

Coraz bliżej zbadania kwantowej natury grawitacji

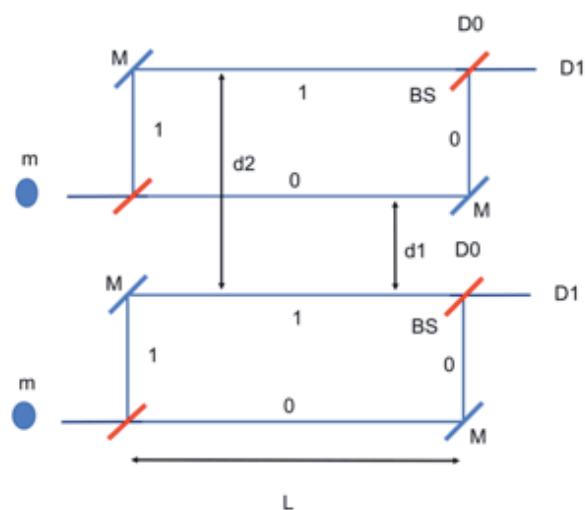
Marcin Majka

Nieuchwytna, pozornie nieistniejąca kwantowa natura grawitacji może wreszcie zostać zademonstrowana eksperymentalnie. Dwie niezależnie pracujące grupy naukowców z Wielkiej Brytanii: pierwsza pod przewodnictwem Chiara Marletto z Uniwersytetu w Oksfordzie oraz druga kierowana przez Sougato Bose z University College London, zaproponowały eksperymenty, które mogą po raz pierwszy ujawnić związek między teoriami mechaniki kwantowej a ogólną teorią względności.

W różnych dziedzinach nauki, mechanika kwantowa oraz ogólna teoria względności Einsteina działają bardzo dobrze, bez względu na to, jakie problemy mają do rozwiązania fizycy. Jednak niektóre wychodzące z nich zasady fizyczne wydają się być zasadniczo niezgodne ze sobą. Lekarstwem na te i inne bolączki ma być zuniifikowana teoria kwantowej grawitacji, która stara się połączyć mechanikę kwantową z ogólną teorią względności Einsteina. Największym problemem jest bardzo mała siła z jaką oddziałuje grawitacja w porównaniu do innych sił przyrody. Nawet siła elektrostatyczna pomiędzy dwoma elektronami jest w stanie przewyciężyć o kilka rzędów wielkości siłę grawitacji między dwoma obiektami o masie jednego kilograma.

Nieemożliwy test

Jak dotąd, teorie dotyczące kwantowej natury grawitacji wydawały się praktycznie niemożliwe do zbadania. Wszystkie teorie począwszy do grawitonów, które przenoszą pole grawitacyjne w podobny sposób jak fotony



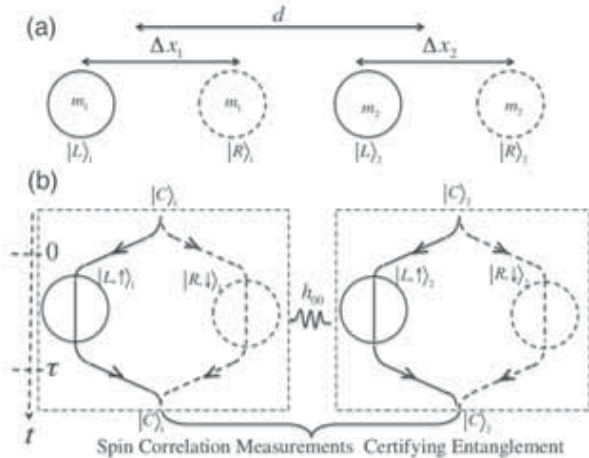
Rys. 1. Układ interferometrów dwóch identycznych mas (m) zaproponowany przez zespół Chiara Marletto. Interferometry mają długość L oraz poszczególne ścieżki oddalone są od siebie o $d1$ i $d2$. Oznaczenia: M (mirror) – lustro, BS (beam splitter) – zwierciadło półprzeźroczyste, D_i (detector) – detektor wiązki i -tej, gdzie $i = 0, 1$ [2].

pole elektromagnetyczne, skończywszy na teorii strun czy też pętlowej grawitacji kwantowej, pozostają jedynie w sferze spekulacji.

Pierwsze kroki niezbędne do opracowania eksperymentu zbadania grawitacji kwantowej podjął Richard Feynman [1]. Zaproponował on eksperyment myślowy, w którym badana masa jest wprowadzana w stan superpozycji dwóch różnych lokalizacji, a następnie wprowadzana jest w interakcję z polem grawitacyjnym. W wyniku tej interakcji następuje splątanie masy i pola. Gdyby więc

dwa stany przestrzenne masy mogłyby interferować ze sobą, to w konsekwencji, interferencja przywróciłaby z powrotem masie pojedynczy dobrze określony stan położenia przestrzennego. Sprzężenie z polem grawitacyjnym zostałoby w konsekwencji odwrócone, pokazując, że grawitacja jest spójnie sprzężona z badanym układem kwantowym. Feynman miał nadzieję, że ten eksperyment potwierdzi kwantową naturę pola grawitacyjnego.

Zespół prof. Marletto uważa, że zaproponowany przez Feynmana eksperyment nie jest dość dokładny dla takiego subtelnego oddziaływania jakim jest grawitacja kwantowa [2]. Naukowcy uważają, że interferencja dwóch stanów przestrzennych masy mogłaby wystąpić nawet w obecności klasycznych pól grawitacyjnych. Zatem, eksperyment Feynmana nie udowodniłby, że masa i pole zostały splątane, chyba, że splątanie można byłoby obserwować bezpośrednio. Dlatego pole grawitacyjne nie musi być skwantowane. Pozostaje pytanie otwarte: jaki dokładnie atrybut mierzonej masy należy zbadać, aby zaobserwować kwantową naturę pola grawitacyjnego?



Rys. 2. Układ dwóch sąsiadujących interferometrów do badania kwantowej natury grawitacji, zaproponowany przez zespół Sougato Bose: (a) Dwie masy znajdujące się obok siebie, będące w superpozycji zlokalizowanych przestrzennie stanów $|L\rangle$ i $|R\rangle$. (b) sąsiadujące interferometry, w których początkowy stan $|C\rangle$ badanych mas jest rozdzielony w zależności od spinów do stanów $|L, \uparrow\rangle$ oraz $|R, \downarrow\rangle$. Ewolucja w ramach wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego przez pewien czas t spląta badane masy poprzez nadanie odpowiednich faz składowym superpozycji. To splątanie może wynikać jedynie z wymiany „mediatorów” kwantowych, przy założeniu, że wszystkie oddziaływania poza grawitacyjnym są nieobecne (h_{00} oznacza słabe oddziaływanie grawitacyjne między masami). Splątanie wykazujące skwantowaną grawitację można zweryfikować, mierząc korelację spinów między interferometrami. m_1 i m_2 – badane masy, d – odległość między badanymi masami, Δx_1 i Δx_2 – dystans między stanami przestrzennymi $|L\rangle$ i $|R\rangle$ [3].

Splątanie dwóch mas

Zespoły Bose i Marletto uważają, że ich propozycje stanowią ulepszenie pomysłu Feynmana. Opierają się one na sprawdzeniu, czy masa może zostać splątana z drugą identyczną masą w wyniku działania na nie polem grawitacyjnym. W tym celu obie masy przygotowano przy użyciu dwóch przylegających do siebie, identycznych interferometrów. Urządzenia te są zwykle używane do dzielenia fal świetlnych na osobne wiązki, które następnie mogą ulegać zaburzeniu. Jednak, kiedy

bardzo małe masy zostaną wprowadzone do interferometrów, ich kwantowe funkcje falowe mogą zostać rozdzielone oraz poddane interferencji. Zespół Marletto widzi w tym momencie problem związany z samą naturą eksperymentu. Mianowicie naukowcy uważają, że każdy układ, który ma pośredniczyć w splątaniu dwóch układów kwantowych, sam musi też być kwantowy [2]. Natomiast zespół Bosego w swoim artykule, rozszerza omawiany eksperyment o szczegóły związane z użyciem dwóch stanów spinowych, aby utworzyć przestrzenną superpozycję mas [3].

Oba zespoły zdały sobie sprawę z tego, że jeśli pole grawitacyjne ma prawdziwie kwantowy charakter, to przyciąganie grawitacyjne między dwiema masami spowodowałoby ich splątanie. Jednak ten stan splątania trwałby tak długo aż masy nie opuściłyby interferometrów. Podobnie jak w eksperymencie Feynmana, pierwsza masa może zostać splątana z polem grawitacyjnym. Jednak tu, w przeciwieństwie do eksperymentu Feynmana, nie jest wymagana interakcja z polem grawitacyjnym, dopóki druga masa będzie używana jako „świadek” kwantowych własności pierwszej masy. Pozwoliłoby to udowodnić, że klasyczne pola grawitacyjne nie mogą być odpowiedzialne za interferencję mas.

Niepożądany efekt

Zarówno zespół Bosego jak i Marletto przyznają, że postawione przez nich wyzwania eksperymentalne, w świetle obecnych braków technologicznych, nie dają gwarancji sukcesu. Jeśli eksperymenty nie zostaną przeprowadzone wystarczająco starannie, inne mocniejsze siły, jak Casimira, Van der Waals lub dowolne niechciane interakcje elektromagnetyczne, mogą naśladować pożądane przez badaczy skutki grawitacji, powodując splątanie mas. Równie dobrze badane masy mogą nie ulec splątaniu nawet jeśli przyjmemy, że pole grawitacyjne jest skwantowane. Wszystko dlatego, ponieważ natura grawitacji kwantowej może się okazać jeszcze bardziej subtelniejsza niż przewidują to naukowcy. Oznaczałoby to w konsekwencji, że zaobserwowanie splątania nie byłoby jednoznacznym dowodem na kwantową naturę pola grawitacyjnego. Należy jednak być dobrej myśli, że proponowane przez zespoły Bosego i Marletto eksperymenty udowodnią kwantową naturę pola grawitacyjnego. Z drugiej jednak strony, naukowcy zdają sobie sprawę, że jeżeli ich eksperymenty zadziałają, to nadal nie rozstrzyganą sporu o to, która z wielu konkurencyjnych teorii kwantowej grawitacji jest poprawna.

Marcin Majka

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie

LITERATURA

- [1] R. Feynman, in Chapel Hill Conference Proceedings (1957)
- [2] C. Marletto and V. Vedral, Gravitationally Induced Entanglement between Two Massive Particles is Sufficient Evidence of Quantum Effects in Gravity, Phys. Rev. Lett. 119, 240402
- [3] S. Bose, A. Mazumdar, G. W. Morley, H. Ulbricht, M. Toroš, M. Paternostro, A. A. Geraci, P. F. Barker, M. S. Kim, and G. Milburn, Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity, Phys. Rev. Lett. 119, 240401