

# 高 Q 値光微小共振器内に閉じ込められた原子ボース凝縮体を用いた “真の光量子情報の凍結と再生” (継続-13)

Storage and retrieval of quantum information of light field by using Bose-Einstein condensate of atomic gas inside a High-Q optical micro cavity

上妻 幹旺、東京工業大学 大学院理工学研究科  
Mikio Kozuma, Tokyo Institute of Technology

研究期間 平成 13 年度～平成 16 年度

## 概要

本プロジェクトの目的は、光の量子状態を原子スピン系に転写した後、元の光を再生する、いわゆる量子メモリを実現することにあった。具体的には、単一光子状態、真空スクイズド状態という特徴的な二つの光の量子状態を保存再生することが最終目的であった。4年間のプロジェクト期間中に上記の目的を完全に達成するには至らなかったが、理学的にも工学的にも大変重要な数多くの研究の進展を得ることが出来た。また最終目的に関しても、このまま順調に進めば、年内には目的を達成出来ると考えられる。光の量子状態を保存再生するためには、原子と共鳴する非古典光を準備し、かつそれらについて電磁誘起透明化現象(EIT)を起こさなければならない。我々は、真空スクイズド状態をルビジウムの D1 線近傍で発生させ、EIT を世界で初めて観察することに成功した。従って、真空スクイズド状態の保存再生まで秒読みの段階に入った。さらに、通常のパラメトリック蛍光 (スペクトル幅～数 THz) とは異なり、原子の自然幅以下のスペクトル幅 (~1MHz) しか持たない蛍光対を生成することに世界で初めて成功した。これにより、原子と共鳴する条件付きの単一光子状態を生成し、EIT によって単一光子状態の保存再生を行うめどがついた。

## Abstract

While photons do not interact with each other and are difficult to localize, they are the fastest and the most robust carriers of quantum information. In contrast, atoms can interact with each other and can even be stopped by conventional laser cooling techniques, but they cannot be the fast carrier of the information. We can cancel the disadvantages of both systems and utilize only advantages if quantum information of lights can be coherently transferred to the atoms. Here I introduce experimental achievement on such an unitary communication of quantum information between light fields and atomic systems.

実際のプロジェクト研究が始まった後、我々は、光の量子情報を保存再生するにあたり、ボース凝縮体と Cavity QED とを組み合わせた複雑な系を組む必要があるかどうかを真剣に検討した。その結果、通常の冷却原子集団、場合によっては、ガラスセル中の熱ガス原子集団でも、保存再生の可能性があることがわかった。そのため、実際の実験は、こうした系を用いたものとなった。原子に関してはより簡単な系を用い、非古典光の発生については必要上、複雑な系を用いるという方向性でプロジェクトをすすめることにした。

<真空スクイズド状態の保存再生について>

PPLN 導波路を用いて-1.5dB の真空スクイズド状態を生成した。この光源を利用することで、真空スクイズド状態の電磁誘起透明化を観察することに世界で初めて成功した。さらに真空スクイズド状態をパルス化し、遅延、凍結、再生の実験にトライするに至った。しかし、スクイズレベルが-1.5dB と小さく、また電磁誘起透明化における透明度が十分ではない、さらにスクイズの本質が2モードであるのに対して、原子系はシングルモードの励起状態しか準備するのが難しい、などの諸問題のため、遅延を観察することが出来なかった。そこでまずスクイズレベルを向上させるために、各種の非線形結晶についてスクイズのシミュレーションを行い、-3dB 以上のスクイズをルビジウム D1 線において発生させる手法を発見するに至った。具体的には、バルク PPKTP、つまり導波路型ではない PPKTP 結晶を利用することで、理論上は-3dB 以上のスクイズを得ることが出来ることが判明した。さらにモード数の問題について、これを解決する手法をみつけた。

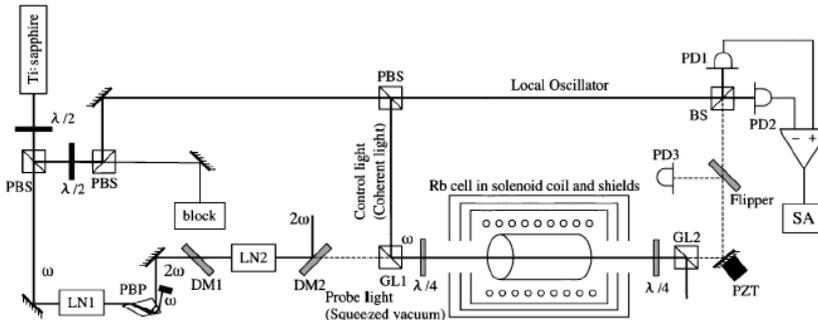


FIG. 1. Schematic explanation of the experiment setup. PBS, polarizing beam splitter; LN, quasi-phase-matched MgO:LiNbO<sub>3</sub> waveguide; PBP, Pellin Broca prism; GL, Glan laser prism; BS, beam splitter; PZT, piezoelectric transducer; DM, dichroic mirror; PD, photodetector. SA: spectrum analyzer.

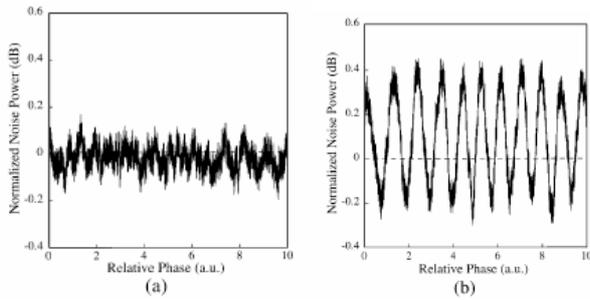
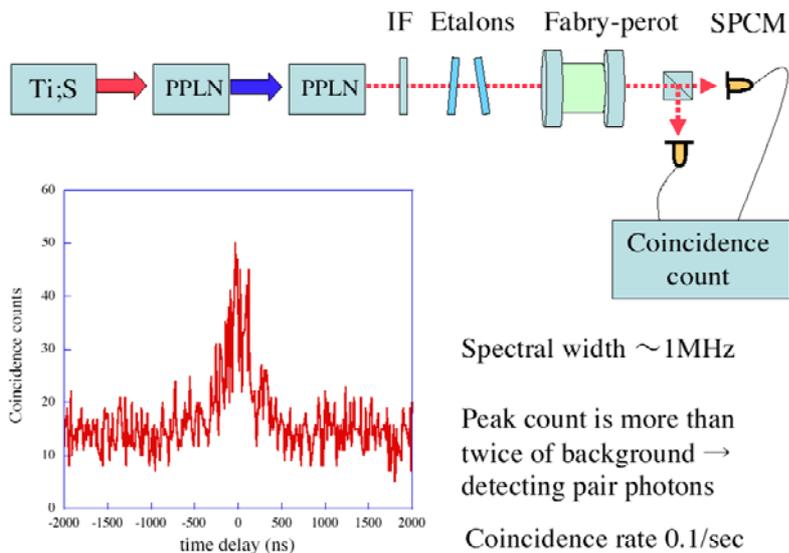


FIG. 3. Balanced homodyne signals of the probe light passed through the Rb cell (a) without the control light and (b) with the control light, where squeezed vacuum was used for the probe light. We normalized the quadrature noise levels by the shot noise ( $-69.9$  dBm) shown in dashed lines. Relative phase between the probe field and the local oscillator was scanned using a piezoelectric transducer.

#### <単一光子状態の保存再生について>

パラメトリック蛍光を利用して条件付き単一光子状態を生成し、これに対して電磁誘起透明化を行うことで、単一光子状態の保存再生を行うという方向性で研究を進めた。条件付き PPLN 導波路、干渉フィルター、エタロンを用いて 1.7GHz のスペクトル幅をもつパラメトリック蛍光を生成した。これによりパラメトリック蛍光をルビジウム D1 線と相互作用させることが可能となった。実際にドップラー広がりを起こした原子ガスとの相互作用を通し、パラメトリック蛍光を低速度伝搬させることに世界で初めて成功した。得られたパラメトリック蛍光は強度相関関数に関するコーシーシュワルツの不等式を大きく破っており、単一光子状態として十分利用可能な状態にあった。但し、電磁誘起透明化を利用して、光の状態を凍結再生するには、スペクトルをさらに 1000 分の 1 に狭窄化し、原子の自然幅 (6 MHz) 以下にする必要がある。そこで 1.7GHz までスペクトルが狭窄化されたパラメトリック蛍光を、active 制御されたファブリペロー共振器に通し、スペクトルを 1 MHz まで狭窄化した。このような極限的スペクトル狭窄化も世界で初めての試みである。ファブリペロー共振器を通過した後のパラメトリック蛍光をビームスプリッターで二つに分け、それぞれを単一光子検出器で受けることで、同時計数測定を行った。その結果、同時発生した 2 光子特有の鋭いバンチング信号が計測された。コヒーレンス時間は、500ns 程度であり、ここから予想通りパラメトリック蛍光のスペクトル幅が 1MHz 程度まで狭窄化されたことがわかった。同時計数レートは、0.1 counts/sec であった。



#### 誌上发表リスト

- [1] Daisuke Akamatsu, Keiichirou Akiba, and Mikio Kozuma, “Electromagnetically induced transparency with squeezed vacuum”, Phys. Rev. Lett. 92, 203602-1 (2004).
- [2] D. Akamatsu and M. Kozuma, “Coherent transfer of orbital angular momentum from atomic system to light field”, Phys. Rev. A 67, 023803-1 (2003).
- [3] M. Kozuma, D. Akamatsu, L. Deng, E.W. Hagley, and M.G. Payne, “Steep optical wave group velocity reduction and “storage” of light without on-resonance electromagnetically induced transparency”, Phys. Rev. A 66, 031801(R) (2002).

#### ホームページによる情報提供

<http://www.phys.titech.ac.jp/laboratory/kozuma.html>