

Wielomodowa optyka kwantowa fal spinowych i fotonów

Michał Parniak

Niniejsza praca przedstawia rozwój wielomodowej pamięci kwantowej opartej na chłodzonym laserowo gazie atomów rubidu, poczynając od konstrukcji samej pułapki magnetooptrycznej aż do implementacji złożonych protokołów kwantowych na przechowywanych w pamięci falach spinowych i zademonstrowania analogu interferencji Hong-Ou-Mandla dla dwóch fal spinowych.

W Rozdziale 2 prezentuję warsztat teoretyczny niezbędny do planowania i wyjaśniania przeprowadzonych eksperymentów. Opracowana teoria służy do projektowania nowych protokołów w oparciu o dynamiczny efekt Starka (ac-Stark) i dopasowanie fazowe. Przedstawiam też w pełni kwantowy opis oddziaływania, ze szczególnym uwzględnieniem opisu pojedynczych kolektywnych wzbudzeń - fal spinowych.

Rozdział 3 opisuje powstały układ doświadczalny, skupiając się na najbardziej innowacyjnych elementach.

Rozdział 4 prezentuje opis najpojemniejszej na chwilę obecną pamięci kwantowej dla światła, działającej w oparciu o interfejs ramanowski. Zaprezentowana pamięć przechowuje światło w 665 modach przestrzennych. Szczegółowo opisane są nowe metody doświadczalne i analizy danych.

Rozdział 5 opisuje sposób uzyskania kontroli nad kolektywnym spinem zespołu atomów dzięki dynamicznemu efektowi Starka. Wyniki są zastosowane w Rozdziale 6, gdzie kontrolujemy przestrzenną fazę pojedynczych fal spinowych. Udaje się zademonstrować dwucząstkową interferencję fal spinowych prowadzącą do ich "sklejenia", jak w efekcie Hong-Ou-Mandla dla fotonów.

Rozdział 7 prezentuje rozwój tej nowej metody i jej zastosowanie do realizacji pamięci sekwencyjnej. Po raz pierwszy też demonstrujemy interferencję impulsów światła zapisanych do pamięci w różnych momentach.

W Rozdziale 8 opisuję inne podejście do nowych zastosowań fal spinowych, gdzie używamy odpowiednio przygotowanej spójności atomowej do kontroli nadpromienistości. Obserwujemy znaczny efekt nadpromienistego wzmocnienia emisji, po raz pierwszy w procesie mieszania sześciu fal, który dzięki pośredniczącej fali spinowej zapewnia nam niespotykaną do tej pory kontrolę.

Wreszcie rozdział 9 podsumowuje pracę i proponuje dalsze kierunki rozwoju.

Multimode Quantum Optics with Spin Waves and Photons

Michał Parniak

The thesis describes development of a multimode quantum memory based on laser-cooled gas of rubidium atoms. Starting with a construction of a magneto-optical trap we arrive at implementations of complex quantum protocols realized within the domain of spin waves stored in the memory, with the main achievement being the realization of a spin-wave analogue of the Hong-Ou-Mandel effect.

In Chapter 2 I introduce the theoretical framework needed to plan experiments and explain their results. The theory serves us in designing new protocols based on the ac-Stark effect and phase matching. A full quantum treatment of the light-atom interaction is also presented, with a particular focus on a quantized collective atomic excitations field.

Chapter 3 describes the essential and most innovative parts of the constructed experimental setup.

Chapter 4 presents the quantum memory with the highest capacity achieved so far, based on the Raman light-atom interface. The memory stores light in 665 spatial modes. New experimental and data analysis methods are highlighted.

Chapter 5 introduces the ac-Stark modulation applied to control the collective spin of an atomic ensemble. The results are immediately used in Chapter 6, where the same effect is employed to control spatial interference of single spin waves. Hong-Ou-Mandel two-particle interference for a pair of spin waves is demonstrated.

Chapter 7 presents further development of the new control methods with a focus on a sequential quantum memory. The interference of pulses inside the memory stored at different times is demonstrated for the first time.

In Chapter 8 we use our deepened understanding to unveil a new approach to spin waves, where we use them as a pump in a parametric down-conversion process. This allows us to observe and control superradiant emission, for the first time in the case of six-wave mixing. This allows unprecedented control over the superradiant emission pattern in space.

The final Chapter 9 summarizes the thesis and proposed future path of development.