

Elektrony, kwanty, fotony...

dr Janusz B. Kępka

Wstęp.

Sir Isaac Newton (angielski fizyk i filozof, 1642-1727) w swym znakomitym dziele *Opticks* (1704 r.) rozważał zarówno korpuskularny jak i falowy charakter światła, ze wskazaniem natury korpuskularnej.

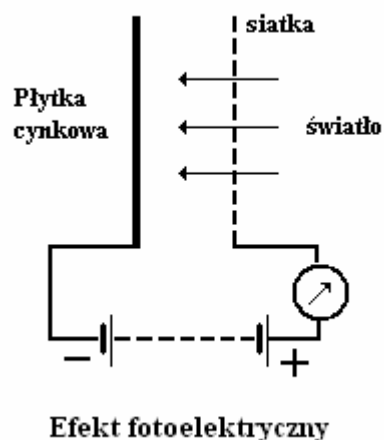
W 1801 r. Thomas Young (lekarz i fizyk angielski, 1773-1829) odkrył zjawisko interferencji światła, co jednoznacznie określa falową naturę światła.

Z kolei, w 1808 r. Étienne Louis Malus (fizyk francuski, 1775-1812) opisał zjawisko polaryzacji światła, co z kolei wskazuje, że światło ma charakter fali poprzecznej, podobnie jak fala na wodzie.

W roku 1887, Heinrich Rudolf Hertz (fizyk niemiecki, 1857-1894) wykazał doświadczalnie, że promieniowanie elektromagnetyczne (ultrafiolet) ułatwia przeskok iskry elektrycznej. I odwrotnie, w rok później wykazał, że przeskok iskry elektrycznej powoduje emisję promieniowania elektromagnetycznego. Obecnie, znane to jest jako efekt fotoelektryczny. W eksperymentach Hertza można było bezpośrednio wykazać stan polaryzacji promieniowania.

W r. 1888 Wilhelm Ludwig Franz Hallwachs (fizyk niemiecki, 1859-1922), uczeń H.R. Hertza, zauważył, że świeżo wypolerowana płytką cynkowa, oświetlana światłem ultrafioletowym, traci ładunek, jeśli była naładowana ujemnie. Natomiast stan naelektryzowania płytki nie zmienia się, gdy płytką była naładowana dodatnio. Także odkrył on, że nie naładowana płytką ładuje się dodatnio w wyniku naświetlania promieniowaniem elektromagnetycznym. Najwidoczniej światło powodowało wypieranie z płytki ładunku ujemnego.

Aleksandr Grigoriewicz Stoletow (fizyk rosyjski, 1839-1896) wykazał w 1890 r., że między płytką i siatką (rys. obok) następuje ciągły przepływ prądu elektrycznego. Prąd fotoelektryczny płynął nawet w najlepszej możliwej do osiągnięcia próżni. Wywnioskowano stąd, że przepływ prądu był spowodowany przez ruch nośników ładunku ujemnego.



Efekt fotoelektryczny

Odkrycie przez Röntgena (Wilhelm Conrad, fizyk niemiecki, 1845-1923) promieniowania X (1895 r.), prawie bezpośrednio wskazywało możliwość generacji fal elektromagnetycznych przez poruszające się cząstki materialne.

Dopiero w 1934 r. udowodnił to doświadczalnie fizyk rosyjski Paweł Aleksiejewicz Czerenkow (1904-1990), co znane jest jako promieniowanie Czerenkowa.

W 1891 r. George Johnstone Stoney (fizyk irlandzki, 1826-1911) wprowadził nazwę elektron dla elementarnej jednostki elektryczności ujemnej w procesie elektrolizy.

Ponieważ światło może wybijać elektrony z powierzchni katody (efekt fotoelektryczny), i odwrotnie, elektrony mogą powodować emisję światła, to w 1895 r. Sir Joseph John Thomson (1856-1940, fizyk angielski) doszedł do wniosku, że promieniowanie katodowe jest strumieniem cząstek o ujemnym ładunku, podobnie jak w procesie elektrolizy.

I. Kwanty energii.

14 grudnia 1900 r. Max Karl Ludwig Planck (fizyk niemiecki, 1858-1947) przedstawił wyprowadzenie prawa promieniowania ciała doskonale czarnego (teoretycznie: ciało całkowicie pochłaniające padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od temperatury tego ciała, kąta padania i widma padającego promieniowania), i podał słynne równanie [1]:

$$E(\nu) = 2 \frac{h\nu}{\lambda^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = 2 \frac{hc}{\lambda^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda \cdot kT}\right) - 1} \quad (1)$$

obecnie zwane prawem Plancka dla ciała doskonale czarnego, gdzie:

$E(\nu)$ – ilość energii promienistej przypadającej na daną powierzchnię (radiancja spektralna częstotliwościowa w kierunku prostopadłym do powierzchni);

h – stała Plancka;

ν – częstotliwość fal elektromagnetycznych;

$c = \lambda \cdot \nu$ – prędkość światła *in vacuo*;

k – stała Boltzmanna;

T – temperatura ciała doskonale czarnego.

W powyższym, wartość energii $E = h\nu$ Max Planck nazwał „kwantem” (łac. **quantum** – ilość).

Zwykle jest wskazywane, że prawo Plancka wynika z założenia, że oscylator (obiekt generujący ruch falowy w danym ośrodku) o częstotliwości ν może pochłaniać lub tracić energię E tylko porcjami równymi:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

W tzw. literaturze przedmiotu wprost przedstawia się, że – cytujemy: „Według Plancka energia oscylatora o częstości ν mogła być równa jedynie całkowitym wielokrotnościom $h\nu$. Wielkość $h\nu$, stanowiącą podstawową jednostkę energii, nazwał Planck „kwantem”. Nowa stała fizyczna h ma wymiar *energia* \times *czas*, albo inaczej, wymiar *pęd* \times *droga*.” (A.P. French – **Zasady fizyki współczesnej**, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, str. 104).

Ale zaraz dalej, czytamy tam (str. 107): „Nie wynika stąd bynajmniej, że promieniowanie we wnętrzu osłony składa się z oddzielnych pakietów, i sam Planck takiego wniosku nie wyciągnął.”, koniec cytatu.

Pytanie: to jak to było według Plancka? „Całkowite wielokrotności”, ale nie „oddzielne pakiety”?

Ponieważ powyższe jest podstawą tzw. mechaniki kwantowej i z kolei fizyki kwantowej, i z kolei podstawą „słynnej teorii Alberta Einsteina”, że światło to latające fotony o masach m , to rozpatrzmy powyższe bardziej szczegółowo.

Jeżeli stała h ma charakter stałej fizycznej, to równanie (2) wprost wskazuje, że energia E jest prostą funkcją częstotliwości ν : $E \sim \nu$. I nie ma tu „oddzielnych pakietów”, jak to słusznie zauważył Max Planck, a potwierdził doświadczalnie Robert Andrews Millikan [2] (fizyk amerykański, 1868-1953).

Ponadto, R.A. Millikan eksperymentalnie wyznaczył wartość stałej h/e . Jest to bezpośrednie wskazanie związku między elementarnym ładunkiem elektryczności e oraz energią promieniowania elektromagnetycznego (światła) według zależności (1), w procesie oddziaływania wzajemnego elektronów i promieniowania elektromagnetycznego.

Tak więc, z zależności (2) nie wynika, że energia E jest całkowitą wielokrotnością $h\nu$.

Oczywiście, określonej wartości częstotliwości ν odpowiada określona wartość (**quantum** – ilość) energii E .

W przypadku oddziaływania wzajemnego promieniowania elektromagnetycznego (światła) z elektronami, różnica długości fali padającej λ_i oraz fali odbitej λ_r jest taka, że:

$$\lambda_r - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\psi) = \lambda_C (1 - \cos\psi) \quad (3)$$

co znane jest jako zjawisko (efekt) Comptona [3].

W powyższym:

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = \frac{hc}{m_e c^2} = \text{constant}$$

zwane jest comptonowską długością fali.

Z powyższego, mamy też:

$$h = m_e c \lambda_C = p_e \lambda_C = \text{constant} \quad (4)$$

Wskazuje się, że ponieważ w zależności (3) występuje stała Plancka (4), to światło (promieniowanie elektromagnetyczne) ma charakter korpuskularny (np. E.H. Wichman, *Fizyka kwantowa*, PWN 1976, str. 174).

Ale „uczni w piśmie” nie zauważają, że $p_e = m_e c$ jest pędem elektronu o masie m_e , poruszającego się z prędkością c światła *in vacuo*. Z tego właśnie względu, stała Plancka (4) określa moment pędu elektronu względem promieniowania elektromagnetycznego o długości fali λ_C .

Ponieważ: $c = \lambda_C \cdot \nu_C = \text{constant}$, to mamy również:

$$\nu_C = \frac{c}{\lambda_C} = \frac{m_e c^2}{h}$$

A z powyższego:

$$E_c = m_e c^2 = \frac{hc}{\lambda_C} = h \cdot \nu_C = \text{constant} \quad (5)$$

co określa *kwant energii* według równania (2) Maxa Plancka.

Należy tu zaznaczyć, że w zależnościach (4) oraz (5) prędkość c ma podwójne znaczenie: jest to prędkość światła *in vacuo*, i jednocześnie jest to prędkość elektronu o masie inercyjnej m_e . Nie należy z tego wyciągać „naukowego” wniosku, że elektron to jest to samo co promieniowanie elektromagnetyczne (światło).

Z wielu doświadczeń, w tym z eksperymentu R.A. Millikana, wprost wynika, że oddziaływanie wzajemne elektronów z promieniowaniem elektromagnetycznym zachodzi dla dowolnej częstotliwości ν , czyli dla dowolnej długości λ tego promieniowania. Dlatego zależność (4) możemy przepisać w postaci:

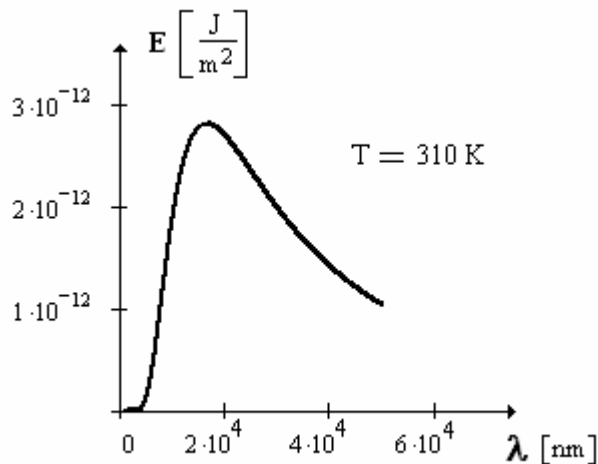
$$h = m_e c \lambda_C = m_e \nu \lambda = p_e \lambda = \text{constant} \quad (6)$$

gdzie: ν – prędkość elektronu w oddziaływaniu wzajemnym z promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fali λ .

Zależności (5) oraz (6) podane są tutaj po raz pierwszy w literaturze przedmiotu.

Na poniższym rysunku przedstawiony jest rozkład spektralny energii promieniowania E ciała doskonale czarnego, w funkcji długości fali λ , wg zależności (1) i dla temperatury $T = 310\text{ K}$, czyli temperatury ciała ludzkiego.

Maksimum energii promieniowania ciała doskonale czarnego wynosi ok. $E(\lambda) = 2 \cdot 10^4\text{ nm}$.



Poniżej podajemy orientacyjne zakresy promieniowania elektromagnetycznego:

gamma:	od ok. $5 \cdot 10^{-4}\text{ nm}$ do ok. 10^{-1} nm ;
rentgenowskie:	od 10^{-5} nm do 80 nm ;
ultrafiolet:	od 10 nm do 400 nm ;
zakres widzialny:	od 400 nm (fiolet) do 700 nm (czerwień);
zakres promieniowania podczerwonego:	od ok. 700 nm do $2\text{ mm} = 2 \cdot 10^6\text{ nm}$;
fale radiowe (Hertza):	od ok. kilku mm do kilkunastu km .

Oczywiście, np. ciało ludzkie (temp. 310 K) nie jest ciałem doskonale czarnym. Badania wykazują, że maksimum energii promieniowania ciała ludzkiego występuje dla długości fali $\lambda = 9,36\mu\text{m} = 9,36 \cdot 10^3\text{ nm} \approx 10^4\text{ nm}$, czyli w zakresie promieniowania podczerwonego.

Zwykle używane kamery termowizyjne mają zakres ok. $0,3 \cdot 10^4\text{ nm} \div 0,5 \cdot 10^4\text{ nm}$ ($3 \div 5\mu\text{m}$).

Tak więc, zakres spektralny tych kamer w bardzo niewielkim stopniu obejmuje zakres emisji ciała ludzkiego, i leży daleko poza maksimum widma ciała ludzkiego.

To wyjaśnia, dlaczego strażacy Państwowej Straży Pożarnej nie mogli znaleźć, za pomocą używanej przez nich kamery termowizyjnej (doniesienia prasowe), np. zaginionego dziecka. Otóż, zakres spektralny używanych kamer (TALISMAN IRG) był niewłaściwy...

II. Fotony Alberta Einsteina.

W 1905 r. Albert Einstein (1879-1955) przedstawiał [4], że światło składa się z oddzielnych kwantów świetlnych.

Jest to „skrzyżowanie” kwantów Maxa Plancka z wcześniejszym wskazaniem Isaaca Newtona, że światło może mieć charakter korpuskularny.

Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (fizyk francuski, 1892-1987) wyobrażał sobie istnienie w fali świetlnej punktów, w których skupiona jest energia, bardzo małych korpuskuł, których ruch jest ściśle związany z przemieszczaniem się fali [5].

Jest to odniesienie do ruchu falowego w materii, np. w powietrzu (fale akustyczne). Otóż, wyobrażano sobie, że światło jest zaburzeniem szczególnego rodzaju ośrodka zwanego *eterem*. A *eter*, podobnie jak powietrze, (ponoć) powinien składać się z oddzielnych korpuskuł. Ale nie udało się zidentyfikować „korpuskuł eteru”.

Nazwę *foton* wprowadził w 1926 r. Gilbert Newton Lewis (fizykochemik amerykański, 1875-1946) dla hipotetycznego nowego elementu atomu [6]. Według Lewisa foton nie jest światłem, lecz odgrywa zasadniczą rolę w każdym procesie promieniowania.

Powyższe „hipotetyczne wyobrażenia” Louis de Broglie’a oraz Gilberta N. Lewisa „twórczo rozwinął” Albert Einstein – wskazując, że właśnie foton jest światłem, i jest to korpuskuła o masie m_0 , która tym samym oddziałuje grawitacyjnie z innymi ciałami materialnymi, np. ze Słońcem. A także z Albertem Einsteinem, oczywiście.

Ponieważ prędkość światła wynosi c , to energia einsteinowskiego fotonu o masie m_0 jest dokładnie równa: $E = m_0 c^2$, i jest równa energii kwantu światła wg zależności (5).

Możemy więc, a nawet powinniśmy, napisać:

$$m_0 c^2 = h \nu_C = (m_e c \lambda_C) \nu_C = m_e c^2$$

I mamy: $m_0 = m_e$.

Powyższe wprost oznacza, że einsteinowski foton o masie m_0 i poruszający się (zawsze!) z prędkością c światła *in vacuo*, to jest to dokładnie elektron o masie m_e .

I rzeczywiście. Z równania (5) wprost wynika, że $E_c = m_e c^2$ jest energią elektronu poruszającego się z prędkością c światła. Jest to energia dokładnie równa energii $E_c = h \nu_C$ promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwości ν_C i comptonowskiej długości fali λ_C . W tzw. „literaturze przedmiotu” jest to niezwykle starannie ukrywane, ponieważ Albert Einstein nakazał, że żadna cząstka materialna, prócz fotonu, nie może poruszać się z prędkością c światła.

I „w ten oto prosty sposób”, a wskazany wyżej, elektron stał się... fotonem! „A światłość wiekiutą dał mu Pan Einstein”. I stał się światłem! Foton, oczywiście. Amen.

Literatura.

1. M. Planck, Verh. Deutsch. Phys. Ges., **2**, 237 (1900), a także: „Über das Gesetz der Energieverteilung in Normalspektrum“, Annalen der Physik, **4**, 553 (1901).
2. R.A. Millikan, *A direct Photoelectric Determination of Planck's h*, Phys. Rev., **7**, 355 (1916).
3. A.H. Compton, *The Spectrum of Scattered X-rays*, Phys. Rev. **22**, 409 (1923).
4. A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik, **17**, 132 (1905)
5. Louis de Broglie, „*Sur le parallélisme entre la dynamique du point matériel et l'optique géométric*“, J. Phys. Rad. **7**, 1 (1926).
6. G. N. Lewis, Nature, **118**, 874 (1926).