



**Proszę o uwagę**

# 26. Dualizm korpuskularno-falowy

---

## Korpuskularna natura fal elektromagnetycznych:

- promieniowanie termiczne (ciała doskonale czarne),
  - hipoteza Plancka,
  - zjawisko fotoelektryczne,
  - pojęcie kwantu,
  - efekt Comptona.
1. Co to jest promieniowanie termiczne i jaką rolę pełni w nim model ciała doskonale czarnego.
  2. Trzy klasyczne prawa promieniowania termicznego dla zdolności absorpcyjnej i emisyjnej ciał.
  3. Istota hipotezy Plancka na tle klasycznej teorii pola elektromagnetycznego Rayleigha-Jeansa.
  4. Pojęcie fotonu i jego właściwości – energia, masa, pęd, kierunek propagacji.
  5. Omów zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne w ujęciu klasycznym oraz Alberta Einsteina.
  6. Omów efekt Comptona.
  7. Pojęcie dualizmu korpuskularno-falowego na bazie fotonu oraz elektronu.



# Mechanika kwantowa

- **mechanika kwantowa** to teoria opisująca prawa ruchu obiektów mikroskopowych, o bardzo małych masach i rozmiarach (atom, cząstki elementarne) oraz nietypowe zjawiska makroskopowe (np. nadprzewodnictwo);
- jej granicą dla średnich rozmiarów, energii czy pędów jest mechanika klasyczna;
- mechanika kwantowa jest jednak znacznie bardziej złożona matematycznie i pojęciowo;
- okazuje się, że 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** jako zbioru **fotonów**:

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

# Promieniowanie termiczne

**Promieniowaniem termicznym** (zwanym też ciepłym lub temperaturowym) nazywamy promieniowanie wysyłane w wyniku drgań ładunków elektrycznych przez ciała ogrzane do pewnej temperatury.

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

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

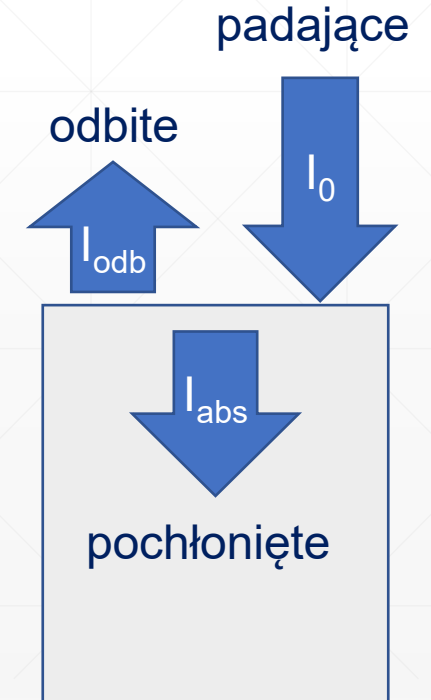
**Zdolność odbicia**  $r(\nu, T)$ , określa jaki ułamek energii padającej zostanie odbity.

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

$$I_{abs} + I_{odb} = I_0$$

$$\frac{I_{abs}}{I_0} + \frac{I_{odb}}{I_0} = 1$$

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



# Ciało doskonale czarne

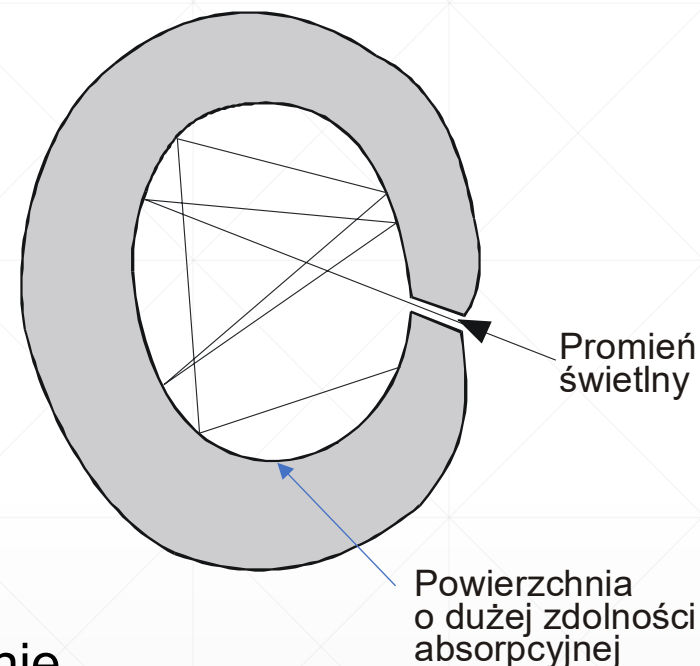
Ponieważ większość ogrzanych ciał oprócz świecenia promieniowaniem termicznym odbija światło pochodzące od innych obiektów wprowadza się wyidealizowany model ciała, które całkowicie pochłania padające nań promieniowanie.

Promieniowanie wpadające przez niewielki otwór po wielokrotnych odbiciach od wewnętrznych ścian zostaje całkowicie pochłonięte.

**Ciało doskonale czarne** (c.d.cz.) całkowicie absorbuje promieniowanie termiczne czyli  $a(\nu, T) = 1$  i  $r(\nu, T) = 0$

Ścianki wewnętrzne c.d.cz. też emitują promieniowanie, które wychodzi na zewnątrz przez otwór. Moc tego promieniowania nazywamy **widmową zdolnością emisyjną c.d.cz.**

Model c.d.cz.

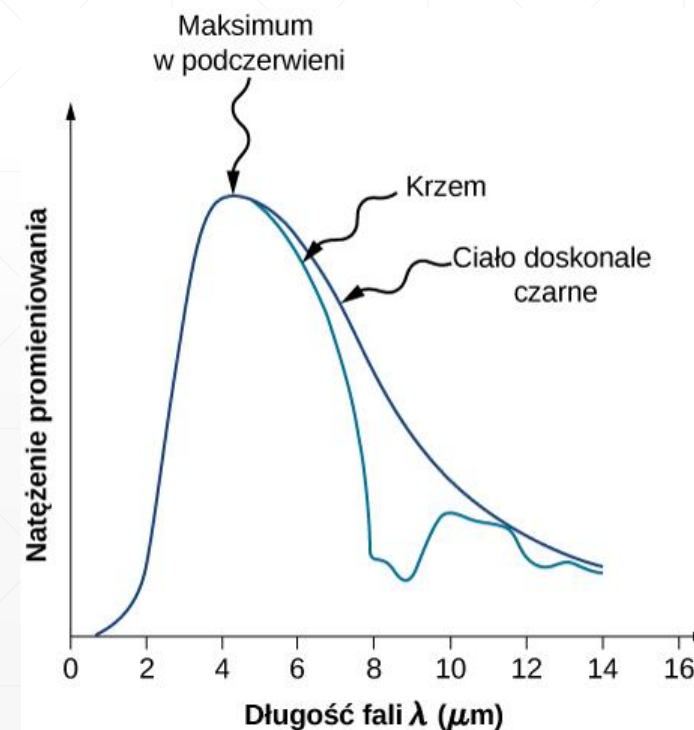


# Zdolność emisyjna

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

Wielkość  $e(\nu, T)$  często wyraża się 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.
- Kształt tego widma prawie nie zależy od rodzaju substancji.
- Widmo silnie zależy od temperatury emitującego ciała.
- Na rys. widmo promieniowania kwarcu i c.d.cz. o temp. 600 K.



# Prawo Kirchhoffa

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

$$\frac{e(\nu, T)}{a(\nu, T)} = \varepsilon(\nu, T)$$

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.

Zdolność emisyjną dowolnego ciała możemy określić znając jego zdolność absorbcją i emisyjność c.d.cz.

$$e(\nu, T) = a(\nu, T) \cdot \varepsilon(\nu, T)$$

Jeżeli zdolność absorbcja nie zależy od częstotliwości i temperatury  $a(\nu, T) = \text{const.}$  to promieniujące ciało nazywamy **szarym**.

# Prawa promieniowania c.d.cz.

Z analizy danych doświadczalnych wynikają dwa podstawowe prawa dotyczące promieniowania c.d.cz.:

**Prawo Stefana-Boltzmann** – całkowita zdolność emisyjna c.d.cz. jest proporcjonalna do 4 potęgi  $T$

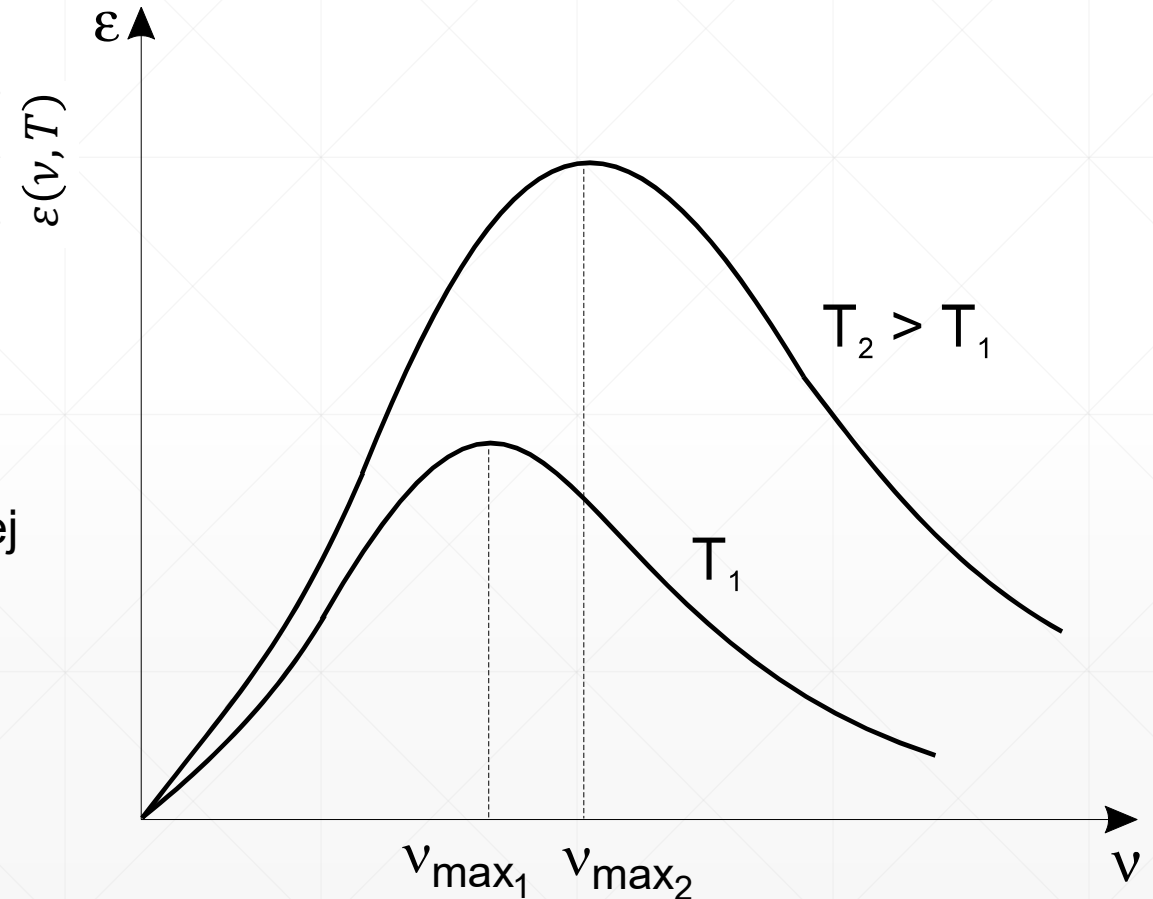
$$E = \sigma T^4$$

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  stała Stefana-Boltzmann

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

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

$b = 5.877 \times 10^{10} \text{ I}/(\text{s K})$  stała Wiena



# Prawa promieniowania c.d.cz.

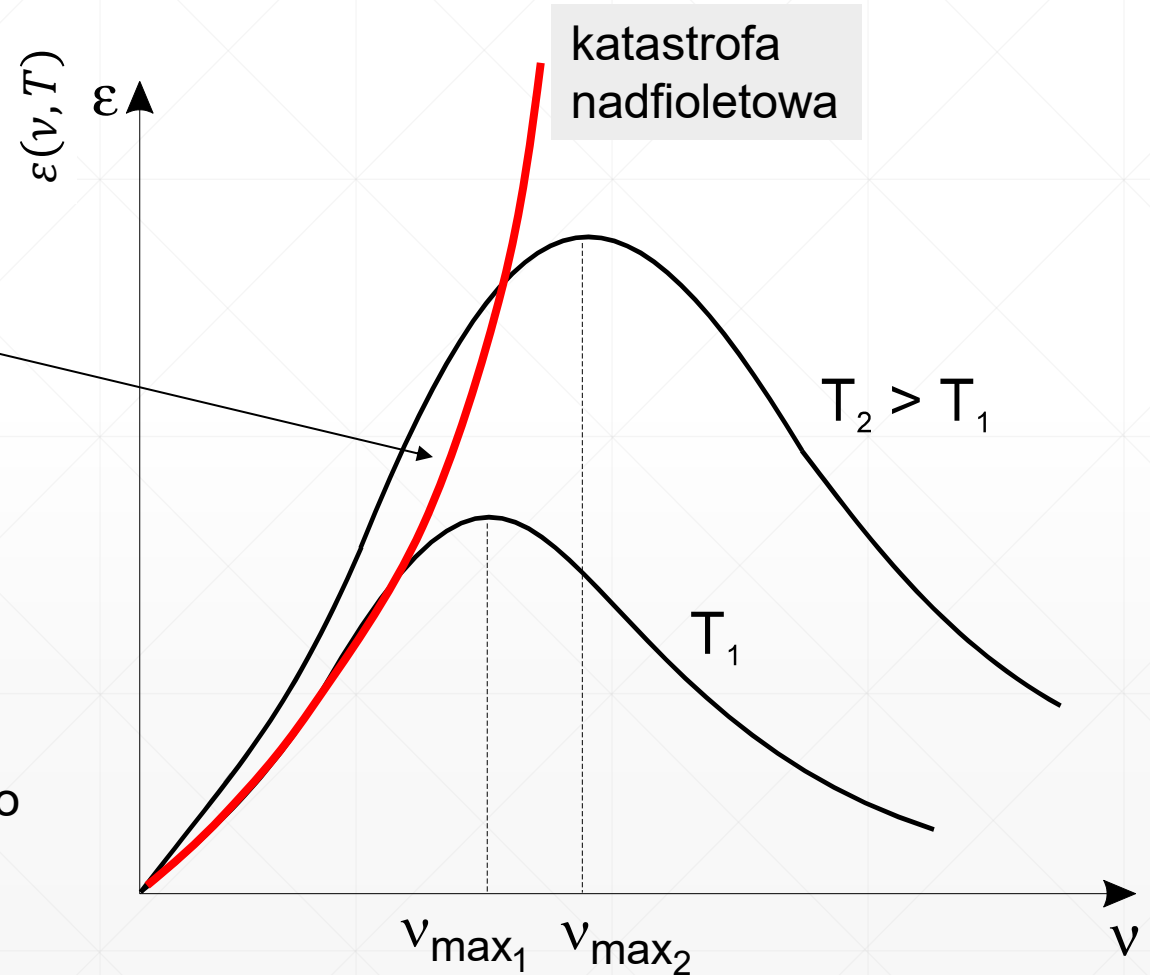
Rayleigh-Jeans zastosowali klasyczną teorię pola elektromagnetycznego do wyznaczenia zdolności emisyjnej c.d.cz. od  $\nu$  i  $T$ .

Otrzymana zależność była zgodna z doświadczeniem tylko dla małych częstotliwości (dużych długości fal)

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

Dla wyższych częstotliwości promieniowania wyniki teoretyczne dążą do nieskończoności – ta rozbieżność pomiędzy doświadczeniem a teorią została nazwana „katastrofą w nadfiolecie”.

Dopiero nowe, kwantowe podejście Plancka rozwiązało ten problem.



# Prawo Plancka

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

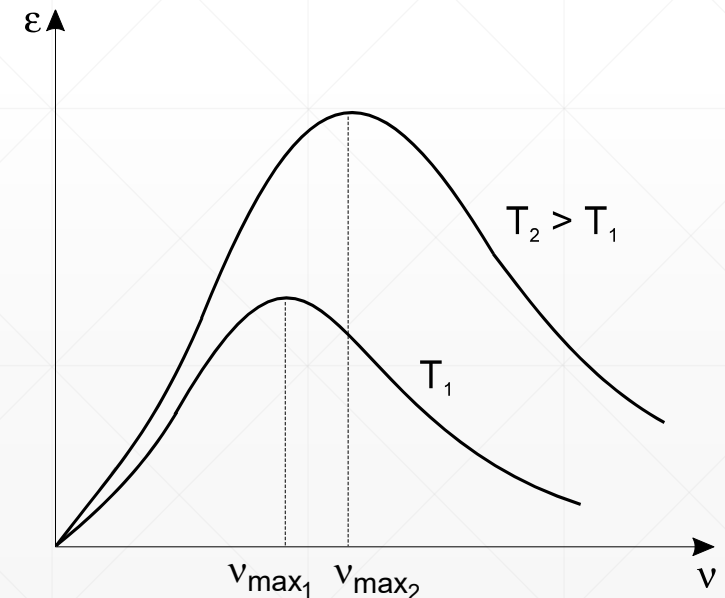
$$\Delta E = h\nu$$

gdzie stała Plancka  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  [J·s]

Zgodnie z hipotezą Plancka zdolność emisyjna c.d.cz. będąca funkcją częstości i temperatury jest wyrażona zależnością:

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

i pozostaje w bardzo dobrej zgodności z doświadczeniem.



# Wnioski

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

- 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:

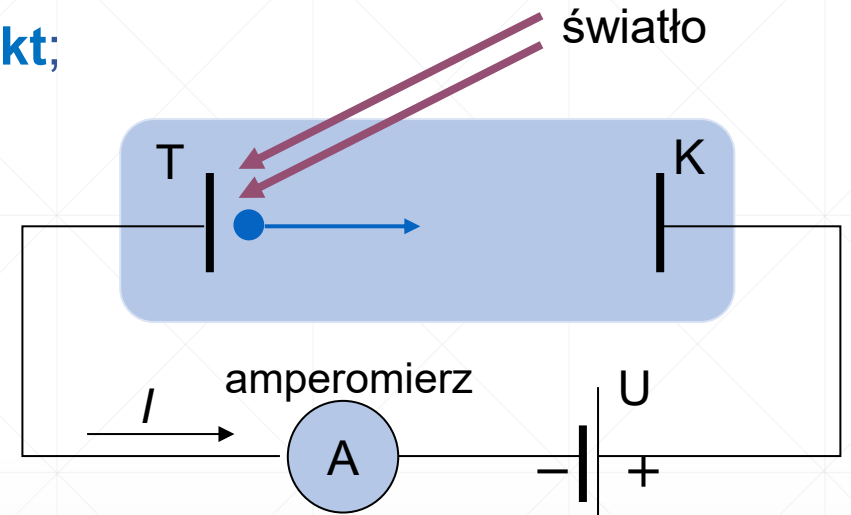
$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon(\nu, T) d\nu = \sigma T^4 \quad \left| \quad \frac{\partial \varepsilon(\nu, T)}{\partial \nu} = 0 \quad \longrightarrow \quad \nu_{\max} = b \cdot T$$

- 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.

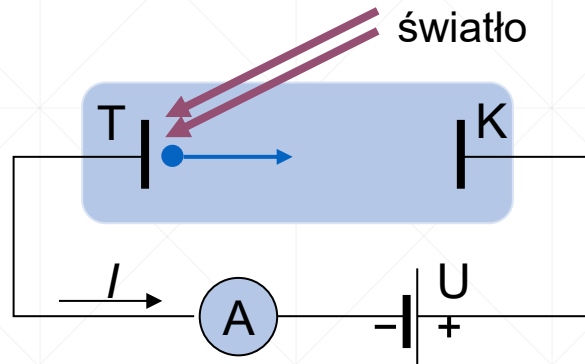


# Zjawisko fotoelektryczne

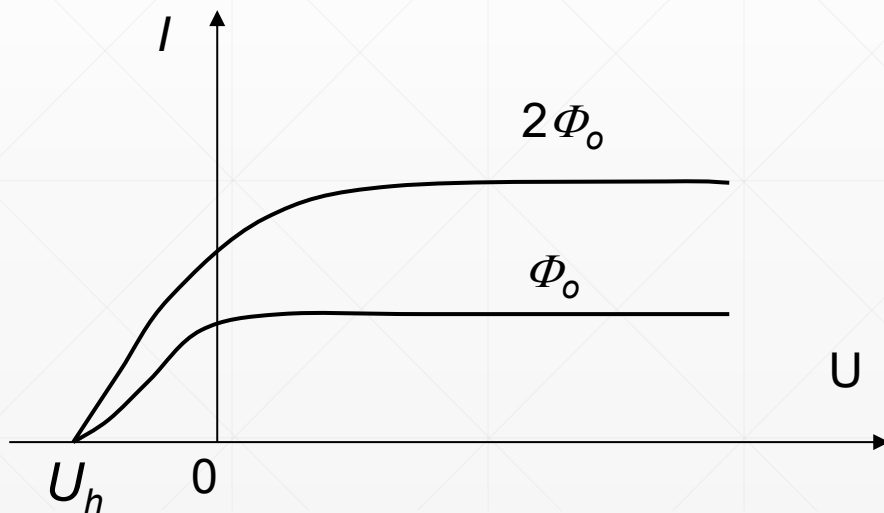
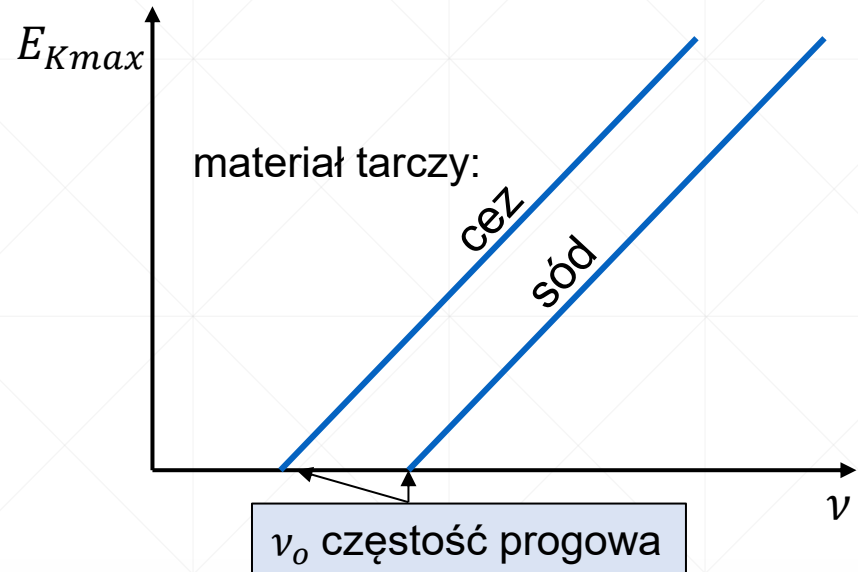
- **Zjawisko fotoelektryczne** polega na wybijaniu wiązką światła elektronów z powierzchni metalu;
- znane też jest pod nazwami: **efekt fotoelektryczny** lub **fotoefekt**;
- układ doświadczalny składa się z: metalowej tarczy **T** (anody) oraz wychwytyjącej elektrony katody **K** umieszczonych w próżniowej rurze aby elektrony nie traciły energii na zderzenia z cząsteczkami powietrza;
- światło pada na metalową płytkę **T** i uwalnia z niej elektrony, które można zarejestrować jako prąd elektryczny  $I$  płynący pomiędzy anodą **T** a katodą **K** na skutek przyłożonej różnicy potencjałów **U**;
- pełna nazwa to **zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne**, dla odróżnienia od wewnętrznego, w którym elektrony przenoszone są pomiędzy pasmami energetycznymi.



# Zjawisko fotoelektryczne



- liczba emitowanych elektronów (prąd  $I$ ) rośnie ze wzrostem natężenia światła  $\Phi_0$ ;
- potencjał hamowania  $U_h$  równy maksymalnej energii elektronów  $E_{Kmax}$  nie zależy od natężenia światła  $\Phi_0$ ;



- maksymalna energia elektronów  $E_{Kmax}$  rośnie liniowo ze wzrostem częstotliwości światła  $\nu$ ;
- nachylenie prostych nie zależy od rodzaju materiału tarczy;
- dla częstotliwości niższej od wartości progowej  $\nu_0$  fotoefekt nie zachodzi.

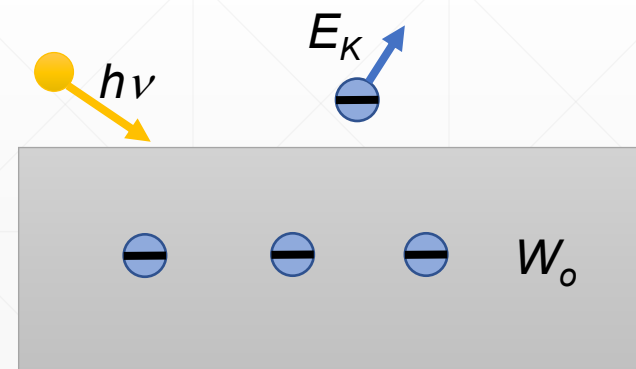
# Zjawisko fotoelektryczne

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 częstotliwości 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

- Wyjaśniając to zjawisko 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 z elektronem foton może zostać pochłonięty, a cała jego energia przekazana elektronowi;
- jeden foton dostarcza energii  $h\nu$ , która w części ( $W_0$ ) zostaje zużyta na wyrwanie elektronu z materiału (tzw. **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  $h\nu = W_0 + E_{Kmax}$  wyraża zasadę zachowania energii;
- każdy foton oddaje całą swoją energię tylko jednemu elektronowi.



# Własności fotonu

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

- energia fotonu:

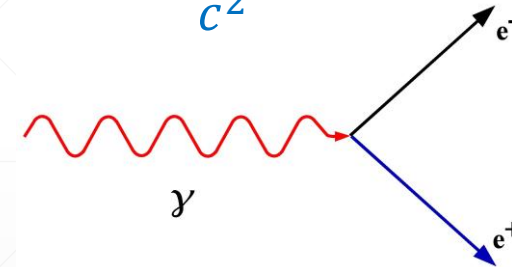
$$E = h\nu$$

- jego energia może być zamieniona na masę:  
(konwersja fotonu w parę elektron-pozyton)

- 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,

$$mc^2 = h\nu$$

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



$h$  - stała Plancka;  $\nu$  - częstotliwość;  $c$  - prędkość światła.

# 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:

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

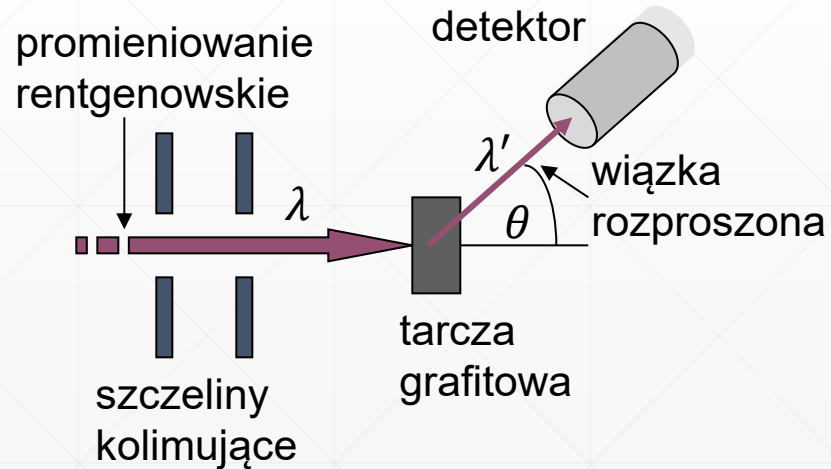
$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

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.

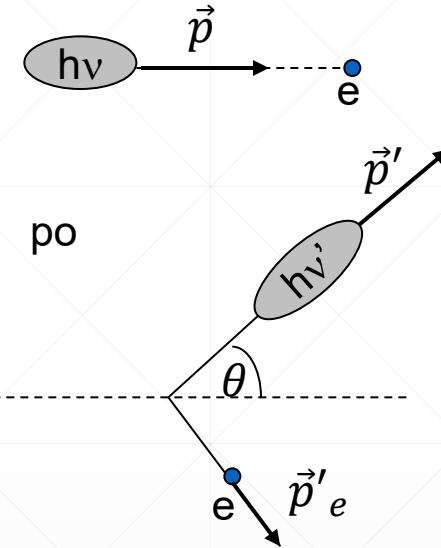
# Efekt Comptona

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



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

przed zderzeniem



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

# 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:

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

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

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

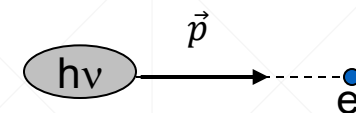
$$E_0^2 = m^2c^4 = E_e'^2 - p^2c^2$$

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

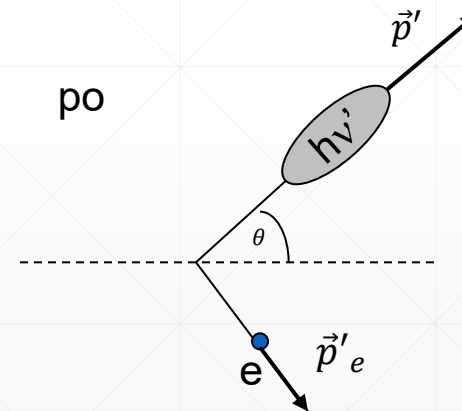
$$p' = \frac{p}{1 + \frac{p}{mc}(1 - \cos \theta)}$$

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

przed zderzeniem



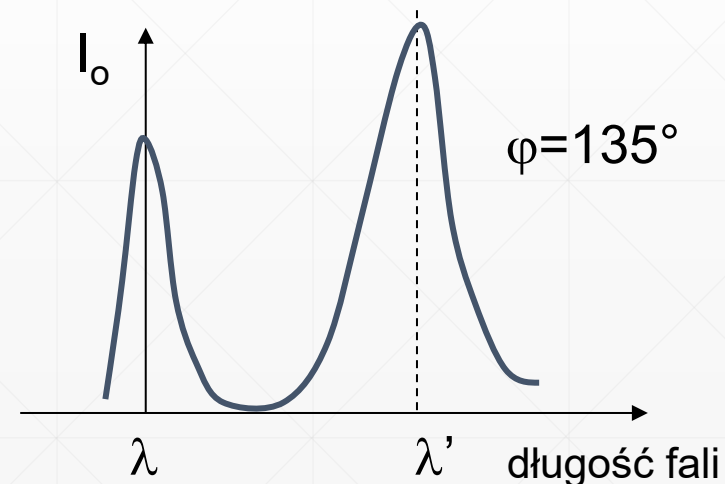
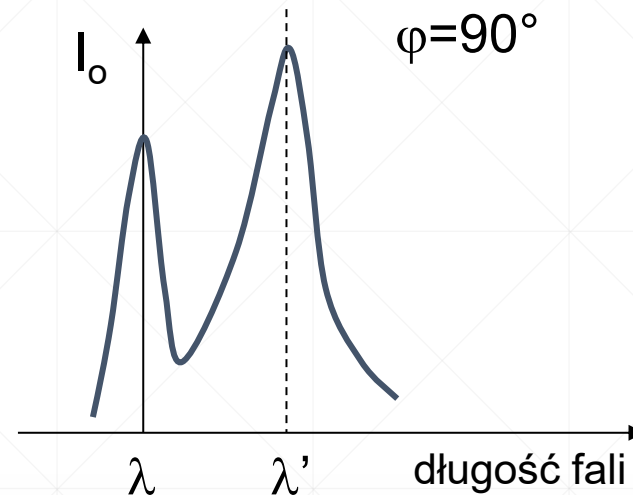
po



# Wyniki doświadczenia Comptona

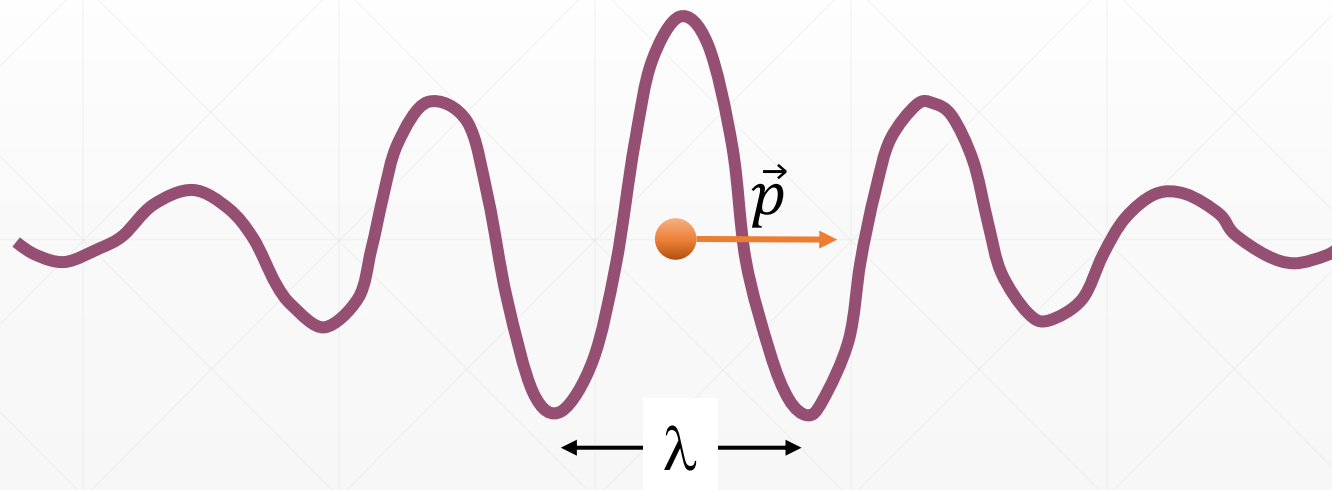
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

- 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).

# Podsumowanie

- **Mechanika kwantowa** – teoria opisująca prawa ruchu obiektów mikroskopowych.
- **Foton** – kwantowy opis światła, cząstka obdarzona energią i pędem.
- **Prawo Plancka** – wyprowadzone przy założeniu kwantowej natury światła prawa promieniowania cieplnego.
- **Efekt fotoelektryczny i efekt Comptona** – świadczą o kwantowym charakterze światła.
- Pojęcie **dualizmu korpuskularno-falowego**.



**Dziękuję za uwagę**