

Rocznicowy Nobel

W stulecie zapostulowania korpuskularnej natury światła Komitet Noblowski nagrodził Roya J. Glaubera za *kwantowo-mechaniczną teorię koherencji optycznej* oraz Johna L. Halla i Theodora W. Hänscha za *precyzyjną spektroskopię laserową i technikę grzebieńia częstości*.

Wzrok jest najintensywniej używanym zmysłem człowieka. Oświecenie, oświecony, oświata – to tylko kilka słów świadczących o naszych pozytywnych skojarzeniach związanych ze światłem. Ci, których pasjonuje rozumowe poznawanie świata, mają jedno pozytywne skojarzenie więcej: to przecież rozważania nad naturą światła doprowadziły do najgłębszej rewolucji w nauce – powstania teorii kwantowej.

Często, zwłaszcza we współczesnej „nowoczesnej” szkole, podkreśla się tzw. dualizm korpuskularno-falowy. Rzeczywiście, możliwość opisywania światła na dwa (pozornie sprzeczne) sposoby, raz jako klasycznej (niekwantowej) fali elektromagnetycznej, a raz jako strumienia fotonów, to jakby trochę za dużo.

Winne jest intelektualne lenistwo fizyków, którzy teorię Maxwella przez lata uważali nie tylko za bardzo udaną, ale również wystarczającą do opisu światła. Mechanika kwantowa bardzo szybko zostawiła ten problem Maxwellowi, kontentując się uwzględnieniem oddziaływania pojedynczych fotonów z materią.

Elektrodynamika kwantowa, pomnikowe osiągnięcie teorii kwantowej, tylko pozornie zastąpiła elektrodynamikę Maxwella. Jest to teoria opisująca oddziaływanie cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym z polem elektromagnetycznym. W teorii tej liczba cząstek nie jest ustalona, gdyż para cząstka-antycząstka może anihilować w foton(y) i odwrotnie. Kreacja pary cząstka-antycząstka możliwa jest jednak dopiero wtedy, gdy energia opisywanego układu odpowiada masie takiej pary. Dlatego metody elektrodynamiki kwantowej znalazły zastosowanie do opisu oddziaływań elektromagnetycznych wysokich energii. Wszystkim wydawało się, że efekty opisywane przez elektrodynamikę kwantową nie mają znaczenia w optyce.

Okazuje się, że był to pogląd błędny. Roy J. Glauber był tym, który jako pierwszy to wykazał. Można powiedzieć, że jego prace z 1963 roku na temat kwantowej koherencji zostały sprowokowane błędnymi przewidywaniami dotyczącymi światła generowanego przez dopiero co wynalezione lasery.

Osiągnięciem, które przypisywano kwantowej naturze światła, był interferometryczny pomiar rozmiarów gwiazd opisany i przeprowadzony przez Hanbury Browna i Twissa w latach 1954–55. Eksperyment polegał na pomiarze korelacji między dwoma detektorami w zależności od różnicy dróg optycznych. Obserwowano wzmocnienie o czynnik dwa dla zerowej różnicy, co było interpretowane jako dowód na to, że fotony w dwóch koherentnych strumieniach światła są skorelowane. Pojęcie koherencji światła nie było jednak precyzyjnie zdefiniowane. Światło uznawano za koherentne, jeżeli obserwowano efekty interferencyjne.

Żeby je zaobserwować dla chaotycznych źródeł termicznych (innych nie było), stosowano monochromatory i kolimatory, których najprostszą wersją jest wąska szczelina wstawiona w wiązkę rozszczepioną przez pryzmat.

Światło generowane przez laser, jako wywołane przez wymuszoną emisję, jest w naturalny sposób koherentne, ponieważ jest monochromatyczne i zgodne w fazie. Spodziewano się więc gigantycznych efektów przy obserwacji skorelowanej detekcji takiego światła, których ... nie zaobserwowano.

Roy J. Glauber pokazał, że oczekiwania te były spowodowane głębokim niezrozumieniem natury światła. Mianowicie światło jest efektem kwantowym i tylko w szczególnych przypadkach opis klasyczny daje poprawne wyniki. Proces detekcji w eksperymentach badających korelację fotonów musi być opisywany w języku elektrodynamiki kwantowej, czyli za pomocą operatorów kreacji i anihilacji fotonów. Tylko w ten sposób można prawidłowo uwzględnić fakt, że stan układu po rejestracji jednego fotonu jest istotnie różny od stanu przed tą rejestracją: ma o jeden foton mniej. Teoriopolowy formalizm posługuje się kwantowym polem, którego wzbudzeniami są fotony. Usuwa jakąkolwiek korpuskularno-falową sprzeczność.

Prace Glaubera z 1963 roku ujmują prostotą matematycznej precyzji opisu i zadziwiają możliwością (obecnie doskonale potwierdzoną doświadczalnie), że opis ten może odpowiadać rzeczywistości. Ich czytanie można potraktować jako kontemplację zawsze zaskakującej matematyczności przyrody. Niestety, ta ujmująca prostota wyrażona jest w abstrakcyjnym języku kwantowej teorii pola, który nie jest zrozumiały dla osób niemających akademickiego wykształcenia matematycznego. Jeżeli jednak uznamy, że warto uczyć się języków klasycznych, by mieć przyjemność z czytania starożytnych autorów w oryginale, to warto studiować, aby móc przeczytać i zrozumieć prace Glaubera.

W pracach tych pojawiają się dwie koncepcje: stanów koherentnych i definicji samej koherencji. Koherencja danego stanu n fotonów jest z definicji rzędu $j \leq n$, jeżeli wyrażenie opisujące korelację j fotonów da się zapisać jako iloczyn odpowiednich wyrażeń dla każdego fotonu z osobna. Koherentny stan n fotonów z definicji wykazuje koherencję do rzędu n włącznie.

Idealny laser jest źródłem koherentnych stanów pola. Okazuje się, że dla takich stanów nie występuje wzmocnienie obserwowane przez Hanbury Browna i Twissa. Dla odległej gwiazdy wzmocnienie to jest wynikiem gaussowskiego rozkładu jej światła. Światło to wykazuje koherencję pierwszego rzędu, ale na tym koniec. Nie można w żaden sposób uczynić go koherentnym drugiego rzędu. Funkcja korelacji drugiego rzędu okazuje się sumą dwóch składników i stąd bierze się wzmocnienie o czynnik dwa przy pomiarze takiej korelacji.

Prace Glaubera zapoczątkowały optykę kwantową. O tym, co jej i spektroskopii laserowej zawdzięczamy, napiszemy za miesiąc.

Piotr ZALEWSKI