

Ściskajcie a... zmierzycie – ściśnięte stany światła optymalne w wykrywaniu fal grawitacyjnych

2013-11-13



Detektor fal grawitacyjnych w Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) [źródło: www.ligo.caltech.edu]

Ekstremalnie dokładne pomiary odległości to kluczowy element wszystkich technik detekcji fal grawitacyjnych. Aby zwiększyć ich precyzję, fizycy zaczęli wykorzystywać efekty kwantowe związane z fotonami. W pracy opublikowanej w czasopiśmie "Physical Review A" polscy i niemieccy fizycy pokazują, że nie jest konieczne przygotowywanie bardziej wyrafinowanych kwantowych stanów światła niż obecnie eksperymentalnie dostępne tzw. stany ściśnięte.

Od niemal wieku fale grawitacyjne pozostają niepotwierdzonym przewidywaniem ogólnej teorii względności. Drgania czasoprzestrzeni są najprawdopodobniej tak subtelne, że umykają nawet najlepszym współczesnym detektorom, interferometrom laserowym LIGO i GEO 600. Niedawno na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (FUW) wykazano, że czułość tych przyrządów można poprawić wykorzystując efekty kwantowe związane ze światłem. Obecnie zespół fizyków z FUW i Uniwersytetu w Hanowerze udowodnił, że dostępne eksperymentalnie stany ściśnięte światła są optymalne z punktu widzenia wykorzystania własności kwantowych do zwiększenia precyzji pomiarów.

"Nasz wynik dotyczy całej metrologii kwantowej. Jego znaczenie praktyczne jest jednak szczególnie ważne dla fizyków zajmujących się poszukiwaniem fal grawitacyjnych, bo to właśnie oni dokonują najbardziej ekstremalnych pomiarów odległości", zauważa dr Rafał Demkowicz-Dobrzański (FUW).

Ogólna teoria względności przewiduje, że źródłami fal grawitacyjnych mogą być m.in. ciasne układy podwójne, składające się z bardzo gęstych ciał niebieskich, takich jak gwiazdy neutronowe czy czarne dziury. Jednak nawet w przypadku tak egzotycznych obiektów rozchodzące się zaburzenia czasoprzestrzeni będą niezwykle subtelne.

Przechodząca przez Ziemię fala grawitacyjna powinna nieznacznie zmieniać rozmiary obiektów. Sposobem na jej wykrycie są więc bardzo dokładne pomiary długości. Odpowiednią precyzję mogą zapewnić tylko interferometry, przyrządy, w których wykorzystuje się wiązki światła laserowego i zjawisko interferencji (nakładania się fal).

Typowy detektor fal grawitacyjnych jest interferometrem z dwoma prostopadłymi ramionami. Wiązki światła laserowego, każda po przebiegnięciu swojego ramienia, interferują ze sobą tworząc charakterystyczny układ prążków interferencyjnych. Gdyby przechodząca przez przyrząd fala grawitacyjna zmieniła długość jednego z ramion nieco inaczej niż drugiego, grzbiety i doliny fal świetlnych z obu ramion przesunęłyby się względem siebie i zmieniły układ prążków.

Amerykański detektor fal grawitacyjnych LIGO, najczulszy z dotychczas zbudowanych, to zespół trzech interferometrów z ramionami długości od 2 do 4 km. Mimo tak dużych rozmiarów ramion nawet najsilniejsze fale grawitacyjne mogą zmienić ich długość co najwyżej o jedną miliardową jednej miliardowej metra (czyli o $0,000000000000000001$ m). LIGO działa obecnie na granicy detekcji fal grawitacyjnych. Fizycy nie są jednak w stanie ich zauważyć, bo sygnały zwiastujące przejścia fal grawitacyjnych nadal giną w szumie tła. Dalszy wzrost dokładności pomiarów można uzyskać dzięki wykorzystaniu kwantowych własności fotonów we wiązkach laserowych.

Zwykle źródła emitują światło chaotyczne, o różnych długościach fal i w różnych kierunkach. Fotony zachowują się wtedy jak przypadkowi ludzie na placu – każdy idzie swoim krokiem tam, dokąd chce. Światło laserowe jest już znacznie bardziej uporządkowane: fala związana z każdym fotonem ma tę samą długość, drga w tej samej fazie i z dobrym przybliżeniem biegnie w tym samym kierunku co inne. Takie światło przypomina kolumnę żołnierzy, maszerujących zgodnym krokiem w jedną stronę.

Analogia między światłem laserowym a kolumną żołnierzy jest jednak nieco myląca. Każdy foton w wiązce laserowej zachowuje się bowiem tak, jakby nadal był sam – w ogóle nie zauważa innych. Ktoś zatem uformował kolumnę doskonale wytrenowanych żołnierzy-fotonów (odpowiednio wściekły kapral lub urządzenie laserowe) i kazał im iść przed siebie, lecz nie wziął pod uwagę, że żołnierze są całkowicie ślepi i głusi. Każdy po prostu idzie w przód, mimo że kapral, który pilnował porządku, został daleko z tyłu.

"W rzeczywistej kolumnie żołnierze dobrze wiedzą co właśnie robią koledzy i ustawicznie korygują swój ruch w zależności od działań sąsiadów. Może nie robią tego w pełni świadomie, ale robią z całą pewnością, bo tylko informacja o poczynaniach sąsiadów pozwala długo utrzymywać spójność formacji. Żeby fotony zachowywały się w analogiczny sposób, trzeba użyć efektów kwantowych, na przykład splątania kwantowego", wyjaśnia dr Demkowicz-Dobrzański.

W celu zwiększenia czułości pomiarów, w 2011 roku w europejskim interferometrze GEO 600 pod Hanowerem użyto światła laserowego znajdującego się w specjalnie przygotowanym stanie kwantowym, tzw. ściśniętej próżni. W fizycznej próżni mogą istnieć pola elektryczne i magnetyczne, lecz ich średnie wartości wynoszą zero. W optyce kwantowej nie jest możliwy jednoczesny precyzyjny pomiar wartości pola elektrycznego i magnetycznego fali świetlnej. Wartości te podlegają zasadzie nieoznaczoności: im lepiej znamy jedną, tym gorzej drugą. Stan ściśniętej próżni nadal ma zerowe średnie wartości pól elektrycznych i magnetycznych, jednak jest tak skonstruowany, że można dokonywać precyzyjnych pomiarów wartości jednego z pól (kosztownością wiedzy o drugim). Wykorzystanie kwantowo skorelowanych fotonów pozwoliło zwiększyć czułość interferometru GEO 600 na przesunięcia luster na końcach jego ramion o ok. 30%.

Apetyt rośnie w miarę jedzenia. Czy użycie bardziej wyrafinowanych kwantowych stanów światła, z wieloma fotonami, nie mogłoby być drogą do dalszego zwiększania dokładności pomiarów? Teoretyczna analiza zagadnienia pozwoliła fizykom z FUW znaleźć odpowiedź na to pytanie. Kluczowym elementem

analizy były straty fotonów, które w detektorach fal grawitacyjnych wynoszą ok. 30%. Gdy w zwykłej wiązce laserowej ginie część fotonów, wiązka słabnie, lecz jej ogólne własności się nie zmieniają. W przypadku stanów kwantowych, w których uczestniczy wiele fotonów, strata jednego oznacza zniszczenie kwantowych korelacji między pozostałymi. Zapewnienie złożonym stanom kwantowym trwałości pozwalającej na przeprowadzanie dokładniejszych pomiarów staje się w tej sytuacji bardzo trudne.

"Wszystko wskazuje na to, że fizycy doświadczalni osiągnęli poziom optymalnego wykorzystania stanów kwantowych dla zwiększania czułości interferometrów za pomocą zjawisk kwantowych. Nawet jeśli spróbujemy użyć bardziej subtelnych stanów kwantowych światła, z obecnie działających urządzeń nie wyciśniemy już wiele więcej", podsumowuje dr Demkowicz-Dobrzański.

Wynik grupy fizyków z FUW i Uniwersytetu w Hanowerze ma istotne znaczenie praktyczne. Oznacza, że nie jest konieczne przygotowywanie bardziej subtelnych stanów kwantowych niż stany ściśnięte światła, a dodatkowe podniesienie czułości detektorów fal grawitacyjnych będzie możliwe przede wszystkim dzięki zmianom w geometrii przebiegu wiązek światła przez interferometry, zmniejszaniu strat, bądź poprzez znaczne zwiększanie długości ich ramion. W tym drugim przypadku naturalnym kierunkiem rozwoju staje się budowa odpowiednich przyrządów w kosmosie.

Prace zespołu teoretyków z FUW sfinansowano ze środków 7. Programu Ramowego Unii Europejskiej w ramach grantów Fundacji na rzecz Nauki Polskiej oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

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 Instytut: 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 niemal 80 pracowników z tytułem profesora. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ok. 1000 studentów i ponad 140 doktorantów.

KONTAKTY DO NAUKOWCÓW:

dr Rafał Demkowicz-Dobrzański
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel. +48 22 5532306
email: rafal.demkowicz-dobrzanski@fuw.edu.pl

Prof. Konrad Banaszek
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel. +48 22 5532306
email: konrad.banaszek@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:

Materiały ilustracyjne do informacji prasowej można znaleźć na stronach detektorów LIGO i GEO 600:

[Strona ze zdjęciami detektora LIGO](#)
[Strona ze zdjęciami detektora GEO 600](#)

 [2013-11-13_FUW131113a - Kwantowe pomiary odleglosci.pdf \(108.8 kB\)](#)