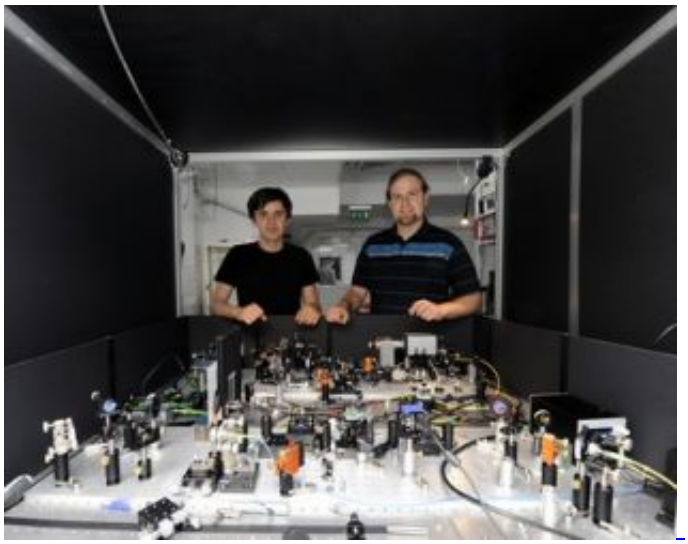
Narodziny kwantowej holografii: Mamy hologram pojedynczej cząstki światła!

2016-07-18

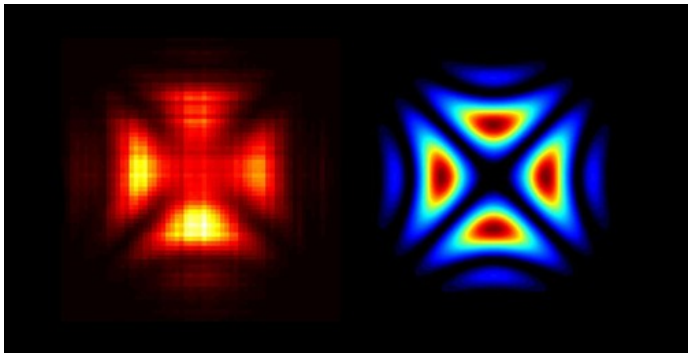


Dr Radosław Chrapkiewicz (po prawej) i doktorant Michał Jachura przy aparaturze do rejestrowania hologramów pojedynczych fotonów na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

Wykonanie hologramu pojedynczego fotonu uchodziło dotąd za niemożliwe z przyczyn fizycznie fundamentalnych. Naukowcom z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego udało się jednak w oryginalny sposób przenieść idee klasycznej holografii do świata zjawisk kwantowych. Nowa technika pomiarowa nie tylko umożliwiła rejestrację pierwszego hologramu pojedynczej cząstki światła, ale także pozwoliła w nowy sposób spojrzeć na fundamenty mechaniki kwantowej.

Na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (FUW) wykonano pierwszy hologram pojedynczej cząstki światła. Spektakularny eksperyment, opisany na łamach prestiżowego czasopisma „Nature Photonics", przeprowadzili dr Radosław Chrapkiewicz i mgr Michał Jachura pod kierownictwem dr. hab. Wojciecha Wasilewskiego i prof. dr. hab. Konrada Banaszka. Zarejestrowanie hologramu fotonu oznacza początek nowego rodzaju holografii: holografii kwantowej, która odsłania nowy widok na świat zjawisk kwantowych.

„W stosunkowo prostym eksperymencie zmierzyliśmy i zobaczyliśmy coś, co dostrzec jest bardzo trudno: kształt frontów falowych pojedynczego fotonu", mówi dr Radosław Chrapkiewicz.



Hologram pojedynczego fotonu zrekonstruowany na podstawie danych z eksperymentu (po lewej) oraz teoretyczny (po prawej). (Źródło: FUW)

W standardowej fotografii w poszczególnych punktach obrazu rejestruje się wyłącznie natężenie światła. W klasycznej holografii dzięki zjawisku interferencji zapisuje się także fazę fali świetlnej (to właśnie faza niesie informację o głębi obrazu). Wykonanie hologramu polega na tym, że na dobrze znaną, niezaburzoną falę świetlną (odniesienia) nakłada się drugą falę o tej samej długości, lecz odbitą od obiektu trójwymiarowego (a zatem z grzbietami i dolinami fali świetlnej poprzesuwanymi w różnym stopniu w różnych punktach obrazu). Dochodzi do interferencji, która wskutek różnic w fazach obu fal tworzy skomplikowany układ prążków. Tak zarejestrowany hologram wystarczy oświetlić wiązką odniesienia, żeby odtworzyć przestrzenną strukturę frontów falowych światła odbitego od obiektu, a tym samym jego trójwymiarowy kształt.

Wydawałoby się, że podobny mechanizm powinien działać także wtedy, gdy liczbę fotonów tworzących obie fale zredukuje się do minimum, a więc do jednego fotonu odniesienia i jednego odbitego od obiektu. Tak się jednak nie dzieje! Faza fali pojedynczego fotonu wciąż fluktuuje, co uniemożliwia klasyczną interferencję z innym fotonem. Fizycy z FUW stali więc przed zadaniem pozornie niemożliwym. Spróbowali jednak rozwiązać problem w inny sposób i zamiast klasycznej interferencji pól elektromagnetycznych podjęli próbę zarejestrowania innej interferencji, kwantowej, w której oddziaływałyby funkcje falowe fotonów.

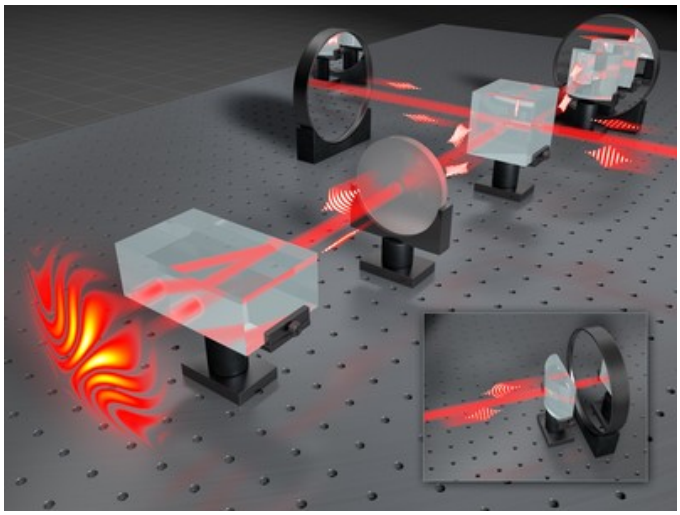
Funkcja falowa to absolutny fundament mechaniki kwantowej, rdzeń jej najważniejszego równania (równania Schroedingera). W rękach sprawnego fizyka funkcja ta pełni podobną rolę jak glina w rękach rzeźbiarza: umiejętnie ukształtowana, pozwala „ulepić” model układu cząstek kwantowych. Fizycy zawsze starają się poznać funkcję falową cząstki w danym układzie, ponieważ kwadrat jej modułu to rozkład prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w określonym stanie – a więc wiedza bardzo praktyczna.

„Wszystko to być może brzmi nieco skomplikowanie, ale w praktyce główna idea naszego eksperymentu jest prosta: zamiast patrzeć na zmiany natężenia światła, popatrzmy na to, jak zmienia się prawdopodobieństwo zarejestrowania par fotonów po interferencji kwantowej”, wyjaśnia doktorant Jachura.

Skąd pary fotonów? Rok temu Chrapkiewicz i Jachura za pomocą nowatorskiej kamery skonstruowanej na FUW sfilmowali, po raz pierwszy na świecie, zachowanie par rozróżnialnych i nierozróżnialnych fotonów wysłanych ku płytce światłodzielącej. Gdy fotony były rozróżnialne, pojawiały się za płytką przypadkowo: po jednym fotonie z każdej strony płytki bądź razem po jednej z jej stron. Fotony nierozróżnialne interferowały kwantowo i w efekcie zachowywały się inaczej: łączyły się w pary i opuszczały płytkę światłodzielącą zawsze razem, po jednej ze stron. Zjawisko to jest znane jako interferencja dwufotonowa lub efekt Hong-Ou-Mandela.

„Po takim eksperymencie trudno było nie zadać sobie pytania, czy kwantowej interferencji dwufotonowej nie można byłoby wykorzystać podobnie jak interferencji klasycznej w holografii, do zebrania za pomocą znanego fotonu jakichś dodatkowych informacji o drugim, nieznanym fotonie. Z naszych analiz wyłonił się dość niespodziewany wniosek: okazało się, że gdy dwa fotony interferują kwantowo, przebieg tej interferencji zależy od kształtów ich frontów falowych", mówi dr Chrapkiewicz.

Interferencję kwantową można zaobserwować rejestrując jednocześnie parę fotonów. Eksperyment musiał być powtarzany wielokrotnie, zawsze z dwoma fotonami o cechach identycznych jak we wcześniejszym pomiarze. Aby zapewnić te warunki, doświadczenie za każdym razem zaczynano od dwóch fotonów o płaskich frontach falowych i prostopadłych polaryzacjach (co oznacza, że pole elektryczne każdego fotonu drgało tylko w jednej płaszczyźnie, a płaszczyzny te u obu fotonów były do siebie prostopadłe). Różna polaryzacja pozwalała rozdzielać fotony w odpowiednim krysztale i jeden z nich czynić „nieznanym" poprzez wykrzywienie jego frontów falowych za pomocą soczewki cylindrycznej. Po odbiciu od zwierciadeł oba fotony kierowano ku „płytce światłodzielącej", której rolę pełnił kryształ kalcytu. Nie zmieniał on kierunku biegu fotonów spolaryzowanych pionowo, za to odchylał fotony spolaryzowane poziomo (aby wybór każdej drogi był jednakowo prawdopodobny i kryształ rzeczywiście działał jak płytka światłodzieląca, płaszczyzny polaryzacji fotonów skręcano przed nim o 45 stopni). Do rejestrowania fotonów użyto zaawansowanej kamery z poprzedniego eksperymentu. Powtarzając pomiary wielokrotnie otrzymano obraz interferencyjny odpowiadający hologramowi nieznanego fotonu oglądanemu z jednego punktu w przestrzeni. Obraz ten pozwalał w pełni zrekonstruować zarówno amplitudę jak i fazę funkcji falowej nieznanego fotonu.



Schemat aparatury użytej do rejestracji hologramu pojedynczego fotonu na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. (Doświadczenie zaczynano od dwóch fotonów o płaskich frontach falowych i prostopadłych polaryzacjach. Różna polaryzacja pozwalała rozdzielać fotony w odpowiednim krysztale i jeden z nich czynić „nieznanym" poprzez wykrzywienie jego frontów falowych za pomocą soczewki cylindrycznej. Po odbiciu od zwierciadeł oba fotony kierowano ku „płytce światłodzielącej", której rolę pełnił kryształ kalcytu. Nie zmieniał on kierunku biegu fotonów spolaryzowanych pionowo, za to odchylał fotony spolaryzowane poziomo; aby wybór każdej drogi był jednakowo prawdopodobny i kryształ rzeczywiście działał jak płytka światłodzieląca, płaszczyzny polaryzacji fotonów skręcano przed nim o 45 stopni. Eksperyment był powtarzany wielokrotnie, zawsze z dwoma fotonami o cechach identycznych jak we wcześniejszym pomiarze.) (Źródło: FUW/dualcolor.pl/jch)

Eksperyment warszawskich fizyków ma istotne znaczenie dla lepszego zrozumienia najgłębszych podstaw mechaniki kwantowej. Do tej pory nie istniał żaden łatwy doświadczalny sposób zdobycia informacji o fazie funkcji falowej. I choć mechanika kwantowa znalazła liczne zastosowania, a w ciągu niemal stu lat istnienia potwierdzono ją wielokrotnie ze znakomitą dokładnością, do dziś nikt nie potrafi

wyjaśnić, czym jest funkcja falowa: czy to tylko wygodne narzędzie matematyczne, czy może coś istniejącego realnie?

„Nasz eksperyment jest jednym z pierwszych, który umożliwia bezpośrednią obserwację jednego z podstawowych parametrów funkcji falowej, jej fazy, przybliżając nas do zrozumienia, czym naprawdę może być funkcja falowa”, mówi doktorant Jachura.

Holografię kwantową fizycy z FUW wykorzystali do zrekonstruowania funkcji falowej pojedynczego fotonu. Badacze mają nadzieję, że w podobny sposób w przyszłości uda się odtworzyć funkcję falową bardziej złożonych obiektów świata kwantów, np. niektórych atomów. Czy jednak holografia kwantowa znajdzie zastosowania poza laboratoriami, równie szerokie jak holografia klasyczna, której używa się dziś w różnego typu zabezpieczeniach (hologramy są trudne do podrobienia), w rozrywce, transporcie (w skanerach mierzących rozmiary przestrzenne ładunków), w obrazowaniu mikroskopowym oraz w optycznych technikach przechowywania i przetwarzania informacji?

„Dziś trudno odpowiedzieć na to pytanie. Wszyscy – mam tu na myśli ogół fizyków – dopiero musimy się oswoić z nowym narzędziem. Prawdziwe zastosowania holografii kwantowej pojawią się prawdopodobnie za kilkadziesiąt lat i jeśli czegoś można być pewnym, to tylko tego, że z pewnością nas zaskoczą”, podsumowuje prof. Konrad Banaszek.

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzą Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ok. 200 nauczycieli akademickich, wśród których jest 88 pracowników z tytułem profesora. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ok. 1000 studentów i ponad 170 doktorantów.

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Hologram of a Single Photon”; R. Chrapkiewicz, M. Jachura, K. Banaszek, W. Wasilewski; DOI: 10.1038/nphoton.2016.129

KONTAKT:

mgr Michał Jachura
Instytut Fizyki Teoretycznej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel.: +48 22 5532969
email: michal.jachura@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

http://www.fuw.edu.pl
Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

http://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html
Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW160718_fot01s.jpg, HR: http://www.fuw.edu.pl/press/images/2016/FUW160718b_fot01.jpg
Schemat aparatury użytej do rejestracji hologramu pojedynczego fotonu na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. (Doświadczenie zaczynano od dwóch fotonów o płaskich frontach falowych i prostopadłych polaryzacjach. Różna polaryzacja pozwalała rozdzielać fotony w odpowiednim krysztale i jeden z nich czynić „nieznanym" poprzez wykrzywienie jego frontów falowych za pomocą soczewki cylindrycznej. Po odbiciu od zwierciadeł oba fotony kierowano ku „płytce światłodzielącej", której rolę pełnił kryształ kalcytu. Nie zmieniał on kierunku biegu fotonów spolaryzowanych pionowo, za to odchylał fotony spolaryzowane poziomo; aby wybór każdej drogi był jednakowo prawdopodobny i kryształ rzeczywiście działał jak płytka światłodzieląca, płaszczyzny polaryzacji fotonów skręcano przed nim o 45 stopni. Eksperyment był powtarzany wielokrotnie, zawsze z dwoma fotonami o cechach identycznych jak we wcześniejszym pomiarze.) (Źródło: FUW/dualcolor.pl/jch)

FUW160718_fot02s.jpg, HR: http://www.fuw.edu.pl/press/images/2016/FUW160718b_fot02.jpg
Hologram pojedynczego fotonu zrekonstruowany na podstawie danych z eksperymentu (po lewej) oraz teoretyczny (po prawej). (Źródło: FUW)

FUW160718_fot03s.jpg, HR: http://www.fuw.edu.pl/press/images/2016/FUW160718b_fot03.jpg
Dr Radosław Chrapkiewicz (po prawej) i doktorant Michał Jachura przy aparaturze do rejestrowania hologramów pojedynczych fotonów na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

FUW160718a - Hologram fotonu.pdf (110.5 kB)