原子気体を用いた量子メモリ Quantum memory using atomic gas

○桑本剛¹, 上薗慎悟², 伊丹勇輔²

*Takeshi Kuwamoto¹, Shingo Uesono², Yusuke Itami²

Abstract: Our target in N-dot project is to attain the long-term and efficient storage of photons with quantum property in neutral atomic gas. This study links to the realization of quantum memory, which is one of the key devices for establishing the quantum communication, processing and computation. We have been concretely investigating the following two themes; (1) light storage in the atomic gas by electromagnetically induced transparency (EIT), (2) generation of the orthogonally polarized photon pairs as a quantum light source. In this talk, we interpret the outline of quantum information technology and our studies intelligibly

1. 量子情報技術と量子メモリ

量子情報通信や量子計算は「重ね合わせの原理」,「も つれ合い」,「観測による状態の決定」という光子や電子, 原子核,原子等が有する基本的な"量子性"を利用して 実現される.量子情報技術が実用化されると,解読不可 能な暗号通信や超高速通信,現在のスーパーコンピュー タの演算能力を凌駕する超並列・高速計算が実現される 可能性が指摘されている[1].

量子情報技術の究極の目標の一つは、極めてセキュリ ティが高い高速通信網(量子ネットワーク)を全世界中 (さらには宇宙にも)に張り巡らせることであろう.量 子ネットワークの概略を図1に示す.これは、量子情報 の運び手(光子)が遠隔地間で行き来できる通信システ ムであり、基本構成は光子が伝搬する経路(光ファイバ ーや空間)および量子中継器からなる.量子中継器は光 子の量子性の劣化を抑制するために、量子情報の受信, 保存、処理、送信を行う.この機器を機能させるために は、量子情報(光子)を一時保存するデバイスである"量 子メモリ"[2]が必要不可欠である.

量子メモリの候補としては,量子ドットや光学結晶, 窒素-空位格子欠陥をもつダイヤモンド結晶等があるが, 中性原子気体も有力な候補である.我々は,⁸⁷Rb 原子気 体中への偏光量子もつれ光子対の保存を目指し研究を続 けている.

本講演では,量子情報技術について概観を解説し,我々の目標である原子中への偏光量子もつれ光子対の保存に必要となる(1)⁸⁷Rb原子気体へのコヒーレント光(レーザ 一光)の保存実験,および(2)偏光量子もつれ光子対の元 となる,偏光直交光子対の生成実験に関して述べる.

2. 電磁誘起透明化を利用した原子中への光保存 我々は,電磁誘起透明化(Electromagnetically Induced)



Fig. 1 Conceptual diagram of quantum network.

Transparency: EIT) [3]という現象を利用して,光を原子中 に保存する. EIT は図2のように,3つの準位をもつ原子 (や物質)と2つの共鳴光(probe laser および control laser) が相互作用するときに現れる特異な光学現象である.

EIT に表れる光学現象の代表的なものは、図 2 中の probe light の群速度(伝搬速度)の極度の低下である.こ れは control laser の強度調整で可能であり, control laser の 強度を下げると probe laser の群速度は遅くなる.最終的 に control laser の強度をゼロにすると, probe laser 光は原 子中に捕獲される. EIT の特徴は,この現象がユニタリ ーな過程(光の性質が変化しない)であるということで あり,再度 control laser を照射すると,保存前の性質を保 った光が原子から出てくる.



Fig. 2 Three-level atom and two resonance laser light.

図3に、パルス化した probe laser 光を原子中に5 μs 間 保存したあと、再生した実験結果を示す. 左側のピーク は原子に保存されず通過した光であり、右側が原子中に



Fig. 3 Result of light storage experiment. Left peak corresponds to non-stored light pulse. Right peak is retrieved light pulse after 5-µs storage in ⁸⁷Rb vapor.

保存したあとに再生して出て来たパルス光である.光の 保存時は, probe laser と同時に入射している control laser を瞬時に遮断することで,光の再生は control laser を瞬時 に再入射させることで実現する.

今後我々は,次に述べる量子的な光(直交偏光光子対) を原子中に保存する予定である.

3. 直交偏光光子対の生成および量子性の確認

我々は、上で述べた光の保存実験系の開発と同時に、 量子的性質をもつ光源である、直交偏光光子対の生成実 験も進めている. 直交偏光光子対は、量子テレポーテー ションや量子鍵配送等に利用され、量子情報通信におい て不可欠な偏光量子もつれ光子対の元となる光源であり、 非常に重要である.光子対は、2次の非線形効果が高い光 学結晶を用いて、自然パラメトリック下方変換(SPDC) と呼ばれる、光の波長変換過程を利用して生成する.光 子は常に対で生成され、互いの偏光が直交している.我々 は、初期の目的として、⁸⁷Rb 原子への直交偏光光子対の 保存を考えているため、⁸⁷Rb 原子に共鳴する,波長 795 nm の光子対を生成した.

非線形光学結晶としては Type II PPKTP 結晶 (周期分極 反転 KTiOPO₄)を用いた.この結晶に波長 397.5 nm のレ ーザー光 (6 mW) を入射させ, SPDC によって波長 795 nm の直交偏光光子対を生成した.

生成した光子対の量子性を確認するために、2光子干渉 実験を行った.この実験では、生成した光子対を偏光ビ ームスプリッター(PBS)に通す.PBSは水平偏光を透 過し、垂直偏光を反射する光学素子である.よって、光



Fig. 4 Result of tow-photon quantum interference experiment.

子対の偏光が水平面に対して、それぞれ0°および90°の時、透過および反射経路それぞれに1つずつ光子が現れる.光子対の偏光が45°および135°の場合、1/2の確率で反射または透過するため、それぞれの経路に光子が1つずつ現れる確率は0°および90°の時の1/2になる.しかし、この2つの光子に量子性がある(空間的、時間的、エネルギー的に見分けがつかない)場合、PBS上で2つの光子が干渉し、それぞれの経路に光子が1つずつ現れる場合がなくなる.つまり、2つの経路の同時計数測定を行ったとき、45°および135°の時の同時計数が0°および90°の時に比べて半分以下になった場合はその光子対は量子性を持つと判断できる.

図 4 に実験結果を示す.光子対の偏光が 45° および 135°の時の同時計数は 0° および 90°の時の半分以下 に落ちていることが分かる.この結果をビジビリティの 公式,

$V = \frac{Count(0^{\circ} \& 90^{\circ}) - Count(45^{\circ} \& 135^{\circ})}{Count(0^{\circ} \& 90^{\circ}) + Count(45^{\circ} \& 135^{\circ})}$

にあてはめると93%であった.これは、今回生成した直 交偏光光子対が十分な量子性を示していることを示して いる.

4. まとめ

我々は、量子ネットワークの構築に必要不可欠な量子 メモリの開発研究を行っている. 今後、上記の2つの実 験系を統合して、量子通信に有用な量子もつれ光子対の 原子中への捕獲実験を行っていく.

参考文献

[1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum

Information: 10th Anniversary Edition (Cambridge University Press, 2010). [2] C. Simon. et al., Eur. Phys. J. D 58, 1 (2010).

[3] M. Fleischhauer et al., Rev. Mod. Phys. 77, 633 (2005).