



## Kwanty światła, efekt fotoelektryczny i realność fotonów

Janusz Skalski

Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana

Gościenny przedruk z *Delty* 6/2005

W marcu 1905 r. Albert Einstein wysłał do publikacji pracę<sup>1</sup>, 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 dla Einsteina był o pięć lat wcześniejszy pomysł Maxa 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  $\nu$  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 wynosiła:

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

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 gęstości<sup>2</sup> [...] 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.

<sup>1</sup> *Annalen der Physik* **17**, 132 (1905).

<sup>2</sup> Tzn. dla  $h\nu \gg 3 kT$  ( $T$  – temperatura,  $k$  – stała Boltzmannna); przy  $T = 300 \text{ K}$  oznacza to długości fal  $\lambda \ll 20 \mu\text{m}$ .

Zjawisko to odkrył H. Hertz (1887) 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), 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), a następnie oddzielnie wyznaczył ich ładunek (1899). 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 roku P. Lenard, używając jako źródła światła łukowej lampy węglowej, której intensywność mógł zmieniać tysiąckrotnie. Okazało się, że energia wybitych elektronów w ogóle nie zależy od natężenia światła, rośnie natomiast wraz z jego częstotliwością. Charakter tego wzrostu nie był znany w 1905 roku, gdy Einstein opublikował swą hipotezę.

Einstein 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 wyrzuconego elektronu dla przypadku, gdy ta strata wynosi zero, to:

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

gdzie  $P = h\nu_0$  jest tzw. pracą wyjścia – charakterystyczną dla metalu minimalną energią, która pozwala elektronowi opuścić jego powierzchnię, a  $\nu_0$  – 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 roku<sup>3</sup>:

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 (\*) 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 tej 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 stokrotnie 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. Poświęciwszy kilka lat pracy, wszystkie te trudności pokonał R. Millikan. W 1916 r. opublikował swoje bardzo dokładne rezultaty, które potwierdziły wzór Einsteina. Błąd wyznaczonej fotoelektrycznej wartości  $h = 6,57 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  ocenił 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 rozprasał na graficie promienie  $X$  z molibdenowej antykathody. 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,  $\theta$  – kąt rozproszenia). W 1925 roku 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”<sup>4</sup>, wbrew swemu pierwotnemu, dość mętnemu znaczeniu, błyskawicznie przyjęła się jako określenie kwantu światła, którego istnienie wydawało się potwierdzone przez efekt Comptona.

<sup>3</sup> Autorzy: M. Planck, H.W. Nernst, H. Rubens i E. Warburg.

<sup>4</sup> G.N. Lewis, *Nature* **118**, 874 (1926).

Tymczasem w latach 1925–1927 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 kwantowe<sup>5</sup>. Gdy elektron o początkowej energii  $E_p$  znajduje się w zmiennym polu elektrycznym o częstotliwości  $\nu$ , to po kilku okresach drgań pola pojawia się nowa składowa amplitudy elektronu. Jest ona proporcjonalna do amplitudy pola  $\vec{E}$  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  $|\vec{E}|^2$ , tzn. do natężenia światła. Równanie Einsteina (\*) wynika więc z kwantowej natury elektronów przy ich oddziaływaniu z klasycznym promieniowaniem. Także inne cechy fotoefektu, takie 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 roku, gdy P.A.M. Dirac przedstawił kwantową teorię promieniowania. Po około 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, gdy traktuje się 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  $\vec{E}$  i magnetycznego  $\vec{B}$  monochromatycznej fali EM nie są dokładnie określone, ale, podobnie jak położenie i pęd cząstki, wykazują fluktuacje kwantowe  $\Delta\vec{E}$  i  $\Delta\vec{B}$ . W „klasycznych” stanach pola EM, zawierających nieokreśloną liczbę fotonów, te fluktuacje są małe w porównaniu ze średnimi wartościami  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$ . Kwantowa natura promieniowania uwydatnia się tam, gdzie fluktuacje pola EM dominują wobec zerowania się średnich  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$ . 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  $h\nu/c$ , sprzeczny z teorią Maxwella. Fluktuacje pola elektrycznego

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

$\Delta \vec{E}$  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 zachowanie energii w zjawisku fotoelektrycznym: energia fotoelektronu zarejestrowanego po krótkim czasie oświetlenia  $t$  bywa większa od klasycznej energii padającego światła:  $E = \varepsilon_0 |\vec{E}|^2 Sct$  ( $S$  – powierzchnia detektora).

Fotony nie są tym samym co kwanty światła z 1905 r.: nie są punktowe, bo ich rozciągłość przestrzenna wynika z warunków brzegowych, np. rozmiarów wnęki rezonansowej lub czasu życia stanów atomowych (rzędu  $10^{-8}$  s); nie są niezależne, ponieważ np. w równowadze termodynamicznej podlegają statystyce Bosego; nie są podobne do gazu doskonałego, ich liczba nie jest bowiem 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 promieniującymi oscylatorami.

