



Warszawa, 12 września 2024

Superprecyzyjny spektrometr wykorzystujący informację ukrytą w fotonach

Dwóch naukowców z Uniwersytetu Warszawskiego opracowało inspirowany fizyką kwantową superrozdzielczy spektrometr dla krótkich impulsów światła. Urządzenie zaprojektowane w Laboratorium Urządzeń Kwantowo-Optycznych w Centrum Optycznych Technologii Kwantowych, Centrum Nowych Technologii i na Wydziale Fizyki UW oferuje ponad dwukrotną poprawę rozdzielczości w porównaniu do standardowych podejść. W przyszłości może zostać zminiaturyzowany na chipie fotonicznym i zastosowany w sieciach optycznych i kwantowych, a także w badaniach spektroskopowych materii. Wyniki tych prac opublikowało prestiżowe czasopismo „Optica”.

Kolory niosą informacje

Zadaniem spektroskopii jest badanie różnych kolorów, czyli widma światła. Substancja chemiczna emituje charakterystyczne kolory, dzięki którym można ją zidentyfikować. Podobnie, odległa gwiazda również będzie miała specyficzne widmo światła, dzięki któremu możemy zrozumieć jej właściwości astrofizyczne, takie jak rozmiar lub wiek. Różne kolory światła są również wykorzystywane do przesyłania informacji przez kanały w sieciach światłowodowych, podobnie jak różne pasma radiowe są wykorzystywane do przesyłania wielu kanałów w tym samym czasie. Te kanały optyczne są podstawą międzykontynentalnych sieci optycznych, a także są niezbędne dla przyszłych bezpiecznych sieci kwantowych. We wszystkich tych przypadkach trudnym zadaniem jest rozróżnienie blisko położonych kanałów lub linii spektroskopowych. W przeszłości uważano, że jeśli kanały nakładają się na siebie, są prawie niemożliwe do rozróżnienia - własność ta była badana przez Johna Williama Strutta, Lorda Rayleigha, i została później nazwana właśnie kryterium Rayleigha.

Kwanty na ratunek

Postęp w informatyce kwantowej pozwolił nam zrozumieć, że tradycyjne tak zwane bezpośrednie obrazowanie lub spektroskopia pomija część informacji, która jest przenoszona w fazie złożonego pola elektromagnetycznego światła. Techniki superrozdzielczości inspirowane kwantami przekształcają złożone pole elektromagnetyczne przed jego detekcją, aby optymalnie wykorzystać tę ukrytą informację. Zasada działania urządzenia SUSI (“Super-resolution of Ultrafast pulses via Spectral Inversion”) jest bardzo podobna do tak zwanych metod superrozdzielczości inspirowanych informacją kwantową w obrazowaniu. Największym wyzwaniem było przełożenie tych idei na sferę czasu i częstotliwości.

Wystarczy obrócić obraz

W superrozdzielczym obrazowaniu kwantowym światło pochodzące z obiektu jest dzielone na dwa ramiona interferometru. Jedno ramię zawiera urządzenie, które odwraca obraz. Następnie odwrócona część interferuje z oryginalną. Na przykład, jeśli istnieje tylko jeden mały emiter idealnie wyrównany z osią inwersji, jego odwrócony obraz będzie identyczny z oryginalnym. W tym przypadku nie widzielibyśmy żadnych fotonów w jednym z portów interferometru. Jednak gdy tylko emiter zostanie przesunięty, jego odwrócony obraz stanie się inny od oryginalnego, a fotony pojawią się w tym porcie. Ich liczba jest bardzo dobrym wskaźnikiem tego, jak bardzo emiter został poruszony. Idąc o krok dalej, możemy wyobrazić sobie dwa emitery, które są rozdzielone symetrycznie wokół osi inwersji. Każdy z emiterek będzie miał taki sam udział w zliczonych fotonach, dlatego zmierzaliśmy odległość między dwoma emiternami. Jak w przypadku każdego pomiaru, ma on ograniczoną precyzję, ale okazuje się, że precyzja ta może być znacznie lepsza w porównaniu do bezpośredniego obrazowania emiterek za pomocą kamery.

Manipulowanie czasem i kolorem

W sferze czasu i częstotliwości pomysły te są nadal aktualne. Zamiast myśleć o małych emiternach, skupmy się na impulsach światła. Impulsy pojawiają się w tym samym czasie, ale każdy z nich ma nieco inny kolor, ponieważ pochodzą z różnych kanałów optycznych lub różnych linii spektroskopowych. W standardowym podejściu, zamiast bezpośredniego patrzenia za pomocą kamery, należałoby najpierw użyć urządzenia rozpraszającego, takiego jak siatka dyfrakcyjna lub pryzmat, które wysyłałoby różne kolory do różnych pozycji na czujniku kamery. W przypadku dwóch ściśle oddzielonych impulsów, te rozkłady częstotliwości będą w większości nakładać się na siebie, ograniczając precyzję, z jaką można zmierzyć separację. Dzięki SUSI możemy poprawić tę precyzję.

Ale jak możemy zaimplementować inwersję na częstotliwościach? Rozwiązanie tego problemu było kluczowym krokiem w projektowaniu SUSI. Podstawową obserwacją było to, że zamiast umieszczać inwerter w pojedynczym ramieniu interferometru, możemy uzyskać ten sam wynik za pomocą transformaty Fouriera w jednym ramieniu i odwrotnej transformaty Fouriera w drugim ramieniu. Taka konstrukcja tworzy bardzo zrównoważone i skalowalne urządzenie, które zostało następnie zbudowane przez doktoranta Michała Lipkę pod kierunkiem dr. hab. Michała Parniaka, kierownika laboratorium i adiunkta w Zakładzie Optyki Wydziału Fizyki UW. Oba ramiona interferometru mają porównywalne straty, a urządzenia do odwrotnej i bezpośredniej transformaty Fouriera są bardzo podobne. Co więcej, wszystkie elementy użyte w interferometrze SUSI nadają się do zaimplementowania na chipie fotonicznym, co zwiększa zakres stosowania SUSI - zintegrowany w superspektrometrach lub urządzeniach dla sieci optycznych zapewnia co najmniej dwukrotną poprawę rozdzielczości. Naukowcy z UW przewidują więc, że nowe urządzenie, które powstało dzięki dofinansowaniu z Narodowego Centrum Nauki poprzez grant PRELUDIUM, znajdzie fascynujące zastosowania w telekomunikacji, badaniach materii czy badaniach astronomicznych.

Projekt „Quantum Optical Technologies” (MAB/2018/4) był realizowany w ramach programu Międzynarodowe Agendy Badawcze Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanego ze środków UE pochodzących z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Centrum Optycznych Technologii Kwantowych QOT UW, znajdujące się w CeNT – Centrum Nowych Technologii, jest jednostką badawczą poszukującą praktycznych zastosowań najnowszych odkryć optyki kwantowej.

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

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 wchodzi Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych Fizyki oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 250 nauczycieli akademickich. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ponad 1100 studentów i ok. 170 doktorantów. Uniwersytet Warszawski w rankingu szanghajskim dla poszczególnych dziedzin (Shanghai's Global Ranking of Academic Subjects) znajduje się wśród 150 najlepszych na świecie jednostek, kształcących w dziedzinie fizyki.

PUBLIKACJA NAUKOWA:

M. Lipka, M. Parniak, Super-resolution of ultrafast pulses via spectral inversion, Optica 11, 1226-1234 (2024)
DOI: 10.1364/OPTICA.522555
<https://opg.optica.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-11-9-1226&id=557206>

KONTAKT:

Dr hab. Michał Parniak
mparniak@fuw.edu.pl
+48 22 55 43 786

Michał Lipka
mj.lipka@uw.edu.pl
+48 22 55 32 629

POWIAZANE STRONY WWW:

<https://www.fuw.edu.pl>
Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

<https://www.qodl.eu>
Laboratorium Urządzeń Kwantowo-Optycznych UW

<https://qot.cent.uw.edu.pl>
Centrum Optycznych Technologii Kwantowych UW

<http://optics.fuw.edu.pl>
Zakład Optyki Wydziału Fizyki UW

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

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW240912b_fot01.jpg

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2024/FUW240912b_fot01.jpg

Soczewka częstotliwościowa wykorzystująca wielokrotną dyfrakcję na siatce dyfrakcyjnej. Impuls światła ulega transformacji w częstotliwości analogicznej do wiązki światła przechodzącej przez rzeczywistą soczewkę. (fot. M. Lipka, Uniwersytet Warszawski)

FUW240912b_fot02.jpg

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2024/FUW240912b_fot02.jpg

Elektrooptyczna soczewka czasowa. Impuls światła zsynchronizowany z elektronicznym sygnałem sterującym ulega transformacji w czasie, analogicznej do wiązki światła przechodzącej przez rzeczywistą soczewkę. (fot. Uniwersytet Warszawski)