

NAGRODA NOBLA W 2012 ROKU ZA PRZEŁOMOWE METODY EKSPERYMENTALNE UMOŻLIWIAJĄCE POMIAR I MANIPULACJĘ POJEDYNCZYCH UKŁADÓW KWANTOWYCH

THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2012 FOR GROUND-BREAKING EXPERIMENTAL METHODS THAT ENABLE MEASURING AND MANIPULATION OF INDIVIDUAL QUANTUM SYSTEMS

Tomasz Melcer*

Politechnika Wroclawska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki,
Katedra Inżynierii Biomedycznej, 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

* e-mail: tomasz.melcer@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE

W 2012 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki otrzymali Serge Haroche i David J. Wineland „za przełomowe eksperymentalne metody, które umożliwiają pomiar i manipulację pojedynczych układów kwantowych”. Ich odkrycia pozwalają na wielokrotne obserwacje stanów kwantowych obiektów, takich jak fotony i jony, bez dekoherencji, czyli wymuszonego sprowadzenia tych cząsteczek na stałe do jednego z możliwych stanów. Przeprowadzone eksperymenty polegają na uwięzieniu cząsteczek w odpowiednich pułapkach jonowych schłodzonych do temperatur bliskich zeru absolutnemu, umieszczonych w próżni, a następnie wykorzystaniu różnic w sposobie oddziaływania cząsteczek na otoczenie w mierzonych stanach kwantowych. Te odkrycia wpłynęły na badania związane m.in. z komputerami kwantowymi i dokładnością pomiaru czasu.

Słowa kluczowe: Nagroda Nobla 2012, fizyka, systemy kwantowe

ABSTRACT

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded to Serge Haroche and David J. Wineland „for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems”. Their discoveries enable observing quantum states of objects, such as photons and ions, without decoherence, that is without forcefully making the particle choose one of the states. The experiments are based on trapping the particles in appropriate ion traps, cooled to temperatures close to the absolute zero, placed in vacuum, and then using the differences in interaction of the particles in different quantum states with the environment. These discoveries enabled advancements in studies of quantum computers and precise time measurements.

Keywords: Nobel Prize 2012, physics, quantum systems

1. Wstęp

W 2012 roku Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki została przyznana profesorowi Serge'owi Haroche, francuskiemu fizykowi pracującemu w Kolegium Francuskim (Collège de France) w Paryżu oraz profesorowi Davidowi Winelandowi, amerykańskiemu fizykowi pracującemu w Narodowym Instytucie Standaryzacji i Technologii (National Institute of Standards and Technology). W momencie przyznania nagrody obaj naukowcy mieli po 68 lat.

2. Odkrycie metod manipulacji i wielokrotnych pomiarów pojedynczych układów kwantowych

Mechanika kwantowa to sposób opisywania zjawisk zachodzących w obiektach o bardzo małych masach i rozmiarach, takich jak pojedyncze atomy czy cząstki elementarne.

Na początku dwudziestego wieku powszechnie panowało przekonanie, że poza zaledwie kilkoma słabo zbadanymi problemami, fizyka jest już nauką objaśnioną. Okazało się jednak, że w doświadczeniach prowadzonych w mikroskali, w procesach, w których biorą udział bardzo małe porcje materii, dotychczas znane prawa fizyki klasycznej nie sprawdzają się. Prawa fizyki klasycznej zakładały bowiem, że wszechświat ma naturę deterministyczną, tj. jeśli wiemy dokładnie gdzie są i jak poruszają się wszystkie cząsteczki, to możemy bezbłędnie przewidzieć, co się stanie w przyszłości. Jednak doświadczenia wskazywały na to, że w mikroświecie tak nie jest. Te odkrycia doprowadziły między innymi do sformułowania tzw. interpretacji kopenhaskiej, która stwierdza, że pewnymi procesami fizycznymi rządzi przypadek.

Aby dokładniej poznać prawa rządzące mechaniką kwantową, prowadzono doświadczenia, które wielokrotnie powtarzały dokładnie ten sam eksperyment. Gdyby mikroświat był deterministyczny, wynik każdego z identycznych eksperymentów powinien być ten sam. Przypadek rządzący mechaniką kwantową sprawiał, że wyniki były różne: przykładowo, gdy poruszający się foton musiał wybrać jedną z dwóch możliwych ścieżek, po których mógł się poruszać, czasem wybierał jedną z nich, czasem drugą. W pewnym sensie, foton wybiera obie te możliwości naraz i dopiero, kiedy chcemy sprawdzić gdzie jest foton, zaobserwujemy tylko jedną z nich. Nasza obserwacja chwilowo wymusi prawa mechaniki klasycznej na fotonie: foton „zdecyduje się” i będzie od tej chwili podążać jedną ścieżką. Każda kolejna obserwacja tego samego fotonu będzie więc na tej samej ścieżce. Dlatego też żeby sprawdzić, jak często w danej sytuacji możemy spodziewać się jednej możliwości, a jak często drugiej, musimy wielokrotnie powtórzyć ten sam eksperyment, za każdym razem z nowym fotonem.

Dzięki odkryciom Serge'a Haroche'a i Davida Winelanda wiemy teraz, że można zbadać stan takiego eksperymentu bez sprawiania, że sprawdzenie wymusi na cząstce wybór któregoś z możliwych stanów. W przypadku fotonu opisanego powyżej, dzięki odpowiedniej konstrukcji eksperymentu możemy wielokrotnie obserwować ten sam foton: raz zobaczymy go tak, jakby wybrał pierwszą możliwość, raz drugą, z prawdopodobieństwami, które są przewidywane przez mechanikę kwantową. To oznacza, że nie musimy już wielokrotnie przeprowadzać tego samego eksperymentu, żeby zbadać stan kwantowy.

Badania Serge'a Haroche'a i Davida Winelanda były niezależne. Serge Haroche badał fotony w specjalnych pułapkach optycznych, które były skonstruowane z bardzo precyzyjnie wykonanych półkolistych zwierciadeł o średnicy 5 cm. Zwierciadła umieszczone były w próżni i schłodzone do temperatur bliskich zeru absolutnemu, dzięki czemu fotony były znacznie rzadziej pochłaniane. W takich warunkach sytuacji pojedynczy foton odbijając się od zwierciadeł mógł przebyć nawet 40 000 km. To oznacza, że foton był zatrzymywany w takiej pułapce przez około 130 ms. Wtedy przez pułapkę przepuszczano atomy rubidu, specjalnie spreparowane przez wprowadzenie w tzw. stan Rydberga. Stan Rydberga polega na tym, że jeden z elektronów takiego atomu porusza się wyjątkowo daleko od jądra, dzięki czemu jest bardziej podatny na oddziaływanie. Foton uwięziony w pułapce powoduje, że ten elektron zostaje „wytracony z równowagi” (jego funkcja falowa się zmienia) i wprowadza dodatkowe wibracje w sposób jego poruszania się. Po opuszczeniu pułapki przez atom rubidu można zmierzyć te wibracje i stwierdzić, czy w momencie, gdy atom był w pułapce, foton też

tam był.

Obserwacje Davida Winelanda dotyczyły odwrotnej sytuacji: w pułapce jonowej umieszczono jon. Podobnie, jak w poprzednim doświadczeniu, próżnia i niska temperatura pozwalała na przedłużenie czasu, w którym jon utrzymuje się w pułapce. Odpowiednim impulsem lasera wprowadzano taki jon w dwa wykluczające się stany jednocześnie: spoczynku i wzbudzenia. Stany te można potem mierzyć bez sprawiania, że atom ostatecznie wybiera jeden z nich.

3. Sylwetki noblistów

Serge Haroche urodził się w Casablance w 1944 roku. W latach 1967–1975 pracował w Krajowym Centrum Badań Naukowych (*Centre National de la Recherche Scientifique*). W roku 1975 przyjął posadę profesora na Uniwersytecie Piotra i Marii Curie (*Université Pierre et Marie Curie*). W tym czasie pracował też w innych ośrodkach, m.in. w *École Polytechnique*, na Uniwersytecie Harvarda, na Uniwersytecie Yale i w *Conservatoire National des Arts et Métiers* w Paryżu. Od 2001 roku jest profesorem w Kolegium Francuskim.

Początkowo badał właściwości fizyczne atomów w stanie Rydberga [1], co wykorzystał w nagrodzonym odkryciu. Przełomowa praca została opublikowana w 1990 roku [2]. Później zajął się badaniami nad komputerami kwantowymi, których efektem są m.in. prace dotyczące pamięci kwantowej [3] czy superprzewodzących układów atomowych [4].

David Wineland urodził się w 1944 roku. Uczył się na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley (*University of California, Berkeley*), gdzie uzyskał licencjat w roku 1965. W 1970 na Uniwersytecie Harvarda uzyskał stopień doktora za pracę na temat maserów deuterowych [5]. W 1975 roku dołączył do Narodowego Instytutu Standaryzacji i Technologii, gdzie pracuje do dzisiaj.

Osiągnięciem, które umożliwiło rozpoczęcie badań związanych z pomiarami stanów kwantowych było opracowanie efektywnej metody schładzania jonów [6]. Obserwacja efektu skoków kwantowych, która jest podstawą przyznania Nagrody Nobla, została opisana w pracy [7]. Jego późniejsze prace dotyczą m.in. zegarów kwantowych [8].

4. Podsumowanie

Oba odkrycia znalazły już zastosowania w praktyce. Haroche wykorzystał swoje badania do budowania komputerów kwantowych, których najważniejszą cechą jest możliwość szybkiego rozwiązywania niektórych problemów matematycznych, głównie stosowanych w bezpieczeństwie komputerowym.

Odkrycie Winelanda pozwoliło na zbudowanie znacznie dokładniejszych zegarów atomowych. Zegary Winelanda są tak dokładne, że są w stanie wykryć dylatację czasu wynikającą ze szczególnej teorii względności Einsteina nawet przy prędkościach kilku kilometrów na godzinę.

LITERATURA

- [1] J.M. Raimond, P. Goy, M. Gross, C. Fabre, S. Haroche: *Statistics of millimeter-wave photon emitted by a Rydberg atom maser: an experimental study of fluctuations in single mode superradiance*, Physical Review Letters, vol. 49, 1982, s. 1924.
- [2] M. Brune, S. Haroche, V. Lefevre-Seguin, J.M. Raimond, N. Zagury: *Quantum Nondemolition measurement of small photon number by Rydberg atom phase sensitive detection*, Physical Review Letters, vol. 65, 1990, s. 976.
- [3] X. Maitre, E. Hagley, G. Nogues, C. Wunderlich, P. Goy, M. Brune, J.M. Raimond, S. Haroch: *Quantum memory with a single photon in a cavity*, Physical Review Letters, vol. 79, 1997, s. 769.
- [4] T. Nirrengarten, A. Qarry, C. Roux, A. Emmert, G. Nogues, M. Brune, J.M. Raimond, S. Haroche: *Realization of a superconducting atom-chip*, Physical Review Letters, vol. 97, 2006, 200405.
- [5] D.J. Wineland, N.F. Ramsey: *Atomic Deuterium Maser*, Physical Review A, vol. 5, 1972, s. 821.
- [6] D.J. Wineland, H. Dehmelt: *Line shifts and widths of axial, cyclotron and G-2 resonances in tailored, stored electron (ion) cloud*, International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics, vol. 16 (3), 1975, s. 338–342.
- [7] J.C. Bergquist, W.M. Itano, D. J. Winelan: *Recoilless optical absorption and Doppler sidebands of a single trapped ion*, Physical Review A, vol. 36, 1987, s. 428.
- [8] C.W. Chou, D.B. Hume, T. Rosenband, D.J. Wineland: *Optical Clocks and Relativity*, Science, vol. 329, 2010, s. 1630–1633.

otrzymano / submitted: 15.12.2014
wersja poprawiona / revised version: 22.12.2014
zaakceptowano / accepted: 29.12.2014