



Nagroda Nobla z fizyki 2012

Wojciech Gawlik
Instytut Fizyki UJ

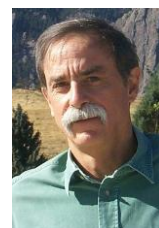
Tegoroczna Nagroda Nobla z fizyki została przyznana Serge'owi Haroche'owi z École Normale Supérieure i Collège de France w Paryżu oraz Davidowi J. Winelandowi z National Institute of Science and Technology w Boulder w stanie Colorado w USA. Decyzją Komitetu Noblowskiego nagrodę tę przyznano za **przełomowe doświadczenia pozwalające na pomiary i manipulacje indywidualnymi układami kwantowymi**.

Za tym bardzo ogólnym komunikatem kryją się niezwykle pomysłowe pomiary oddziaływań pojedynczych fotonów (z zakresu optycznego i mikrofal) z pojedynczymi atomami i jonami. Obaj laureaci pracowali nad różnymi eksperymentami i stosowali bardzo odmienne metody. Wspólną cechą ich prac było to, że pozwalały one na zbadanie najbardziej fundamentalnych cech oddziaływań pojedynczych obiektów kwantowych – fotonów i atomów (neutralnych bądź naładowanych – czyli jonów), a następnie przeprowadzenie fascynujących doświadczeń z tak niezwykłymi próbkami. Niezwykłymi, bowiem mówiąc o fotonach z reguły odnosimy się do strumieni ogromnej liczby cząstek (dla przykładu, w słabej wiązce lasera emitującego promieniowanie widzialne o mocy zaledwie 1 mW mamy ok. 10^{15} fotonów na sekundę). Tymczasem w doświadczeniach tegorocznych noblistów eksperymentuje się z pojedynczymi fotonami oddziałującymi z pojedynczymi atomami i jonami. Biorąc pod uwagę, że fotony zawsze poruszają się* (prędkość światła w próżni to 300 000 km/s), eksperymentowanie z pojedynczymi fotonami jest skrajnie trudne.

Ogromnym osiągnięciem Haroche'a i Winelanda było stworzenie pułapek na fotony oraz atomy/jony pozwalających na badanie takich oddziaływań. Samo pułapkowanie, a także umiejętność spowalniania ruchu (chłodzenie) atomów, nie jest już wielką nowością. Już w 1989 roku za opracowanie metod pułapkowania i chłodzenia jonów w pułapkach jonowych przyznano Nagrodę Nobla Wolfgangowi Paulowi i Hansowi Dehmeltowi, a w 1997 roku za chłodzenie



Serge Haroche



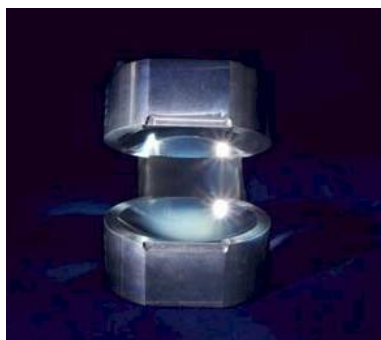
David J.
Wineland

* Kilka lat temu sporą sensację w mediach spowodowały doniesienia o „spowolnieniu i zatrzymaniu fotonu”. Te zjawiska to jednak co innego niż faktyczne zatrzymanie światła. Polegają one na przemianie światła oddziałującego z układem atomów na specyficzny rodzaj wzbudzenia nazywany *polarytonem*. Polaryton może być zmagazynowany w atomie przez pewien kontrolowany czas, po czym ponownie odtworzony, co z pewną przesadą bywa interpretowane jako zatrzymanie światła.

i pułapkowanie neutralnych atomów Nagrodę Nobla otrzymali Claude Cohen-Tannoudji, Steven Chu i William Phillips. W tegorocznej nagrodzie wyróżniono coś więcej – umiejętność manipulowania kwantowymi stanami spułapkowanych cząstek.

Mimo wspólnego zainteresowania kwantowymi aspektami, prace obu laureatów różnią się: Haroche bada fotony uwięzione w rezonatorach przesyłając przez nie atomy, Wineland zaś pułapkuje jony w pułapkach elektromagnetycznych i bada je za pomocą fotonów.

Pułapkowanie fotonów polega na stworzeniu specjalnych rezonatorów (wnęki rezonansowych), czyli układów złożonych ze zwierciadeł wielokrotnie odbijających promieniowanie z bardzo małymi stratami (fot. 1). Aby te straty zminimalizować, zwierciadła, jakie stosuje zespół Haroche'a, są nie tylko znakomicie wypolerowane, ale też wykonane z nadprzewodzącego niobu i utrzymywane w temperaturze 0,8 K. W tak niskiej temperaturze



Fot. 1. Fotografia zwierciadeł rezonatora stosowanych przez grupę Haroche'a (fot. M. Brune)

drgania sieci krystalicznej są niemal całkowicie wytłumione, a termiczne promieniowanie zwierciadeł staje się zaniedbywalnie słabe. Zwierciadła wykorzystywane przez zespół Haroche'a pozwalają na przeszło 10^{10} odbić, zanim zmagazynowana w rezonatorze energia światła spadnie poniżej $1/e$. Oznacza to, że przy odległości luster równej 2,7 cm droga, jaką światło przebiega pomiędzy lustrami, jest bliska 40 000 km, czyli obwodowi równika Ziemi! Na przebyciu tej drogi światło potrzebuje około $1/10$ s, co jest wystarczająco długim czasem na przeprowadzenie pomiarów.

Spośród licznych pomiarów, jakie wykonali Serge Haroche i jego współpracownicy, wymienimy tu obserwację periodycznej wymiany energii pomiędzy pustym rezonatorem (tzw. próżnią fotonową, kiedy nie ma żadnych zewnętrznych źródeł fotonów, a promieniowanie występuje jedynie jako kwantowe fluktuacje) a atomem. Do takiej wnęki rezonansowej wpuszczany jest strumień atomów tak rzadki, że w czasie przelotu przez rezonator znajduje się w nim co najwyżej jeden atom. Atomy te są wzbudzone do bardzo wysokiego poziomu, a aparatura detekcyjna pozwala na sprawdzenie czy atom wyleci z wnęki w tym samym stanie, w jakim do niej wleciał, czy też przejdzie do innego – niższego. Jeśli atom przejdzie do niższego stanu to wypromieniuje jeden kwant energii – foton – który zostanie spułapkowany przez rezonator. W pierwotnie pustym rezonatorze pojawi się więc foton, który będzie mógł być pochłonięty przez atom i ponownie go wzbudzić. W ten sposób atom będzie mógł cyklicznie wymieniać energię z polem elektromagnetycznym w rezonatorze (rysunek w ramce). Proces ten znany jest w fizyce jako oscylacje Rabiego (od urodzonego

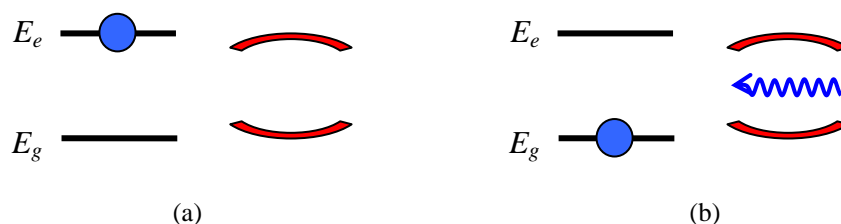
w 1908 roku w Rymanowie amerykańskiego fizyka Izaaka Rabiego – laureata Nagrody Nobla z 1944 r.). W doświadczeniu Haroche’a niezwykle jest to, że te oscylacje nazywane *próżniowymi oscylacjami Rabiego* zachodzą bez żadnych zewnętrznych źródeł, jedynie pod wpływem fluktuacji próżni kwantowej.

Próżniowe oscylacje Rabiego – cykliczna wymiana energii związana z emisją

Z perspektywy elektrodynamiki kwantowej pusta przestrzeń jest interpretowana jako ocean fluktuujących fotonów, które są kreowane i anihilowane w bardzo krótkich odstępach czasu. W stanie próżni średnia energia takich fluktuacji wynosi $\frac{1}{2} h\nu$ na każdy rodzaj drgań pola elektromagnetycznego o częstotliwości ν .

Obecność rezonatora o dużym współczynniku dobroci sprawia, że spośród wszelkich możliwych fluktuacji próżni, prawdopodobieństwo fluktuacji z częstotliwością rezonatora jest większe niż dla otwartej przestrzeni, zaś prawdopodobieństwo fluktuacji o innych, niezrezonansowych częstotliwościach, staje się zaniedbywalne.

Jeśli do rezonatora wlatuje jeden atom wzbudzony do metatrwałego (żyjącego długo) stanu e o energii E_e , a częstota rezonansowa rezonatora jest dopasowana do częstoty przejścia w atomie $(E_e - E_g)/h$ (gdzie h oznacza stałą Plancka), to możliwe są przejścia do stanu o niższej energii E_g , wymuszone przez fluktuacje próżni. Po takim przejściu atom znajduje się w stanie o niższej energii, a w rezonatorze zostaje zdeponowany jeden foton. Taki foton z kolei może zostać pochłonięty przez atom w stanie g , w wyniku czego atom się wzbudzi ponownie do stanu e , a foton zniknie – pole powróci do stanu próżni. Jeśli czasy życia atomu i jego przelotu przez rezonator oraz czas życia fotonu w rezonatorze są dostatecznie długie, proces ten będzie się powtarzał w sposób cykliczny z częstotliwością określoną przez siłę sprzężenia atom-pole. Takie cykliczne oscylacje między stanem, w którym mamy zero fotonów (próżnię fotonową) i jeden atom wzbudzony do stanu e (rys. a) oraz stanem, w którym mamy jeden foton i atom w stanie o niższej energii (rys. b), nazywamy próżniowymi oscylacjami Rabiego. Jest to efekt typowo kwantowy, a nie klasyczny.



Schematycznie przedstawiony atom wzbudzony do poziomu E_e i pusty rezonator

Atom przeszedł do niższego stanu E_g wysyłając foton, który został zmagnetyzowany w rezonatorze

Kolejne doświadczenia grupy Haroche’a pozwoliły na przeprowadzenie wielu innych fascynujących doświadczeń. Między innymi zademonstrowano możliwość „nieniszczącej” rejestracji fotonów. Działanie wszystkich stosowanych

dotąd detektorów fotonów polegało na ich pochłanianiu, które mogło skutkować pojawieniem się jakiegoś mierzalnego sygnału. Haroche zauważył, że rezonatory zmieniają swoje właściwości zależnie od tego, ile jest w nich zgromadzonych fotonów, a zmiany te można badać za pomocą odpowiednio wzbudzonych atomów – bez pochłaniania, a więc bez niszczenia fotonów.

Prace Haroche'a zapoczątkowały tzw. elektrodynamikę kwantową atomów we wnękach rezonansowych (Cavity Quantum Electrodynamics, CQED) i stworzyły podstawy nowej dyscypliny – Informatyki Kwantowej.

Jeszcze dalej w kierunku informatyki kwantowej idą badania drugiego noblisty – Davida Winelanda. Główną motywacją zainteresowania uczonych informatyką kwantową jest możliwość równoległego przetwarzania kilku informacji. Staje się to możliwe, jeśli zamiast klasycznych jednostek informacji – *bitów*, które symbolizuje się w informatyce jako dwa stany „0” i „1” – dopuszczymy także tzw. stany superpozycji, które mogą przyjmować dowolne (choć kontrolowane) wartości z przedziału $[0,1]$. Takie „kwantowe bity” nazywamy *qubitami*. Znany przykład *qubitu* jest *kot Schrödingera*, który może istnieć w dwóch stanach równocześnie, jako żywy i jako martwy. Ten znany paradoksalny przykład jest często używany jako ilustracja fundamentalnie nieintuicyjnej natury mechaniki kwantowej.

Superpozycja kwantowa, qubit, kot Schrödingera

Próżniowe oscylacje Rabiego opisane powyżej zachodzą w cykliczny, powtarzalny sposób. Sytuacje przedstawione na rysunkach w pierwszej ramce stanowią dwa szczególne przypadki. Możliwe są jednak też realizacje sytuacji pośrednich. Na przykład takiej, kiedy atom jest pomiędzy stanem *e* i *g*. Matematycznie taką sytuację opisuje superpozycja (*kombinacja liniowa*) stanu, w którym oba szczególne przypadki występują z pewnym prawdopodobieństwem.

Stany superpozycji są wykorzystywane w protokołach informacji kwantowej jako qubity. Jeśli przedstawiamy dwa stany klasycznego bitu jako np. jednakowe prawdopodobieństwo wyrzucenia orzełka lub reszki przy rzucaniu monetą, to stan superpozycji – qubit – może być interpretowany jako sytuacja, w której wyrzucona moneta jest równocześnie i orzełkiem i reszką, tzn. zatrzymała się np. w pozycji pionowej. Spektakularnym przykładem stanu superpozycji jest tzw. kot Schrödingera, który jest równocześnie żywy i martwy.

Jednym z głównych osiągnięć Davida Winelanda było opracowanie metody doprowadzania spułapkowanych pojedynczych jonów do ich najniższego stanu kwantowego, kiedy to kwantowe drgania mają najniższą możliwą energię (stan próżni kwantowej). Realizacja tego stanu jest skrajnie trudna ze względu na wpływ oddziaływań układu kwantowego z otoczeniem, czyli dekoherencję.

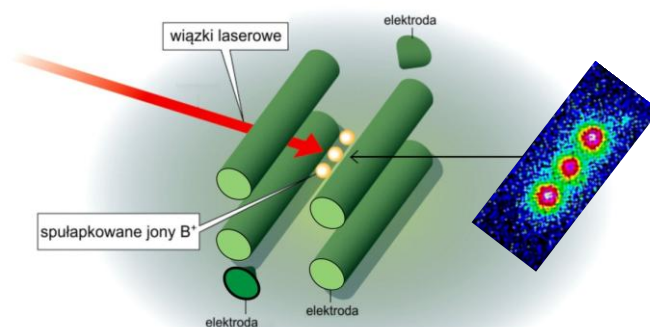
Innym sukcesem było zbudowanie kwantowej bramki logicznej, w której wykorzystano różne stopnie swobody pojedynczego jonu – różne stany elektro-

nowe i skwantowane oscylacje jonowe. Wybrany stan elektronowy pojedynczego jonu sprzęgnięto ze stanem oscylacji jonu w pułapce. Przez zastosowanie odpowiednich impulsów laserowych można było w zadany sposób zmieniać stan elektronowy działając wyłącznie na stan drgań jonu.

Pułapki jonowe

Odpowiednio ukształtowane pola elektrostatyczne i zależne od czasu radiowe i mikrofalowe pola elektromagnetyczne mogą wytworzyć jamę potencjału, w której można uwięzić (spułapkować) cząstkę materialną o jakimś ładunku elektrycznym. Pułapkowanymi cząstkami mogą być naładowane elektrycznie cząstki makroskopowe, ale też i jony (o ładunku dodatnim lub ujemnym), albo pojedyncze elektrony bądź protony. (Za opracowanie metod pułapkowania jonów i eksperymenty z pojedynczymi elektronami i jonami przyznano Nagrodę Nobla w 1989 roku Wolfgangowi Paulowi i Hansowi Dehmeltowi. W roku 1997 Nagrodę Nobla za opracowanie metod chłodzenia i pułapkowania neutralnych atomów otrzymali Claude Cohen-Tannoudji, Steven Chu i William Phillips).

Pierwsze pułapki jonowe stosowały quasi-sferyczne pułapki, ale we współczesnych eksperymentach używane są głównie pułapki o geometrii liniowej. Na poniższym rysunku przedstawiony jest schemat takiej liniowej pułapki, w której możliwe jest utrzymywanie kilku jonów schłodzonych do najniższego stanu kwantowego. Ponieważ jony są naładowane, oddziałują siłami kulombowskimi, co pozwala na ich wzajemne sprzężenie. Jak to zaznaczono w tekście powyżej, dobranie siły tego sprzężenia jest kluczowe dlatego, aby z jednej strony możliwa była komunikacja pomiędzy indywidualnymi jonami – qubitami, a z drugiej strony nie zachodziła szybka dekoherencja, czyli utrata superpozycji stanów.



Konstrukcja liniowej pułapki jonowej (rozwiniecie idei, za którą wyróżniono Wolfganga Paula Nagrodą Nobla z fizyki w 1989 r.). Do metalowych prętów przykładane jest napięcie stałe oraz oscylujące z częstością radiową. Odpowiednia konfiguracja pól i kształtu elektrod umożliwia uwięzienie jednej lub większej liczby naładowanych cząstek – np. jonów. Jony te można pobudzać do świecenia przez wzbudzenie światłem o odpowiedniej długości fali, a następnie obserwować ich świecenie za pomocą kamery. Po prawej stronie widoczne są trzy spułapkowane jony.

Kolejnym wielkim osiągnięciem było uzyskanie kontroli nad układami kilku splecionych jonów, których ruchy zostały wzajemnie sprzężone przez ich oddziaływania elektrostatyczne. W ten sposób zespół Winelanda potrafi wytwarzać bardzo rozmaite stany superpozycji różnych stopni swobody zarówno stanów elektronowych, jak i stanów charakteryzowanych przez różne sposoby drgań jonów w pułapce. Tymi stanami można manipulować nie tracąc ich kwantowych właściwości w sposób pozwalający na praktyczne realizacje układów informatyki kwantowej.

Prace Winelanda stanowią szereg systematycznych kroków na drodze do zbudowania komputera kwantowego. Dotychczas uruchomiono już różne elementy komputera i prace koncentrują się na scalaniu pojedynczych układów w większe systemy. To, czy komputer kwantowy kiedykolwiek okaże się lepszy od komputerów klasycznych – które przecież też są coraz doskonalsze – nie jest wcale oczywiste. Okazuje się bowiem, że wymagania stawiane praktycznym układom kwantowym są wzajemnie sprzeczne. Z jednej strony chcemy żeby pojedyncze układy były możliwie dobrze izolowane, aby ograniczyć ich dekoherencję, z drugiej zaś powinny ze sobą oddziaływać, aby umożliwić niezbędne ich sprzężenia. Może się więc okazać, że mimo postępu prac, praktyczne aspekty sprawiają, że taki komputer nie będzie dostatecznie konkurencyjny względem urządzeń klasycznych.

Gdyby tak się miało stać, nie oznaczałoby to wcale porażki informatyki kwantowej. Już teraz działają schematy kodowania i przesyłania informacji (kryptografia kwantowa) dające całkowite bezpieczeństwo – odporność na próby podsłuchiwania. Proponowane są różne sposoby zwiększenia dokładności pomiarów rozmaitych wielkości fizycznych wykorzystujące specyficzne prawa mechaniki kwantowej działające wyłącznie w układach pojedynczych cząstek kwantowych. Można więc stwierdzić, że mechanika kwantowa, w dużej mierze także dzięki pionierskim pracom tegorocznych noblistów, z egzotycznej nowej teorii staje się dojrzałą sztuką inżynierską.



Przyjęcie w Paryżu po ogłoszeniu laureatów Nagrody Nobla. Od lewej Antoine Heidemann (dyrektor Laboratorium Kastlera Brossela), Claude Cohen-Tannoudji (jeden z noblistów z 1997 r.) i Serge Haroche (który był pierwszym doktorantem Cohena-Tannoudjiego)



Eric Cornell (po lewej) i David Wineland. E. Cornell jest laureatem Nagrody Nobla z fizyki z 2004 r.