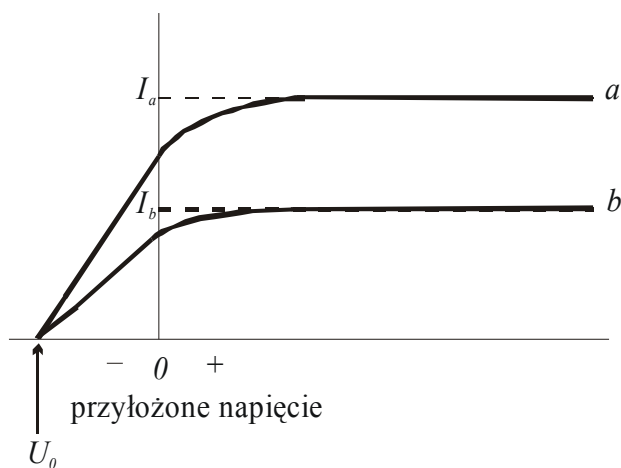


III Zjawisko fotoelektryczne.

Wytwarzanie promieniowania rentgenowskiego.

Zjawisko fotoelektryczne.

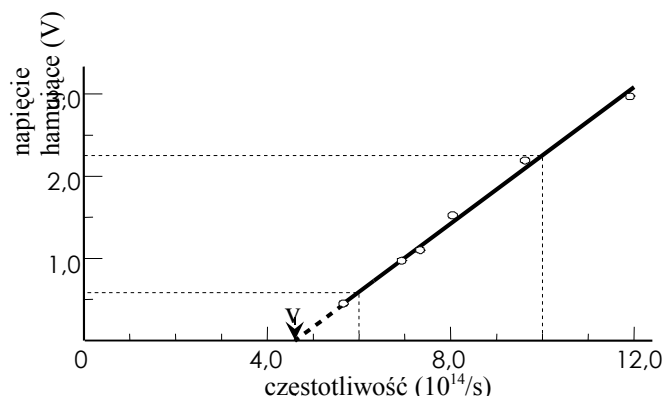
W roku 1886 Hertz odkrył, że wyładowanie elektryczne między dwoma elektrodami zachodzi łatwiej, gdy na jedną z elektrod pada promieniowanie nadfioletowe. Wkrótce potem Lenard wykazał, że dzięki naświetlaniu promieniowaniem nadfioletowym ułatwiane jest zachodzenie wyładowania elektrycznego, ponieważ pod wpływem tego promieniowania następuje emisja elektronów z powierzchni katody. **Zjawisko uwalniania przez światło elektronów z powierzchni rozmaitych substancji nazwane jest zjawiskiem fotoelektrycznym.**



Jeśli wytworzymy pewną różnicę potencjałów pomiędzy płytką A, z której uwalniane są elektrony, a płytką zbierającą B, to zaobserwujemy przepływ prądu. **Gdy U jest dostatecznie duże, wtedy prąd fotoelektryczny osiąga pewną wartość graniczną (prąd nasycenia).** Niektóre z elektronów dochodzą do elektrody B, pomimo że pole elektryczne działa na ich ruch hamująco. **Jednakże gdy różnica potencjałów U jest dostatecznie duża, równa wielkości U_0 zwanej napięciem hamującym, wtedy prąd fotoelektryczny całkowicie zanika.** Różnica potencjałów U_0 pomnożona przez ładunek elektronu jest miarą energii kinetycznej K_{\max} najszybszych uwolnionych elektronów:

$$K_{\max} = eU_0$$

Krzywa b odpowiada dwukrotnie mniejszemu natężeniu światła padającego niż krzywa a. **Napięcie hamujące jest niezależne od natężenia światła, natomiast natężenie prądów nasycenia I_a oraz I_b są wprost proporcjonalne do natężenia światła.**



Na rysunku przedstawiono dla sodu zależność napięcia hamującego od częstotliwości światła padającego. Zauważmy, że **istnieje ściśle określona częstotliwość progowa ν_0 , poniżej której zjawisko fotoelektryczne nie występuje.**

Gdy na metalową płytkę pada fala elektromagnetyczna i powoduje ona wybijanie elektronów, to teoretycznie, jeżeli wzięlibyśmy większe natężenie światła (mamy większe natężenie pola elektromagnetycznego), powinniśmy (zależnie od siły, a niezależnie od częstotliwości) zawsze obserwować efekt fotoelektryczny. A jednak okazuje się, że poniżej pewnej częstotliwości (granicznej) nie potrafimy tego wykryć.

Zjawisko fotoelektryczne ma trzy podstawowe cechy, których nie można wyjaśnić na gruncie klasycznej falowej teorii światła:

1. Z falowej teorii światła wynika, że amplituda oscylującego pola elektrycznego E fali świetlnej wzrasta, gdy wzrasta natężenie wiązki światła. Ponieważ siła działająca na elektron jest równa eE , z zależności tej wynika, że energia kinetyczna fotoelektronów również powinna wzrosnąć, gdy zwiększamy natężenie wiązki światła. Jednakże **K_{\max} jest niezależne od natężenia światła.**
2. Zjawisko fotoelektryczne powinno występować dla każdej częstotliwości światła, pod warunkiem, że natężenie światła jest wystarczająco duże, aby dostarczona została energia konieczna do uwolnienia elektronów. Jednak dla każdej powierzchni istnieje pewna charakterystyczna częstotliwość graniczna ν_0 . **Dla częstotliwości światła mniejszej od ν_0 zjawisko fotoelektryczne nie występuje, niezależnie od tego, jak silne jest oświetlenie powierzchni.**
3. Według teorii klasycznej energia świetlna jest jednorodnie rozłożona na całej powierzchni falowej. Zatem gdy wiązka światła jest dostatecznie słaba, powinno występować mierzalne opóźnienie czasowe pomiędzy chwilą, kiedy światło zaczyna padać na powierzchnię płytki, a momentem uwolnienia z niej elektronu. W tym właśnie czasie elektron powinien absorbować energię z wiązki światła aż do momentu, gdy nagromadzona energia będzie wystarczająca, aby elektron mógł wydobyć się z metalu. **Jednak nigdy nie stwierdzono żadnego mierzalnego opóźnienia czasowego.**

W 1905 r. Einstein zakwestionował słuszność klasycznej teorii światła i zaproponował nową teorię (nagroda Nobla 1921 rok). Założył, że energia jest skwantowana, a mianowicie skoncentrowana w oddzielnych porcjach (kwantach światła), które później nazwane zostały **fotonami**.

Wyniki doświadczeń interferencyjnych i dyfrakcyjnych zdecydowanie wskazują na to, że fotony nie rozchodzą się jak klasyczne cząstki, ale jak klasyczne fale w tym sensie, że obliczenia oparte na propagacji tych fal w sposób poprawny wyjaśniają pomiary dotyczące średniego rozchodzenia się dużej liczby fotonów.

Einstein skupił uwagę na procesach emisji i absorpcji promieniowania i był pierwszym, który zdał sobie sprawę z tego, że w procesach tych dochodzą do głosu korpuskularne własności promieniowania.

Einstein założył, że porcja emitowanej energii jest początkowo zlokalizowana w przestrzeni i że pozostaje ona nadal zlokalizowana, gdy oddala się z prędkością światła od źródła. Założył on dalej, że ilość energii E zawarta w fotonie związana jest z jego częstotliwością następującą zależnością

$$E = h\nu .$$

Einstein założył również, że w zjawisku fotoelektrycznym jeden foton jest całkowicie absorbowany przez jeden elektron.

Gdy elektron emitowany jest z powierzchni metalu, wtedy jego energia kinetyczna wynosi

$$K = h\nu - W ,$$

Gdzie $h\nu$ jest energią zaabsorbowanego fotonu, a W jest pracą potrzebną do uwolnienia elektronu z metalu. Praca ta potrzebna jest do pokonania sił przyciągania pochodzących od atomów z powierzchni płytki oraz na pokrycie strat energii kinetycznej wskutek zderzeń elektronu wewnątrz płytki. W przypadku najsłabiej związanego elektronu i braku strat wewnątrz płytki, wychodzący elektron będzie miał maksymalną energię kinetyczną K_{\max} :

$$K_{\max} = h\nu - W_0$$

gdzie W_0 , **energia charakterystyczna dla danego metalu, zwana pracą wyjścia, jest minimalną energią potrzebną elektronowi na pokonanie sił przyciągania wiążących go wewnątrz metalu, przekroczenie powierzchni i wydobyć się na zewnątrz.**

Rozważmy, w jaki sposób nowa teoria wyjaśnia trzy cechy zjawiska fotoelektrycznego:

1. Brak zależności K_{\max} od natężenia światła. Zwiększanie natężenia światła zwiększa jedynie liczbę fotonów, a więc także prąd elektryczny. Nie zmienia zaś energii $h\nu$ pojedynczych fotonów.
2. Istnienie częstotliwości progowej. Jeśli $K_{\max} = 0$, to $h\nu_0 = W_0$, co zapewnia, że padający foton o częstotliwości ν_0 ma energię wystarczającą na wybite elektronu z metalu. Jeśli częstotliwość zostanie zmniejszona poniżej ν_0 , to pojedyncze fotony (niezależnie od ich liczby, a więc od natężenia światła) nie będą miały energii wystarczającej do uwolnienia elektronu.
3. Brak opóźnienia czasowego emisji elektronów. Zgodnie z tą teorią energia skoncentrowana jest w porcjach, a nie rozłożona na całej powierzchni. Jeśli na płytkę pada

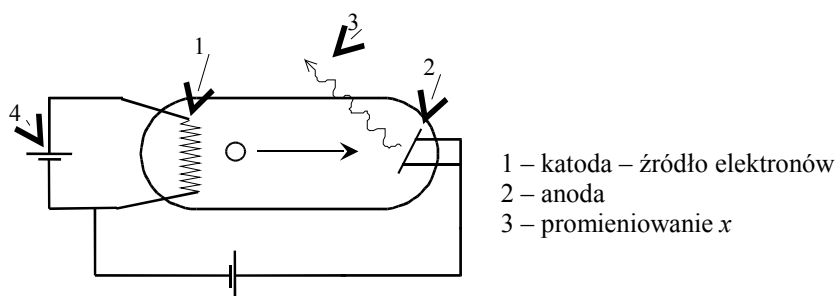
światło nawet o małym natężeniu, to przynajmniej jeden foton zostanie zaabsorbowany przez elektron i uwolni go.

$$K_{\max} = eU_0, \quad K_{\max} = h\nu - W_0 \quad \Rightarrow \quad U_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{W_0}{e}$$

Widzimy, że teoria Einsteina przewiduje **liniową zależność napięcia hamującego U_0 od częstotliwości ν** , co w zupełności zgadza się z wynikami doświadczalnymi.

Promieniowanie rentgenowskie.

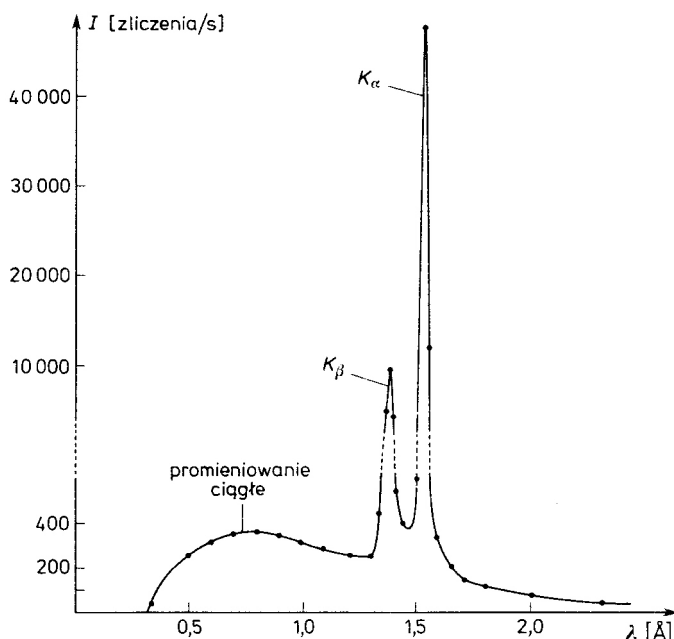
Promieniowanie X, nazwane tak przez ich odkrywcę Röntgena, jest promieniowaniem należącym do tej części widma, której odpowiada długość fali mniejsza od około 0,1 nm. Wykazuje ono typowe dla fal poprzecznych zjawiska polaryzacji, interferencji i dyfrakcji, znane już dla światła i innego promieniowania elektromagnetycznego. Promieniowanie X wytwarzane jest w lampie rentgenowskiej.



Podgrzana katoda jest źródłem elektronów, które następnie są przyspieszane napięciem przyspieszającym, osiągając duże energie. W bańce jest próżnia, by elektrony nie rozpraszają się na cząsteczkach powietrza. Rozpędzone elektrony padają na anodę i zostają w niej wyhamowane, a każdy ładunek, który ulega przyspieszeniu emituje fale elektromagnetyczne. Więc jeśli elektrony miały duże prędkości (co uzyskuje się przez przyłożenie różnicy potencjałów rzędu kilku tysięcy woltów), a proces hamowania był szybki, to uzyskuje się silne promieniowanie elektromagnetyczne.

Jest to najprostsza lampa rentgenowska i nie uwzględniono tu chłodzenia anody, co w warunkach doświadczalnych jest konieczne. Najczęściej chłodzi się przepływającą wodą, ale także robi się tzw. wirujące anody: anoda jest w kształcie tarczy, która wiruje po to, by elektrony uderzały za każdym razem w inne miejsce.

Zgodnie z prawami fizyki klasycznej w wyniku hamowania elektronów w materiale tarczy, aż do ich całkowitego zatrzymania, następuje emisja promieniowania elektromagnetycznego o widmie ciągłym.



Jednak może się zdarzyć, że elektron uderzając w anodę nie tylko zostanie wyhamowany, ale może wybić elektron z atomu anody. Zostanie dziura, którą wypełni elektron spadający z wyższych powłok, z czym związane jest promieniowanie charakterystyczne dla danego pierwiastka. Dlatego ostatecznie wykres przedstawia widmo ciągłe promieniowania X z ostrymi pikami promieniowania charakterystycznego.

Najbardziej charakterystyczną cechą krzywych rozkładu widmowego jest **istnienie dla danej wartości energii elektronów dobrze określonej minimalnej długości fali λ_{\min} , zwanej krótkofalową granicą promieniowania**. Chociaż kształt krzywej rozkładu dla widma ciągłego promieniowania rentgenowskiego zależy nieznacznie od wyboru materiału tarczy, jak również od napięcia U przyspieszającego elektrony, to wartość λ_{\min} zależy jedynie od U i jest taka sama dla wszystkich materiałów, z jakich wykonane są tarcze. Tego faktu klasyczna teoria elektromagnetyzmu nie jest w stanie wyjaśnić. W świetle tej teorii nie istnieją żadne powody, aby z tarczy nie mogły być wysyłane fale o długości mniejszej od jakiejś wartości krytycznej.

Natomiast jeśli promieniowanie rentgenowskie traktujemy jako strumień fotonów, to wyjaśnienie obserwowanych faktów jest proste. Elektron o początkowej energii kinetycznej K , w wyniku oddziaływania z ciężkim jądrem atomu tarczy jest hamowany i energia, którą wówczas traci pojawia się w formie kwantów – fotonów promieniowania rentgenowskiego. Elektrony oddziałują z naładowanym jądrem atomu za pośrednictwem pola kulombowskiego. W procesie tym elektron przekazuje jądro pewien pęd. Towarzyszące temu hamowanie ruchu elektronu prowadzi do emisji fotonu. Ponieważ jądra tarczy są bardzo ciężkie, więc energię, jaką uzyskują one podczas zderzenia, można zaniedbać. **Energia powstającego fotonu wyraża się wzorem**

$$h\nu = K - K',$$

gdzie K jest energią kinetyczną elektronu przed zderzeniem, a K' po zderzeniu.

Foton o najmniejszej długości fali będzie emitowany wtedy, gdy elektron straci całą swoją energię kinetyczną w jednym procesie zderzenia hamującego jego ruch. Ponieważ K

równe jest eU , czyli energii, jaką nabywa elektron w wyniku przyspieszania go za pomocą różnicy potencjałów U przyłożonej w lampie rentgenowskiej, więc zachodzi relacja

$$eU = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

czyli

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

Tak więc minimalna długość fali występująca w widmie ciągłym, czyli krótkofalowa granica widma, odpowiada zamianie całej energii kinetycznej elektronów na promieniowanie rentgenowskie.

Promieniowanie rentgenowskie o widmie ciągłym nazywane jest promieniowaniem hamowania. Powstaje ono nie tylko w lampach rentgenowskich, lecz zawsze wtedy, gdy szybkie elektrony zderzają się z materią.

Zjawisko powstawania promieniowania hamowania można uważać za proces odwrotny do zjawiska fotoelektrycznego. W zjawisku fotoelektrycznym foton jest absorbowany i jego energia i pęd przekazywane są elektronowi i jądro odrzutu. W procesie wytwarzania promieniowania hamowania powstaje foton, którego pęd i energia pochodzi od zderzających się ze sobą elektronu i jądra. W procesie tym mamy do czynienia z kreacją fotonów, a nie z ich absorpcją lub rozpraszaniem przez materię.