

Fotony i materia

Maciej Panczykowski

Fotony są cząstkami elementarnymi z grupy bozonów, o spinie 1 i energii zależnej wprost proporcjonalnie od częstotliwości drgań (ν):

$$E = h\nu$$

gdzie: E – energia, h – stała Plancka

W zależności od ich energii, ich strumień stanowi (zaczynając od energii najwyższej): promieniowanie gamma, promieniowanie X (rentgenowskie), ultrafiolet, światło widzialne, podczerwień, mikrofałe i „fałe” radiowe.

Materia ziemska może mieć postać: gazową, ciekłą lub stałą. Gazy składają się z atomów (np. argon, ksenon) lub cząsteczek (np. tlen O_2 , azot N_2 , dwutlenek węgla CO_2 , etan C_2H_6).

Ciecze w temperaturze pokojowej są prawie zawsze cząsteczkowe (wyjątkiem rtęć). Przykładowo: woda (H_2O), brom (Br_2), etanol (C_2H_5OH), benzen (C_6H_6).

Ciała stałe występują w formach bezpostaciowych, różnokolorowych proszków, formach amorficznych (np. szkło) lub krystalicznych. Wyróżniamy następujące rodzaje kryształów:

- **molekularne** (spajane przez oddziaływania van der Waalsa, częste wśród związków organicznych),
- **kowalencyjne** (z wiązaniami między atomami elektroujemnymi), np.: diament, węglik krzemu (SiC),
- **jonowe** (z wiązaniami między atomami elektrododatnimi a elektrododatnimi), np.: chlorek sodu ($NaCl$), fluorek cezu (CsF), bromek potasu (KBr),
- **metaliczne** (z wiązaniami między atomami elektrododatnimi), w metalach i ich stopach.

W tym artykule wyobrazimy sobie, że strumień fotonów pada na określony rodzaj materii i przedstawię wszystkie zjawiska, jakie mogą wtedy wystąpić.

Najogólniej – foton zmierzający w kierunku danej formy materii może:

- przez nią przejść bez interakcji (transmisja),

- zostać pochłonięty (absorpcja),
- zostać rozproszony, czyli zmienić kierunek swego ruchu,

Ujmując rzecz bardziej szczegółowo: wyróżniamy w fizyce 8 rodzajów interakcji foton-materia ziemska:

1. **Absorpcja rezonansowa** – zachodzi wtedy, gdy energia fotonu jest równa różnicy energii między poziomami energetycznymi elektronów atomu lub cząsteczki. W przypadku pochłaniania fotonów z zakresu widzialnego jak i ultrafioletu, mamy do czynienia ze stanem wzbudzonym elektronów i ich powrotem do stanu podstawowego lub **deekscytacją bezpromienistą** w postaci przekazania pochłoniętej energii innej cząsteczce podczas zderzeń. Kiedy pochłaniane są fotony z zakresu widzialnego, ich znaczna utrata (tych o określonej energii) w strumieniu padających fotonów (światło białe) odpowiada za barwę określonej substancji. To znaczy, że barwa postrzegana jest dopełniająca do „barwy” pochłanianych fotonów. Na przykład: cząsteczka chlorofilu A pochłania fotony „czerwone” i „niebieskie”, a do ich mieszanki dopełniający jest kolor zielony. Jest to kolor chlorofilu i liści, w których on występuje. Inny przykład to czerwony 1,2-naftochinon, który jest taki dlatego, że pochłania „fotony zielone”, a czerwien jest dopełniająca do zieleni.

W przypadku fotonów podczerwieni padających na cząsteczkę przechodzi ona do wzbudzonych stanów oscylacyjnych lub rotacyjnych (to drugie w przypadku dalekiej podczerwieni i gazów lub cieczy). Deekscytacja tych stanów podczas zderzeń sprawia, że cząsteczki poruszają się szybciej i złożona z nich substancja ma wyższą temperaturę.

2. **Fluorescencja** – zachodzi wtedy gdy na substancję padają fotony z zakresu ultrafioletu lub widzialnego, indukując stan wzbudzony elektronów, z którego powrót do stanu podstawowego odbywa się przez bardzo krótko trwający ($< 10^{-8}$ sek) stan pośredni o niższej energii. Fotony emitowane podczas przejścia ze stanu pośredniego do podstawowego mają niższą częstotliwość niż te padające.

Przykładowo: oświetlenie bromku etydyny ultrafioletem powoduje, że fluoryzuje on w zakresie widzialnym (barwa pomarańczowa). Warto tu nadmienić, że bromek etydyny potrafi interkalować z DNA. Ta właściwość wykorzystywana jest w biologii molekularnej do uwidaczniania prążków DNA na żelach używanych do rozdzielania odcinków DNA o różnych długościach.

Fluorescencja występuje tylko w przypadku niektórych substancji, np. fluoresceiny, rodaminy B.

3. **Fosforescencja** – jest podobna do fluorescencji, z tym, że w jej przypadku powrót do stanu podstawowego odbywa się przez „długo żyjący” stan metastabilny ($>10^{-8}$ sek, nawet trwający sekundy, godziny lub tygodnie). Zjawisko to znalazło zastosowanie przy produkcji mas świecących. Również występuje tylko w przypadku określonych substancji, jak np. siarczek cynku (ZnS) lub siarczek strontu (SrS).

4. **Effekt fotoelektryczny** – efekt wybijania elektronu z materiału przez foton promieniowania X, nadfioletu lub zakresu widzialnego. Foton zostaje przez elektron pochłonięty całkowicie, a jego energia zamieniana jest (niecałkowicie) na energię kinetyczną elektronu. Najczęściej to zjawisko przedstawiane jest na przykładzie metali i nadfioletu. Ściślej mówiąc, elektron gazu elektronowego musi wykonać jeszcze tak zwaną pracę wyjścia z metalu (W_{ext}):

$$E_{\text{kin}} = h\nu - W_{\text{ext}}$$

Ten efekt bardzo klarownie obrazuje fakt mówiący, że tak zwane promieniowanie elektromagnetyczne jest niczym innym jak strumieniem fotonów, który to nie byłby w stanie wybić z metalu żadnego elektronu, jeśli składałby się z bardzo wielu fotonów, ale o zbyt niskiej energii pojedynczej cząstki (np. „radiowych”).

Zjawisko fotoelektryczne znalazło zastosowania w: fotokomórkach, fotopowielaczach, matrycach CCD aparatów fotograficznych.

5. **Rozpraszanie Comptona** – zjawisko niesprężystego rozpraszania fotonów na elektronach materiału, wskutek którego następuje przyrost energii kinetycznej elektronu i emisja fotonu rozproszonego o niższej energii. **Wzór Comptona** przedstawiający zależność między „długością fali” fotonu rozproszonego (λ_2) a fotonu padającego (λ_1) ma postać:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \alpha)$$

gdzie: h – stała Plancka, m – masa elektronu, c – prędkość światła, α – kąt pod którym nastąpiło rozproszenie. Występująca w tym wzorze wielkość: h/mc to tak zwana „komptonowska długość fali elektronu”, mająca bardzo niewielką wartość. Jest to przyczyną tego, że zmiany „długości fali” są w tym zjawisku niewielkie i obserwowalne tylko dla fotonów „krótkofalowych” (promieniowania gamma i rentgenowskiego).

6. **Rozpraszanie Rayleigha** – pochłonięcie fotonu przez elektron cząsteczki mniejszej niż „długość fali” owego fotonu i jego emisja pod dowolnym kątem i bez zmiany częstotliwości drgań (rozpraszanie sprężyste). Natężenie tego zjawiska jest proporcjonalne do czwartej potęgi częstotliwości (ν^4) i jest to jeden z rzadkich przykładów występowania potęgi 4 we wzorach fizyki teoretycznej. To rozpraszanie jest odpowiedzialne za niebieski kolor nieba (fotony „niebieskie” intensywnie rozpraszane) i czerwony kolor wschodzącego i zachodzącego słońca (do oka docierają po prostu tylko fotony najmniej intensywnie rozpraszane – fotony „czerwone”).

7. **Rozpraszanie Ramana** – rodzaj rozpraszania (niesprężystego) fotonu na cząsteczkach, w którym foton padający nie ma energii odpowiadającej różnicy między poziomami oscylacyjnymi lub w niektórych przypadkach – rotacyjnymi cząsteczki. Cząsteczka po pochłonięciu fotonu emituje foton o niższej energii niż padający, po czym przechodzi na wyższy poziom oscylacyjny lub rotacyjny (**rozpraszanie stokesowskie**). Możliwe jest też rozproszenie fotonu na cząsteczce w stanie wzbudzonym oscylacyjnym lub rotacyjnym i emisja fotonu o wyższej energii niż padający połączona z jej powrotem do stanu podstawowego (**rozpraszanie antystokesowskie**).

8. **Emisja wymuszona** – to przykład procesu niewystępującego w naturze, w którym istnieje początkowo tak zwana **inwersja obsadzeń** w materiale otrzymywana przez pompowanie optyczne zewnętrznym, intensywnym źródłem światła. Większa liczba elektronów znajduje się w stanie wyższym, metastabilnym niż podstawowym. Spontaniczna emisja pojedynczych fotonów związana z powrotem do stanu podstawowego indukuje procesy powrotu i emisji bardzo wielu fotonów „w fazie” (są to bozony), co skutkuje otrzymaniem źródła światła spójnego, o dużym natężeniu. Na zjawisku emisji wymuszonej opierają się: MASERY (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*) i później opracowane LASERY (*light amplification by stimulated emission of radiation*).

Maciej Panczykowski

Katowice, 2025.07.29

DODATEK:

John William Strutt Rayleigh (1842-1919) – fizyk angielski. Jako pierwszy wyjaśnił teoretycznie rozpraszanie na cząsteczkach mniejszych niż „długość fali” światła padającego. Odkrył argon w atmosferze ziemskiej, za co przyznano mu w 1904 roku Nagrodę Nobla.

Arthur Compton (1892-1962) – fizyk amerykański. Odkrywcą rozpraszania nazwanego jego nazwiskiem (1923) i badacz promieniowania kosmicznego. Za te zasługi otrzymał w 1927 roku Nagrodę Nobla.

Chandrasekhara Raman (1888-1970) – fizyk indyjski. Badacz rozpraszania światła i odkrywca rozpraszania Ramana. Uhonorowany za to w 1930 roku Nagrodą Nobla jako pierwszy Azjata i pierwszy Hindus wykształcony w swej ojczyźnie.