

„Paradoks EPR w ciepło- i zimnoatomowych pamięciach kwantowych”

Niniejsza rozprawa doktorska przedstawia wyniki doświadczeń nad generacją i przechowywaniem stanów splątanych. Pokazano, że możliwe jest przechowywanie przez kilkanaście mikrosekund wielomodowego przestrzennie stanu splątanego tak przy użyciu gorących par, jak i chłodzonych laserowo atomów. Eksperymentalnie zademonstrowano stan wykazujący pozorny paradoks, oryginalnie opisany przez Einsteina, Podolskiego i Rosena (EPR) w pracy *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* [Phys. Rev. 47, 777 (1935)].

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów i trzech dodatków. Rozdział 1. wprowadza w tematykę kwantowego przetwarzania informacji, w szczególności splątania, pamięci kwantowych i ich wykorzystania do przyspieszonego generowania stanów wielofotonowych na żądanie. Rozdział 2. prezentuje formalizm używany do opisu tytułowego paradoksu EPR, wprowadzając tzw. *świadków splątania*: wariacyjnego i entropowego, używanych do wykrywania splątania w dalszej części pracy. Rozdział 3. opisuje proces nierezonansowego rozpraszania Ramana i jego zastosowanie do generowania dwumodowych stanów ściśniętych światła, a także wprowadza funkcje korelacji drugiego rzędu wykorzystywane w badaniu nieklasyczności światła.

Rozdział 4. prezentuje układ eksperymentalny pamięci kwantowej, bazujący na szklanej komórce wypełnionej parami rubidu z gazem buforowym. Szczegółowo omówiono kwestię jednoczesnego przechowywania wielu modów przestrzennych światła w postaci kolektywnych wzbudzeń atomowych. W rozdziale 5., wykorzystując wariacyjnego świadka splątania i odejmowanie przypadkowych koincydencji zliczeń na kamerze, pokazano wytwarzanie i przechowywanie wielomodowego przestrzennie stanu wykazującego paradoks EPR. Wprowadzony model dekoherencji dyfuzyjnej zgadza się z danymi, pokazując spadek liczby splątanych modów wraz z czasem przechowywania. Rozdział 6. pokazuje możliwość sterowania kierunkiem rozproszonych fotonów, wykorzystując przechowywanie informacji o ich kierunku emisji z pamięci kwantowej.

Rozdział 7. jest początkiem części poświęconej pamięci kwantowej zrealizowanej w zimnej chmurze atomów rubidu, znajdującej się w zbudowanej pułapce magnetoptycznej (MOT). Zawiera szczegółowy opis układu eksperymentalnego, jak również wyniki demonstrujące wytwarzanie nieklasycznego światła w kilkuset rozróżnialnych modach przestrzennych, bez konieczności odejmowania szumu. Rozdział 8. przedstawia generowanie i przechowywanie wielomodowego przestrzennie stanu splątanego pomiędzy pojedynczym fotonem a makroskopową grupą atomów rubidu. Pokazano, w reżimie bardzo małej liczby zliczeń fotonów, przewagę entropowego świadka splątania nad świadkiem wariacyjnym dla dużej liczby dostępnych modów przestrzennych oraz w obecności szumu. Charakterystyka splątania w gorących parach atomowych wymaga odejmowania szumu, czego nie trzeba robić korzystając z zimnej chmury atomów, kosztem budowy znacznie bardziej skomplikowanego układu eksperymentalnego.

Rozprawę podsumowuje rozdział 9., w którym nakreślono dalsze kierunki badań i potencjalne zastosowania, jakie mogą znaleźć przedstawione realizacje pamięci kwantowej. Dodatki A, B i C zawierają odpowiednio uzupełnienie opisu teorii rozpraszania Ramana, szczegóły układów eksperymentalnych oraz charakteryzację wykorzystywanego w rozdziałach 4–6 układu filtrów atomowych.

PHD THESIS ABSTRACT

"EPR paradox in warm and cold atomic quantum memories"

The following doctoral dissertation presents the results of the experiments on generation and storage of entangled states. We show that it is possible to store for a dozen of microseconds a spatially-multimode entangled state using hot atomic vapours as well as laser-cooled atoms. We experimentally demonstrate a state which exhibits the superficial paradox, originally described by Einstein, Podolsky and Rosen (EPR) in the article *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* [Phys. Rev. 47, 777 (1935)].

The dissertation is composed of nine chapters and three appendices. Chapter 1 introduces a topic of quantum information processing, particularly entanglement, quantum memories and their utilization for enhanced generation of multiphoton states on demand. Chapter 2 presents the formalism used to describe the titular EPR paradox, introducing the so-called *entanglement witnesses*: variance- and entropic-based which are used to detect the entanglement in the remaining part of the thesis. Chapter 3 describes the off-resonant Raman scattering process and its application to generation of two-modes squeezed states of light, as well as introduces second-order correlation functions used in testing nonclassicality of light.

Chapter 4 presents the quantum memory experimental setup, based on glass cell filled with rubidium vapours with buffer gas. Simultaneous storage of many spatial modes of light as collective atomic excitations is described in details. In chapter 5, using variance-based witness and subtraction of coincidental counts on the camera, we show generation and storage of spatially-multimode states exhibiting EPR paradox. The introduced model of diffusional decoherence fits data very well, showing decrease of the number of entangled modes with the increasing storage time. Chapter 6 shows an ability to steer the direction of scattered photons, using the information about their directions of emission stored in the quantum memory.

Chapter 7 begins the second part of the thesis, connected with quantum memory realization in cold cloud of rubidium atoms, produced using constructed magneto-optical trap (MOT). It contains detailed description of experimental setup, as well as results which demonstrate the generation of nonclassical light into several hundred of distinguishable spatial modes, without background noise subtraction. Chapter 8 presents generation and storage of spatially-multimode entangled state between single photon and macroscopic ensemble of rubidium atoms. We show, in the regime of small number of photocounts, the supremacy of entropic-based over variance-based witness for large number of available modes and in the presence of noise. Entanglement characterization in the system of hot atomic vapours requires noise subtraction which is not the case when we use cold cloud of atoms, but at the expense of much more complicated experimental setup.

The dissertation is summarized in chapter 9 which includes further research directions and potential applications of presented realizations of quantum memory. Appendices A, B and C contain supplemental description of Raman scattering theory, details of experimental setups and characterization of filtering setup used in chapters 4 – 6, respectively.