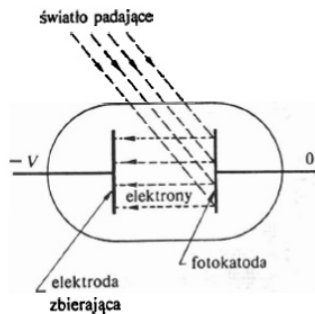


III.
ZJAWISKO FOTOLEKTRYCZNE



Rysunek 1: Schemat eksperymentu Millikana.

1 Fakty doświadczalne

- odkrycie wybijania elektronów z powierzchni metalu, P. Lennard, ~1905
- dokładne ilościowe pomiary zależności pomiędzy częstotliwością światła a energią wybitych elektronów, R. A. Millikan, 1916

Podstawowe fakty doświadczalne

- (1) Światło (z zakresu widzialnego lub nadfioletowego) padające na powierzchnię metalu wybija z niego elektrony.
- (2) Energia kinetyczna emitowanych elektronów **nie zależy od natężenia światła**.
- (3) Energia kinetyczna emitowanych elektronów **zależy od częstotliwości fali świetlnej**. Energia ta **rośnie liniowo z częstotliwością**.
- (4) Istnieje pewna **progowa wartość częstotliwości fali świetlnej**, poniżej której elektrony nie są wybijane z powierzchni metalu.
- (5) **Natężenie powstającego prądu elektronowego jest proporcjonalne do natężenia padającego światła**.

2 Teoria zjawiska fotoelektrycznego

W 1905 roku Albert Einstein podał wyjaśnienie teoretyczne zjawiska fotoelektrycznego.

Podstawowe założenie teorii Einsteina

Monochromatyczna wiązka światła składa się z **fotonów**, czyli **kwantów światła**, z których każdy posiada energię

$$E = h\nu . \quad (1)$$

Foton może przekazywać elektronowi wyłącznie całą energię $E = h\nu$ (nie może przekazać części tej energii).

Elektron (walencyjny) jest związany przez dodatnie jony metalu. Energia wiązania pojedynczego elektronu wynosi W .

Inaczej W nazywamy **pracą wyjścia elektronu z metalu**.

Praca wyjścia jest stałą materiałową, charakteryzującą metal. Nie zależy ona od częstotliwości światła.

Dla pojedynczego procesu wybijania elektronu z metalu przez foton spełniona jest zasada zachowania energii

$$h\nu = W + E_{kin} , \quad (2)$$

gdzie E_{kin} jest energią kinetyczną elektronu wyemitowanego z powierzchni metalu.

Równanie (2) jest tzw. **równaniem Einsteina** dla zjawiska fotoelektrycznego.

Wyjaśnienie obserwowanych faktów doświadczalnych

Foton o energii $h\nu$ jest całkowicie absorbowany na powierzchni metalu, z której emitowany jest elektron o pewnej energii kinetycznej. Zgodnie z równaniem Einsteina (2) energia fotonu jest przekazywana metalowi (na pracę wyjścia) i elektronowi (na jego energię kinetyczną).

Warunkiem emisji elektronu jest spełnienie nierówności

$$h\nu \geq W . \quad (3)$$

Foton o energii mniejszej od wartości progowej W nie może spowodować emisji elektronu.

Z równania Einsteina wynika również proporcjonalność energii kinetycznej emitowanego elektronu do częstotliwości padającego światła

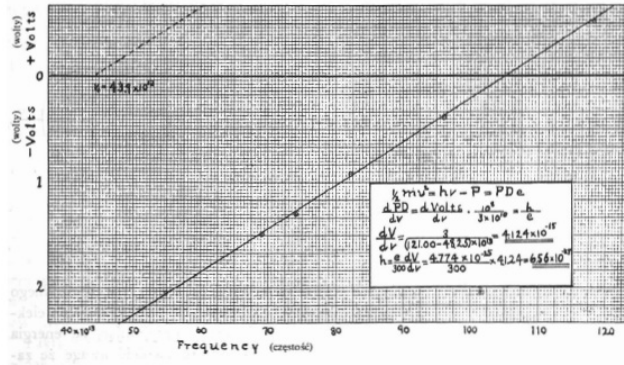
$$E_{kin} \sim \nu . \quad (4)$$

Liczba N_{el} wybijanych z powierzchni metalu elektronów, czyli natężenie I_{pr} mierzonego fotoprądu, jest proporcjonalna do liczby fotonów padających na metal.

(Emisja każdego elektronu wymaga udziału jednego fotonu).

Natężenie światła I_{sw} jest proporcjonalne do liczby fotonów N_{fot} przechodzących przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu. A zatem

$$I_{pr} \sim N_{el} \sim N_{fot} \sim I_{sw} . \quad (5)$$



Rysunek 2: Napięcie graniczne w funkcji częstotliwości (wyniki z pracy Millikana).

Eksperymenty Millikana pozwoliły na dokładne wyznaczenie zależności prądu fotoelektrycznego od napięcia V przyłożonego pomiędzy elektrodami.

Światło pada na fotokatodę i wybija z niej elektrony, które docierają do elektrody zbierającej o ujemnym potencjale $V_{zb} = -V$ względem fotokatody ($V > 0$).

Mierzony jest prąd fotoelektryczny (fotoprąd) w obwodzie zawierającym obie elektrody. Ujemnie naładowana elektroda zbierająca powoduje hamowanie elektronów wyemitowanych z fotokatody. Do elektrody zbierającej docierają tylko te elektrony, których energia kinetyczna jest wystarczająco duża

$$E_{kin} > eV . \quad (6)$$

Uwaga: praca wykonana przez pole elektryczne o napięciu V pomiędzy elektrodami $= eV$, gdzie $e > 0$ jest ładunkiem elementarnym. Ładunek elektronu $q_{el} = -e$.

Dla pewnego napięcia V_{gr} fotoprąd przestaje płynąć. Zgodnie ze wzorem Einsteina

$$V_{gr} = \frac{h\nu}{e} - \frac{W}{e} . \quad (7)$$

Wykres zależności $V_{gr}(\nu)$ jest linią prostą.

Nachylenie wykresu $V_{gr}(\nu)$ jest równe stosunkowi h/e . Na podstawie współrzędnej punktu przecięcia wykresu z osią $V_{gr} = 0$ wyznaczamy stosunek W/e .

3 Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne i wewnętrzne

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na emisji elektronów z powierzchni substancji absorbującej strumień fotonów.

Inaczej zjawisko to nazywamy **fotoemisją**.

Obserwowane jest najczęściej na powierzchniach metali.

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne polega na wzroście przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika lub izolatora pod wpływem zaabsorbowanego światła.

W półprzewodniku wskutek absorpcji fotonu następuje wzbudzenie elektronu z zapełnionego pasma walencyjnego do (na ogół pustego) pasma przewodnictwa.

Następuje wzrost liczby elektronów w pasmie przewodnictwa, co prowadzi do wzrostu przewodnictwa elektrycznego.

Inaczej zjawisko to nazywamy **fotoprzewodnictwem**.

4 Zastosowania

- fotokomórka
- matryca CCD (Charge Coupled Device) (stosowana w cyfrowych aparatach fotograficznych)
- fotorezystor
- fotodiody
- fototranzystory
- ESCA (Electron Spectrometry Chemical Analysis) (analiza składu chemicznego powierzchni)

5 Podsumowanie: kwantowe własności promieniowania

Wyniki doświadczeń (promieniowanie ciała doskonale czarnego, zjawisko fotoelektryczne, a także efekt Comptona) prowadzą do wniosku, że promieniowanie (w tym światło widzialne) posiada **naturę kwantową**.

Przejawia się ona w tym, że procesy rozchodzenia się promieniowania w przestrzeni oraz jego oddziaływania z atomami można opisać za pomocą cząstek (korpusek), zwanych **kwantami światła lub fotonami**.

Promieniowanie jest zbiorem fotonów rozchodzących się w próżni z prędkością

$$c = 2.997925 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \simeq 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} .$$

Foton jest cząstką o następujących własnościach:

posiada on **pęd**

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \quad (8)$$

oraz **energię**

$$E = \hbar \omega . \quad (9)$$

Wektor falowy $\mathbf{k} = k \mathbf{e}_k$, gdzie

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} .$$

\mathbf{e}_k jest wektorem wskazującym kierunek rozchodzenia się promieniowania o długości fali λ .

Częstość

$$\omega = 2\pi\nu ,$$

gdzie ν jest częstotliwością promieniowania.

Związki (8) i (9) są **relacjami de Broglie'a** dla fotonów.

Uwaga: takie same relacje obowiązują dla cząstek obdarzonych niezerową masą spoczynkową, np. dla elektronu.

Ważne pytanie

Jak pogodzić korpuskularne własności promieniowania z falowymi własnościami obserwowanymi, np. w procesach interferencji i dyfrakcji?

Odpowiedź:

\Rightarrow Dualizm falowo-korpuskularny.

Stwierdzenie własności falowych lub korpuskularnych promieniowania **zależy od rodzaju wykonanego doświadczenia**,

np. eksperyment interferencyjny prowadzi do własności falowych, a efekt fotoelektryczny – do własności korpuskularnych.

Jak się niebawem okaże, również cząstki obdarzone niezerową masą spoczynkową wykazują własności falowe lub korpuskularne.