

Kwanty światła, efekt fotoelektryczny i rozpowszechnienie fotonów.

Janusz SKALSKI

¹ Annalen der Physik 17, 132 (1905).

W marcu 1905 r. A. Einstein wysłał do publikacji pracę¹, którą jako jedyną w swym dorobku uznał za „bardzo rewolucyjną”. Zawierała taką oto ideę:

...energia promienia światła ze źródła punktowego nie rozkłada się w sposób ciągły w powiększającej się objętości, ale składa się ze skończonej liczby kwantów energii, które są zlokalizowane w punktach przestrzeni, poruszają się bez podziału i mogą być wytwarzane lub pochłaniane tylko jako całości.

Natchnieniem Einsteina był o pięć lat wcześniejszy pomysł M. Plancka. Aby wytłumaczyć obserwowany rozkład natężeń promieniowania elektromagnetycznego (EM) wysyłanego w poszczególnych zakresach częstotliwości przez ciała o stałej temperaturze, Planck musiał przyjąć niezwykle założenie: materia pochłania i wysyła promieniowanie o częstotliwości ν tylko w porcjach – kwantach – o wielkości $h\nu$, gdzie h , o wymiarze [energia \times czas], jest stałą uniwersalną (stała Plancka). Jej doświadczalnie wyznaczona w 1900 r. wartość wyniosła:

$$h \approx 6,55 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Jako pretekst do wysunięcia śmiałej hipotezy posłużył Einsteinowi wyprowadzony przez niego przybliżony wzór na entropię promieniowania krótkofalowego. Po stwierdzeniu jego podobieństwa do wzoru dla gazu doskonałego sformułował rewolucyjną sugestię:

Monochromatyczne promieniowanie małej gęstości² [...] zachowuje się pod względem termodynamicznym tak, jakby składało się z wzajemnie niezależnych kwantów energii o wielkości $h\nu$. [...] ..sugeruje to zbadanie, czy procesy wysyłania i transformacji światła nie przebiegają tak, jakby światło miało się składać z kwantów energii tego rodzaju.

Następnie, posługując się tymi wyobrażeniami, przewidział prostą zależność energii elektronów wybijanych z metalu od częstotliwości padającego światła dla zjawiska fotoelektrycznego.

Zjawisko to odkrył H. Hertz (1887 r.) w trakcie badań nad wyładowaniami iskrowymi między dwiema powierzchniami metalowymi. Zauważył, że pierwotna iskra z jednej powierzchni wytwarza wtórną iskrę na drugiej. W serii pomysłowych doświadczeń udowodnił, że wtórna iskra powodowana jest przez światło pierwszej. W. Hallwachs pokazał (1888 r.), że oczyszczona, izolowana płytka cynkowa wystawiona na promieniowanie ultrafioletowe ładuje się dodatnio, a płytka naładowana ujemnie traci ładunek, nawet jeśli jest umieszczona w próżni. J.J. Thomson stwierdził, że fotoefekt polega na emisji elektronów: zmierzył stosunek (ładunek/masa) dla emitowanych cząstek (1897 r.), a następnie oddzielnie wyznaczył ich ładunek (1899 r.). J. Elster i H.F. Geitel stwierdzili w 1900 r., że prąd fotoelektryczny jest proporcjonalny do natężenia światła i powstaje natychmiast po oświetleniu metalu. Kluczowego i niespodziewanego odkrycia dokonał w 1902 r. P. Lenard, używając jako źródła światła łukowej lampy węglowej, której intensywność mógł zmieniać tysiąckrotnie. Okazało się, że energia wybijanych elektronów w ogóle nie zależy od natężenia światła, rośnie natomiast wraz z jego częstotliwością. Charakter tego wzrostu nie był znany w 1905 r, gdy Einstein opublikował swą hipotezę.

Zaproponował następujące wytłumaczenie fotoefektu: jeden kwant światła, zupełnie niezależnie od pozostałych, przekazuje całą swoją energię elektronowi. Elektron wyrzucony z metalu traci pewną jej część zanim dotrze do powierzchni.

Jeśli E_{max} oznacza energię wyrzuczonego elektronu dla przypadku, gdy ta strata wynosi zero, to:

$$(1) \quad E_{max} = h\nu - P,$$

gdzie $P = h\nu_0$ jest tzw. pracą wyjścia – charakterystyczną dla metalu minimalną energią, która pozwala elektronowi opuścić jego powierzchnię, a ν_0 – częstotliwością, poniżej której nie ma emisji elektronów. Zatem minimalna różnica potencjałów, powstrzymująca fotoprąd między oświetlonym metalem a innym uziemionym przewodnikiem, wynosi:

$$V = E_{max}/e = (h/e)(\nu - \nu_0).$$

Pomysł kwantów światła fizycy potraktowali jak naciąganą spekulację, którą był w istocie. Jego porównanie z hipotezą Plancka pokazuje dlaczego. Planck skwantował energie promieniujących oscylatorów – krok śmiały, ale dopuszczalny wobec braku danych o strukturze materii i jej oddziaływaniu z promieniowaniem. Dzięki temu opisał dotychczas niezrozumiałe dane doświadczalne. Tymczasem Einstein kwantował samo promieniowanie, czym zaprzeczał teorii Maxwella, i to w chwili, gdy odniosła ona ogromne sukcesy tłumacząc falową naturę światła. Co więcej, w 1905 r. żadne dane *nie wymagały* hipotezy kwantów światła. Ówczesne poglądy dobrze oddaje fragment opinii o Einsteinie w związku z jego kandydaturą do Pruskiej Akademii Nauk w 1913 r.³:

...To, że czasami chybiał w swych spekulacjach, jak np. w hipotezie kwantów światła, nie może być traktowane jako zbyt wielki zarzut, bo niemożliwym jest wprowadzanie nowych idei w nawet najściślejszych naukach bez podejmowania ryzyka.

Natomiast sam wzór (1) szybko wzbudził zainteresowanie jako nowe, niespodziewane i proste przewidywanie dotyczące znanego zjawiska: maksymalna energia fotoelektronów powinna zależeć liniowo od częstotliwości światła, a nachylenie prostej $E_{max}(\nu)$ powinno być, niezależnie od oświetlanego metalu, równe liczbowo znanej stałej Plancka.

Doświadczalny test prostej zależności nie okazał się wcale prosty. Potwierdzenie zależności liniowej wymagało dostatecznie szerokiego zakresu częstotliwości – praktycznie ograniczało to wybór do metali alkalicznych (są fotoczułe dla $\lambda < c/\nu_0 \approx 0,6 \mu\text{m}$). Dokładne wyznaczenie potencjału V hamującego fotoelektrony polegało na ekstrapolacji zmierzonej zależności natężenia fotoprądu od napięcia do natężenia zerowego. Tymczasem fotoprąd potrafił zmieniać się stukrotnie pod wpływem zmian na powierzchni metalu. Inne możliwe błędy wiązały się z rozproszonym światłem o częstotliwości wyższej od używanych linii widmowych rtęci, kontaktową siłą elektromotoryczną między tarczą a metalem drugiej elektrody, wreszcie z fotoprądem z drugiej elektrody, powstającym od światła odbitego. Poświęcając kilka lat pracy, wszystkie te trudności pokonał R. Millikan. W 1916 r. opublikował swoje bardzo dokładne rezultaty, które potwierdziły wzór Einsteina. Błąd wyznaczonej fotoelektrycznie wartości $h = 6,57 \times 10^{-27}$ oceniał na 0,5 %.

Mimo tego, większość fizyków nadal wątpiła w realność kwantów światła. Trwało to do 1923 r., gdy A. Compton przeprowadził eksperyment, w którym rozpraszał na graficie promienie X z molibdenowej antykotydy. Zmierzone różnice końcowej i początkowej długości fali X zgadzały się ze wzorem, wynikającym z potraktowania ich jak cząstek o energii $h\nu$ i pędzie $h\nu/c$:

$$\Delta\lambda = (h/mc)(1 - \cos\theta)$$

(m – masa elektronu, θ – kąt rozproszenia). W 1925 r. A. Compton i A.W. Simon obserwowali odrzut elektronów w komorze mgłowej i znaleźli bezpośrednie potwierdzenie zachowania pędu w zderzeniu X -elektron. Gdy w 1926 r. powstała nazwa „foton”⁴, wbrew swemu pierwotnemu, dość mętnemu znaczeniu, błyskawicznie przyjęła się jako określenie kwantu światła, którego istnienie wydawało się ustalone przez efekt Comptona.

³ Autorzy: M. Planck, H.W. Nernst, H. Rubens i E. Warburg.

⁴ G.N. Lewis, Nature 118, 874 (1926).

Tymczasem w latach 1925–27 powstała mechanika kwantowa. Fizyka musiała pogodzić się z tym, że nie umie przewidzieć wyniku eksperymentu z elektronami i światłem – umie jedynie wyznaczać *prawdopodobieństwa wszystkich możliwych* wyników. Stan elektronu charakteryzuje amplituda prawdopodobieństwa, będąca funkcją położenia i czasu. Ma ona własności ograniczonego przestrzennie impulsu falowego, a więc ani położenie, ani pęd elektronu nie są określone dokładnie, lecz wykazują fluktuacje kwantowe⁵. Gdy elektron o początkowej energii E_p znajduje się w zmiennym polu elektrycznym o częstotliwości ν , to po kilku okresach drgań pola pojawia się nowa składowa amplitudy elektronu. Jest ona proporcjonalna do amplitudy pola \mathcal{E} i odpowiada energii $E_k = E_p + h\nu$. Oznacza to, że niemal natychmiast po oświetleniu, elektron może zwiększyć swą energię o $h\nu$, z prawdopodobieństwem na jednostkę czasu proporcjonalnym do \mathcal{E}^2 , tzn. do natężenia światła. Równanie Einsteina (1) wynika więc z kwantowej natury elektronów przy ich oddziaływaniu z *klasycznym* promieniowaniem. Także inne cechy fotoefektu, jak kierunek fotoprądu, otrzymano bez hipotezy Einsteina (G. Wentzel, 1927 r.). W tym samym roku E. Schrödinger opisał efekt Comptona, używając amplitud elektronu i klasycznych płaskich fal EM.

Fotony nabrały konkretnego sensu w 1927 r., gdy P.A.M. Dirac przedstawił kwantową teorię promieniowania. Po ok. 20 latach usuwania z niej sprzeczności stała się ona, jako elektrodynamika kwantowa, podstawową teorią oddziaływań EM. Fotony rozpowszechniły się na stronach monografii naukowych i podręczników szkolnych. Czy pomagają zrozumieć fizykę promieniowania?

Większość zjawisk elektrooptycznych, poza zjawiskiem fotoelektrycznym także emisja wymuszona (maser, laser), fluorescencja rezonansowa itd., daje się pojąć traktując materię kwantowo, a pole EM klasycznie. Obraz punktowego kwantu światła może nawet utrudniać zrozumienie klasycznych zjawisk interferencji i dyfrakcji, które najłatwiej tłumaczyć się przez klasyczne stany pola, opisywane równaniami Maxwella.

Jednak według teorii kwantowej, amplitudy pola elektrycznego \mathcal{E} i magnetycznego \mathcal{B} monochromatycznej fali EM nie są dokładnie określone, ale, podobnie jak położenie i pęd cząstki, wykazują fluktuacje kwantowe $\Delta\mathcal{E}$ i $\Delta\mathcal{B}$. W „klasycznych” stanach pola EM, zawierających nieokreśloną liczbę fotonów, ta nieoznaczoność jest mała w porównaniu do średnich wartości \mathcal{E} i \mathcal{B} . Kwantowa natura promieniowania uwydatnia się tam, gdzie fluktuacje pola EM dominują wobec zerowania się średnich \mathcal{E} i \mathcal{B} . Przykładem są stany fotonowe, w których światło jest spontanicznie emitowane przez wzbudzone atomy i jądra atomowe. Przy emisji spontanicznej obserwuje się odrzut atomu (jądra) równoważący pęd fotonu $h\nu$, sprzeczny z teorią Maxwella. Fluktuacje pola elektrycznego $\Delta\mathcal{E}$ występują nawet w stanie bez żadnych fotonów. Powodują rozszczepienie poziomów $2s_{1/2}$ i $2p_{1/2}$ atomu wodoru o $\Delta\nu = 1057$ MHz – tzw. przesunięcie Lamba. Podobne źródło ma anomalny moment magnetyczny elektronu. Eksperymenty, w których mierzy się korelacje między detektorami światła przy bardzo słabych źródłach dowodzą, wbrew teorii klasycznej, że fotonu wysłanego przez jeden atom nie da się zarejestrować w dwóch detektorach. Pozwalają też w końcu stwierdzić, że foton zapewnia zachowania energii w zjawisku fotoelektrycznym: energia fotoelektronu zarejestrowanego po krótkim czasie oświetlania t bywa większa od klasycznej energii padającego światła: $E = \epsilon_0 \mathcal{E}^2 S t$ (S – powierzchnia detektora).

Fotony nie są tym samym co kwanty światła z 1905 r.: nie są punktowe, bowiem ich rozciągłość przestrzenna wynika z warunków brzegowych, np. rozmiarów wnęki rezonansowej lub czasu życia stanów atomowych (rzędu 10^{-8} s); nie są niezależne, bowiem np. w równowadze termodynamicznej podlegają statystyce Bosego; nie są podobne do gazu doskonałego, bowiem ich liczba nie jest ustalona, itd. Pomimo tego, spekulatywna hipoteza kwantów światła pozostaje świadectwem wyjątkowej intuicji fizycznej Einsteina, który trafnie odgadł, że poprawna teoria wymaga oddziaływania kwantowego światła z kwantowymi promieniąjącymi oscylatorami.

⁵ Fluktuacje te spełniają zasadę Heisenberga: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$.