

Wielowymiarowe splątanie kwantowe na platformie optyki zintegrowanej

dr Michał Karpiński

Laboratorium Fotoniki Kwantowej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Splątanie kwantowe jest jedną z najbardziej tajemniczych konsekwencji mechaniki kwantowej. Jednocześnie, jest ono podstawą większości zastosowań mechaniki kwantowej, rozwijanych obecnie w ramach technologii kwantowych. Na przykład, działanie komputera kwantowego polega na wytwarzaniu i przetwarzaniu splątania pomiędzy kwantowymi bitami (qubitami).

Pomimo przyznania w 2022 r. Nagrody Nobla za badania doświadczalne na temat splątania kwantowego, nasza wiedza na temat splątania nawet najprostszych pojedynczych obiektów kwantowych – fotonów – nie jest pełna. Splątanie pomiędzy parą fotonów objawia się poprzez korelacje pomiędzy wynikami pomiarów wielkości fizycznych dotyczących tych fotonów.

By obiekty były splątane, muszą wykazywać ścisłe korelacje pomiędzy dwoma wielkościami, których zgodnie z zasadą nieoznaczoności nie da się jednocześnie dokładnie wyznaczyć. W przypadku elektronów taką parą wielkości są położenie i pęd. Zasada nieoznaczoności Heisenberga mówi, że gdy znamy dokładnie położenia cząstek, to ich pędy (czyli prędkości – dla cząstek o ustalonej masie) nie mogą być znane dokładnie. Jednak w przypadku splątanych cząstek mamy pełne korelacje: gdy zmierzmy położenie cząstki A, możemy dokładnie przewidzieć wynik pomiaru położenia cząstki B. Gdy zmierzmy pęd cząstki A, możemy dokładnie przewidzieć wynik pomiaru pędu cząstki B – nie zależnie od tego, jak daleko od siebie znajdują się cząstki. To dlatego Einstein określił splątanie kwantowe jako „upiorne oddziaływanie na odległość” i zaproponował ukryte, zakodowane wcześniej w cząstkach klasyczne korelacje, które tłumaczyłyby obserwowane, pozornie sprzeczne z zasadą nieoznaczoności, korelacje. Jednak badania Noblistów nagrodzonych w 2022 r. (na podstawie wcześniejszych prac Johna S. Bella) dowiodły, że splątania nie da się wyjaśnić na gruncie fizyki klasycznej.

Fotony mogą być splątane w polaryzacji (wykazywać jednocześnie korelacje dla polaryzacji liniowych i kołowych), w położeniu i pędzie (czyli poprzecznej składowej wektora falowego) oraz w czasie i częstotliwości (czyli energii, zgodnie ze wzorem wyrażającym energię fotonu jako iloczyn stałej Plancka i częstotliwości). Ten ostatni rodzaj splątania jest słabo zbadany, pomimo, że jest bardzo obiecujący pod względem praktycznym. Problem z badaniem splątania w czasie i częstotliwości bierze się z trudności w wykonywaniu pomiarów czasu przybycia fotonów i częstotliwości fotonów z odpowiednią rozdzielczością. Nawet gdy użyjemy detektorów pojedynczych fotonów o najlepszej rozdzielczości czasowej, to wymagana do weryfikacji splątania rozdzielczość pomiaru częstotliwości fotonu jest około 100 razy za mała. W ramach projektu opracujemy metody pozwalające na rozciąganie fotonów w czasie lub w częstotliwości o ponad 100 razy, tak by umożliwić pomiary i modyfikowanie par fotonów splątanych w czasie i częstotliwości.

Będziemy w tym celu przesyłać fotony przez materiał, którego współczynnik załamania będzie bardzo szybko zmieniał się w czasie. By uzyskać wystarczająco szybkie zmiany współczynnika załamania użyjemy najnowszych układów optyki scalonej, wykorzystujących niezwykle materiał – niobian litu. W ramach projektu opracujemy elementy wytwarzające splątane pary fotonów oraz umożliwiające pomiar i wykorzystanie tego splątania. Zbadamy zastosowania par fotonów w splątanych w czasie i częstotliwości do poprawy czułości pomiarów i bezpiecznego przesyłania informacji. Zbadamy też możliwości wykorzystania splątania w czasie i częstotliwości do przyspieszenia obliczeń kwantowych.