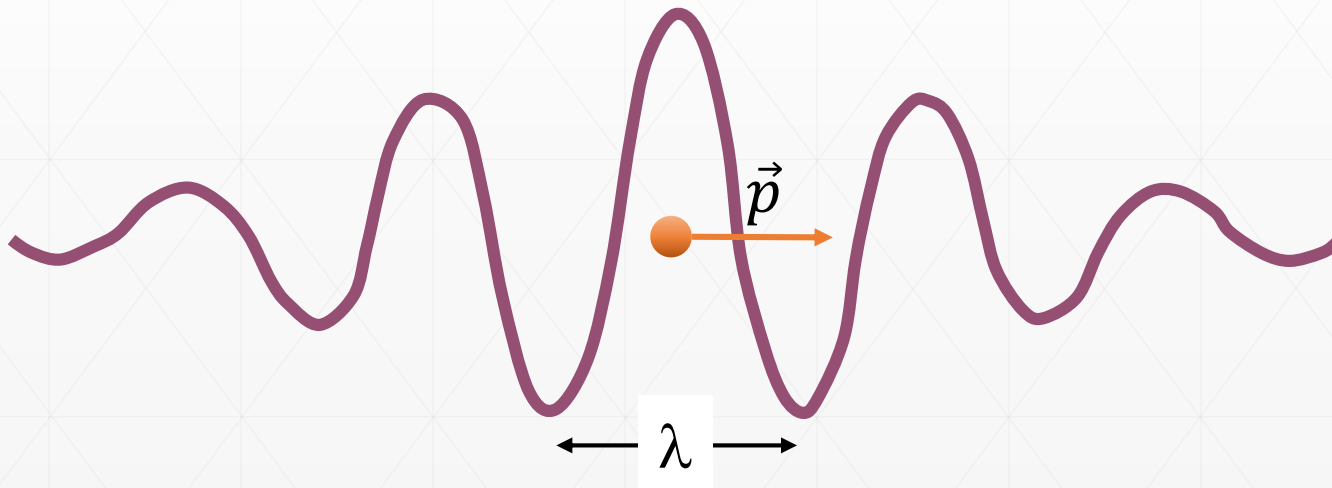
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

- przesunięcie comptonowskie $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ zwiększa się wraz ze wzrostem kąta rozpraszania
- obecność wiązki o nie zmienionej długości fali wynika z rozproszenia na elektronach związanych
- im większa masa cząstki tym mniejsze przesunięcie $\Delta\lambda$
- efekt Comptona potwierdza korpuskularny charakter światła – fotony obdarzone energią i pędem



Jak światło może być jednocześnie falą i cząstką

- opisy światła: falowy i korpuskularny są uzupełniające się
- potrzeba obu tych opisów do pełnego modelu świata, ale do określenia konkretnego zjawiska wystarczy tylko jeden z tych modeli
- dlatego mówimy o dualizmie korpuskularno-falowym światła



Dualizm korpuskularno-falowy

- światło z jednej strony zachowuje się jak fala – ulega dyfrakcji i interferencji;
- jednak wyjaśnienie szeregu zjawisk (promieniowania c.d.cz., zjawiska fotoelektrycznego czy efektu Comptona) wymaga założenia, że światło jest zbiorem cząstek o energii $h\nu$;
- obecny punkt widzenia na naturę światła jest taki, że ma ono dwoisty charakter, tzn. w pewnych warunkach zachowuje się jak fala, a w innych jak cząstka, czyli foton;
- okazało się, że podobnie dwoiste zachowanie wykazują cząstki kwantowe, stąd
- **dualizm korpuskularno-falowy** – to cecha obiektów kwantowych (np. fotonów czy elektronów) polegająca na przejawianiu, w zależności od sytuacji, właściwości **falowych** (dyfrakcja, interferencja) lub **korpuskularnych** (dobrze określona lokalizacja, pęd)

